

**Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН
Научный совет по машиностроению РАН
Российский национальный комитет по теории машин и механизмов
Межведомственный научный совет по трибологии**

НАУЧНЫЕ ТРУДЫ

**IX Международной научной конференции
«Фундаментальные исследования и
инновационные технологии
в машиностроении»
посвященной 135-летию со дня рождения
профессора Хрущова Михаила Михайловича**

**Москва
2025**

УДК 621.9
ББК 34.5

Редакционная коллегия:

академик Ганиев Р.Ф., и.о. директора Рагуткин А.В., д.т.н., проф. Албагачиев А.Ю., д.т.н. Смирнов Н.И., редактор-составитель Фролов А.Д.

Научные труды IX Международной научной конференции “Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении”. – М.: ИМАШ РАН. – 2025. – 373 с.

В сборник включены статьи, написанные по материалам докладов, представленных на IX Международной научной конференции “Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении”, проходившей с 11 по 13 ноября 2025 г. в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. На конференции были представлены результаты работ по следующим шести научным направлениям:

1. Робототехника и автоматизация технологических процессов.
2. Волновые технологии в машиностроении.
3. Инновационные, цифровые и аддитивные технологии в машиностроении.
4. Трибология, триботехнологии и сварка трением.
5. Перспективные конструкционные и трибологические материалы, наноматериалы и покрытия.
6. Искусственный интеллект, цифровые двойники изделий и модели накопления повреждений при обработке

Организаторы конференции – Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; Российская академия наук; Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН; Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН; Научный совет по машиностроению РАН, Российский национальный комитет по теории машин и механизмов; Межведомственный научный совет по трибологии; Российский союз научных и инженерных объединений (обществ); Ассоциация технологов–машиностроителей; Ассоциация инженеров–трибологов России.

Материалы сборника подготовлены к изданию оргкомитетом конференции на основе оригиналов авторских рукописей. Ответственность за достоверность сведений и хранение государственной или корпоративной тайны несут авторы публикаций.

ISBN 978-5-904282-23-3

© ФГБУН Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова РАН, 2025

ТЕРМОДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ И АДАПТАЦИИ МАТЕРИАЛОВ К ДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Рагуткин А.В.

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия

Представление процесса как преобразование внешней механической энергии во внутреннюю энергию системы, которая реализуется как движущая сила процессов образования, роста и разрушения ядер адгезионного схватывания, которые подчиняются закономерностям топочимической кинетики, дает возможность представить экспериментальные характеристики в форме теоретических зависимостей. Эти зависимости покрывают весь диапазон изменения коэффициента трения от скорости, включая классическую экспериментальную зависимость Герси – Штрибека, а также зависимость при сверхмалых скоростях скольжения.

Изучены закономерности накопления повреждений и формирования условий микро- и макроразрушения материалов, а также вопросы кинетической теории прочности и влияние температурных и силовых факторов на накопление необратимых повреждений в материалах. Феноменологические модели образования и распространения дефектов структуры с высокой степенью адекватности определяют прочностные, антикоррозионные, триботехнические свойства материалов и характер проявления процессов разрушения при эксплуатации.

В вычислительном эксперименте выявлены следующие тенденции: рост скорости скольжения приводит к линейному росту температуры в зоне топочимической реакции адгезионного схватывания и к линейной зависимости снижения энергии активации образования и роста ядер адгезионного схватывания на пятнах контакта взаимодействующих поверхностей материалов. Линейный характер зависимости приводит к тому, что при определенных значениях скорости скольжения энергия активации становится отрицательной, что дает рост экспоненциальных членов зависимости. В рамках работ по моделированию технологических процессов и разработки методологии исследования связей моделей цифровых машиностроительных производств были решены задачи по определению зависимостей между параметрами в математических моделях кинетики.

Результаты анализа различных повреждений и процессов их развития позволили сформулировать научно-исследовательский прием, который заключается в том, что некоторый набор математических моделей кинетики накопления повреждений строится с использованием гипотетических схем квазихимических реакций. При этом сравнение результатов эксперимента с результатами расчета, на уровне качественного

подобия установленных зависимостей дает возможность выбора подходящей кинетической схемы. Последующая аппроксимация позволяет перейти к физически обоснованной интерпретации полученных результатов испытаний на отказ и после этого проводится эксперимент с использованием структурных методов исследования с целью подтверждения гипотетической схемы или выбора из числа предварительно разработанных.

В процессе работы над проектом «Обеспечение качества высокотехнологичной продукции машиностроения на основе цифровых двойников технологических и производственных процессов» по Соглашению о предоставлении из федерального бюджета гранта в форме субсидии от «23» апреля 2024 г. № 075-15-2024-527 исследуются критические процессы, такие как разрушение материалов, спекание и кристаллизация – процессы с избыточной энергией. Определено, что механизм ламинарно-турбулентного перехода при накачке кинетической энергии является диффузионное расслоение, которое реализуется в одномерном случае полосчатой структурой перемежения слоев с большими (турбулизированные слои) и малыми градиентами (ламинарные слои) переменных. Увеличение энтропии системы при переходе от ламинарного состояния к турбулентному представлено в форме энтропии смешения удельных объемов (слоев идеальной смеси), имеющих разные значения гидродинамической составляющей энтальпии, работы против силы тяжести, энергетической составляющей процесса и составляющей, обусловленной сжимаемостью. Ламинарно-турбулентный переход при вибрационном процессе наступает при увеличении скорости пассивной компоненты на входе. Доказано, что накачка кинетической энергией приводит к избыточной энергии ламинарного процесса приближения локального равновесия и вызывает его неустойчивость. Последнее выражается либо резонансом, либо срывом с многообразие локального равновесия, которое имеет характер турбулизации процесса.

Впервые обоснованы критерии, обеспечивающие возможность управления процессами спекания материалов, контроля процессов образования дефектов при технологической обработке, эффективности применения материалов в критических условиях эксплуатации.

Обосновано применение смазочно-охлаждающих технологических сред для процессов

обработки материалов, как средство, обеспечивающее возможность «бездефектного» резания. Применение разработанной СОЖ обеспечивает увеличение стойкости режущего инструмента на различных операциях гарантировано в 1,5–2,0 раза, а в некоторых случаях до 15 раз, при контролируемом повышении качества обработки.

Обоснованы модели подбора материалов для пар трения, смазок и присадок, обеспечивающих надежную эксплуатацию узлов трения в процессе эксплуатации. Применение технологических сред для артиллерийских систем показало возможность снижения износа стволов до 4,5 раз. Разработанный метод математического описания трибохимических процессов как взаимодействия ядер схватывания при возрастании внешних факторов, позволил за счет изменения параметров формировать тонкие защитные пленки на поверхности стволов (аналог образования шеек при спекании).

Модель для описания процесса образования шеек при спекании, также как модель кристаллизации, основана на представлении процесса спекания как двухфазного неравновесного процесса. Твердая фаза – блоки и вторая фаза-

превращенное состояние по И.Г. Баренблатту. Распространение возмущений описывается уравнениями типа Био для пористой среды. В такой модели есть упругая волна и поверхностная волна (аналог волны Стоунелли в модели Био). Численный эксперимент показал, что поверхностная волна либо резонирует при нагреве, либо сбрасывает избыток энергии через ее турбулизацию.

Методология, в том числе по цифровизации производств, нашла применение на предприятиях ракетно-космической отрасли, что определяет высокую степень подготовленности к ее широкомасштабному использованию. Предполагается последовательное ее применение по согласованным планам с предприятиями и отраслевыми структурами РКО, для чего ведется работа по обоснованию масштабов реализации, включая программные продукты реализации оптимальных стратегий построения технологических процессов создания изделий авиакосмической техники и возможности использования результатов в смежных отраслях машиностроительного комплекса страны.

ПРИМЕНЕНИЕ ГРАМИАННОГО ПОДХОДА ДЛЯ СИНТЕЗА РОБАСТНОЙ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ С ПОЛИНОМИАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ

Аббясов А.М.

Ивановский государственный энергетический университет, Иваново, Россия; alex.bit@mail.ru

В работе описывается применение матрично-грамианного метода структурно-параметрического синтеза мехатронной системы с полиномиальным регулятором, предназначенной для управления типовым производственным объектом в виде двухмашинного технологического агрегата по производству ленточного материала, демонстрируется эффективность метода и его практическая ценность.

Введение

Для удовлетворения современным требованиям мехатронные системы (МС) должны обеспечивать высокий темп и точность выполнения технологических операций в разнообразных режимах работы, широком диапазоне скоростей, при воздействии значительных внутренних и внешних возмущений.

Во многих случаях особенности объектов управления (ОУ) и трудности измерения координат приводят к необходимости замены регуляторов полного вектора состояния динамическими регуляторами «вход-выход», получивших название полиномиальных регуляторов (ПР)

Однако при возрастании степени сложности ОУ и повышении порядка используемых ПР их эффективность значительно снижается из-за повышения чувствительности систем к вариациям параметров объекта и регулятора, что определяет необходимость дальнейшего совершенствования систем автоматического управления (САУ) в направлении существенного повышения их робастных свойств.

Применение и развитие робастного полиномиального управления сдерживается отсутствием целенаправленного метода синтеза, обеспечивающего робастное управление, методов прогноза робастных свойств синтезируемых систем и выявления возможностей их улучшения, отсутствием необходимых программных средств для реализации процедур автоматизированного синтеза ПР, обеспечивающих необходимую параметрическую грубость САУ и др.

Метод количественной оценки степени управляемости и наблюдаемости

Универсальные и информативные оценки степени управляемости и наблюдаемости ОУ позволяют прогнозировать свойства синтезируемых САУ и количественно оценивать эффективность методов улучшения системных свойств объектов [1].

Векторно-матричное описание ОУ порядка n в реальных координатах состояния $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T$ задается в виде:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t)$$

где $\mathbf{A}$, $\mathbf{B}$ и $\mathbf{C}$ – матрицы состояния, входа и выхода с размерностями $n \times n$, $n \times 1$, $1 \times n$ соответственно, $\mathbf{u}$ – управляющее воздействие, $\mathbf{y}$ – выходная величина, t – время; при этом получаем следующее выражение передаточной функции (ПФ) «вход-выход» в нормализованном виде

$$H(s) = \mathbf{C}(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1}\mathbf{B} = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{b_ms^m + \dots + b_1s + b_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + a_{n-2}s^{n-2} + \dots + a_2s^2 + a_1s + a_0}$$

где $\mathbf{I}$ – единичная матрица, $B(s)$ и $A(s)$ – полиномы комплексной переменной Лапласа s . Из их коэффициентов легко формируются соответствующие матричные представления объекта в канонической форме управляемости (КФУ) $\bar{\mathbf{A}}, \bar{\mathbf{B}}, \bar{\mathbf{C}}$ и наблюдаемости (КФН) $\tilde{\mathbf{A}}, \tilde{\mathbf{B}}, \tilde{\mathbf{C}}$.

Метод количественной оценки степени управляемости S_U и наблюдаемости S_V использует идею сопоставления структуры объекта с соответствующими структурами в КФУ и КФН, принятыми за эталонные.

$$S_U = \|\bar{\mathbf{U}} \cdot \mathbf{U}^{-1}\|_1, \quad S_V = \|\tilde{\mathbf{V}} \cdot \mathbf{V}^{-1}\|_1,$$

$$\mathbf{U} = [\mathbf{B} \ \mathbf{AB} \ \mathbf{A}^2\mathbf{B} \ \dots \ \mathbf{A}^{n-1}\mathbf{B}],$$

$$\bar{\mathbf{U}} = [\bar{\mathbf{B}} \ \bar{\mathbf{A}}\bar{\mathbf{B}} \ \bar{\mathbf{A}}^2\bar{\mathbf{B}} \ \dots \ \bar{\mathbf{A}}^{n-1}\bar{\mathbf{B}}],$$

$$\mathbf{V} = [\mathbf{C}^T \ \mathbf{A}^T\mathbf{C}^T \ (\mathbf{A}^T)^2\mathbf{C}^T \ \dots \ (\mathbf{A}^T)^{n-1}\mathbf{C}^T],$$

$$\tilde{\mathbf{V}} = [\tilde{\mathbf{C}}^T \ \tilde{\mathbf{A}}^T\tilde{\mathbf{C}}^T \ (\tilde{\mathbf{A}}^T)^2\tilde{\mathbf{C}}^T \ \dots \ (\tilde{\mathbf{A}}^T)^{n-1}\tilde{\mathbf{C}}^T].$$

Степень близости критериев к единице отражает структурное соответствие исходного представления объекта и его канонических форм.

Согласование объекта по входу и выходу соответственно с КФУ и КФН может осуществляться принудительной коррекцией значащих элементов матриц $\mathbf{B}$ и $\mathbf{C}$, исключаяющей влияние безынерционных звеньев на входе и выходе ОУ на оценки его управляемости и наблюдаемости.

Коррекция управляемости и наблюдаемости ОУ с помощью грамианов

Коррекция системных свойств ОУ

осуществляется методом целенаправленного синтеза робастных линейных динамических систем на основе повышения степени управляемости и наблюдаемости расчетной модели объекта [2].

Система управления с ПР представлена на рис. 1, где g , y – входной и выходной сигналы; u – управляющее воздействие на ОУ; $R(s)$, $C(s)$ – полиномы ПФ регулятора минимального порядка, для которого $\deg R(s) = \deg C(s) = n-1$; A' , B' и C' – матрицы предрегулятора, согласованные по размерностям с соответствующими матрицами объекта.

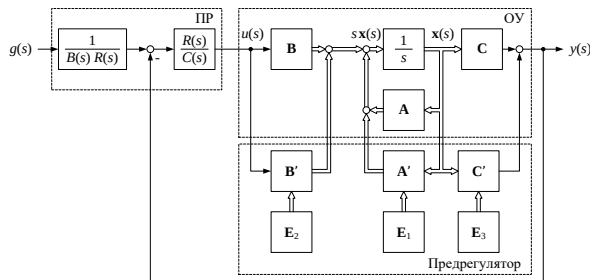


Рис. 1. Система управления с ПР

Дифференциальное описание ОУ имеет вид (1), где матрицы A и B являются интервальными. Компоненты матриц A , B и C , которые можно изменять введением дополнительных каналов и связей, отмечаются единичными значениями соответствующих элементов двоичных матриц-масок E_1 , E_2 и E_3 на фоне нулевых значений остальных элементов.

Синтез ПР проводится методом полиномиального модального управления при номинальных значениях параметров ОУ путем решения уравнения [3]:

$$A(s)C(s) + B(s)R(s) = D(s),$$

где $D(s)$ – желаемый характеристический полином (ХП) ПФ замкнутой системы.

Задача робастного управления решается путем повышения степени управляемости и степени наблюдаемости ОУ за счет преобразования подобия матриц A , B и C к виду, приближающему структуру ОУ соответственно к КФУ и КФН. Для определения матриц преобразования координатного базиса ОУ используется аппарат грамиана управляемости G_C и грамиана наблюдаемости G_O , а также их сингулярных разложений:

$$G_C = U_C \Sigma_C U_C^T, G_O = V_O \Sigma_O V_O^T,$$

где U_C и V_O – матрицы преобразования грамианов к диагональной форме. Для более точной оценки системных свойств ОУ используются разработанные выше количественные критерии степени его управляемости и наблюдаемости.

Процедура синтеза САУ заключается в том, что для исходной матричной модели объекта

принудительно увеличивают малые значения сингулярных чисел грамиана управляемости и грамиана наблюдаемости:

$$\hat{\Sigma}_C = \Sigma_C + \Delta \Sigma_C, \hat{\Sigma}_O = \Sigma_O + \Delta \Sigma_O.$$

Затем определяют матрицы $\hat{A}$, $\hat{B}$, $\hat{C}$, а также $\hat{U}_C$ и $\hat{V}_O$ модели объекта, переведенной в новую систему координат путем преобразования подобия:

$$\hat{A} = T^{-1}AT, \hat{B} = T^{-1}B, \hat{C} = CT, \\ \hat{G}_C = T^{-1}G_C T^{-T}, \hat{G}_O = T^T G_O T.$$

Для определения матриц преобразования T используют исходные и новые значения матриц диагонального разложения грамианов:

$$T = U_C \Sigma_C^{1/2} \hat{\Sigma}_C^{-1/2} \hat{U}_C^{-1} \text{ или } T = V_O^{-T} \Sigma_O^{-1/2} \hat{\Sigma}_O^{1/2} \hat{V}_O^T.$$

Предлагаемая процедура коррекции системных свойств объекта реализуется путем изменения его параметров или введения дополнительных связей, формируемых предрегулятором, который описывается матрицами:

$$A' = \hat{A} - A, B' = \hat{B} - B, C' = \hat{C} - C.$$

Новая версия ПР рассчитывается по скорректированной предрегулятором ПФ объекта, определяемой следующим образом

$$\hat{H}(s) = \hat{C}'(sI - \hat{A}')^{-1} \hat{B}' = \hat{B}(s) / \hat{A}(s),$$

где $\hat{A}' = A + A' \circ E_1$, $\hat{B}' = B + B' \circ E_2$, $\hat{C}' = C + C' \circ E_3$; $\hat{B}(s)$, $\hat{A}(s)$ – новые полиномы ПФ скорректированной модели ОУ, символ « $\circ$ » – умножение Адамара.

Для получения желаемых сингулярных чисел $\hat{\Sigma}_C$ и $\hat{\Sigma}_O$ можно варьировать только часть элементов матриц A' , B' и C' , задаваемых двоичными матрицами E_1 , E_2 и E_3 , путем поэлементного умножения.

С учетом особенностей ОУ следует проанализировать возможность воздействия не на все из указанных матриц для минимизации синтезируемого предрегулятора. Разработанная процедура формирует основу для синтеза основного ПР, способного улучшить робастные свойства создаваемых САУ.

На основе предложенного метода был разработан программный комплекс (ПК) «GRAMIAN PR», который в полном объеме реализует алгоритм и соответствующие процедуры грамианного структурно-параметрического синтеза робастных САУ с ПР.

ПК официально зарегистрирован Роспатентом в качестве программы ЭВМ для синтеза систем управления с низкой параметрической чувствительностью [4].

Синтез робастной системы управления транспортирования материала на основе грамианного метода

Эффективность грамианного метода показана на примере синтеза робастной системы управления двухканальной САУ транспортированием материала (ТМ), которая характерна для поточных линий в химической, бумагоделательной, текстильной, металлургической и других областях промышленности. Соответствующее векторно-матричное описание заданного ОУ принимает следующий вид:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -7,8 & -42,25 & 42,25 & 0 \\ 0,56 & -3,11 & -2 & 2,67 \\ -0,45 & -0,73 & -2,55 & 2,18 \\ 0 & 3 & 3 & -4 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 7,5 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{C} = [0 \ 0 \ 0 \ 8000].$$

Количественные оценки степени управляемости и наблюдаемости объекта ($S_U = 5,18$, $S_V = 261,91$) позволяют прогнозировать ухудшение качества управления системы в реальных условиях эксплуатации. Для номинальных параметров ОУ и заданном ХП синтезируемой САУ в виде полинома Ньютона $D(s) = (s+15)^7$ получаем следующие выражения полиномов ПР минимального порядка:

$$R(s) = 0,18s^3 + 3,01s^2 + 15,21s + 19,61;$$

$$C(s) = s^3 + 87,54s^2 - 2,86 \cdot 10^3 s - 2,17 \cdot 10^4.$$

Такой регулятор оказывается неминимально-фазовым динамическим звеном, является трудно реализуемым и значительно снижает параметрическую грубость системы управления, сформированной на его основе.

Коррекция сингулярных чисел грамианов управляемости и наблюдаемости, выполненная с помощью ПК «GRAMIAN PR», позволяет существенно улучшить системные свойства расчетной модели объекта ($S_U = 4,28$, $S_V = 23,19$) за счет использования соответствующего предрегулятора

$$\mathbf{A}' \circ \mathbf{E}_1 = \begin{bmatrix} -5,11 & 36,02 & -35,17 & -0,065 \\ 6,45 & 0 & 0 & 0 \\ -5,99 & 0 & 0 & 0 \\ -0,63 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Это позволяет привести полиномы расчетной модели ОУ к виду

$$\hat{A}(s) = 1,8 \cdot 10^5 s^2 + 2,26 \cdot 10^6 s + 1,81 \cdot 10^7;$$

$$\hat{B}(s) = s^4 + 22,56s^3 + 228,37s^2 + 917,32s + 246,03,$$

и сформировать новое управляющее устройство с полиномами ПФ

$$\hat{R}(s) = 1,43 \cdot 10^{-2} s^3 + 0,22s^2 + 1,97s + 9,11; \quad (2)$$

$$\hat{C}(s) = s^3 + 82,44s^2 + 56,79s + 2,57 \cdot 10^4.$$

Для практической реализации и проведения экспериментальных исследований робастной САУ ТМ, был использован многоканальный лабораторный стенд Turbo PMAC Clipper (Turbo PMAC2-Eth-Lite). В основе стенда лежит специально разработанный микропроцессорный контроллер движения, реализованный на процессоре DSP 56002 с тактовой частотой 80 МГц, который управляет электроприводами, обрабатывает данные от датчиков и обеспечивает взаимодействие между компонентами САУ при помощи операционной системы реального времени с периодом 0,408 мс.

Синтез цифрового ПР осуществляется на основе его аналогового прототипа (2), с использованием неявного метода Эйлера. В результате разностное уравнение контурной и внеконтурной частей регулятора приобретают вид:

$$y[k] = 2,97y[k-1] - 2,93y[k-2] + 0,97y[k-3] +$$

$$+ 13,95 \cdot 10^{-2} x[k] - 41,77 \cdot 10^{-2} x[k-1] +$$

$$+ 41,69 \cdot 10^{-2} x[k-2] - 13,87 \cdot 10^{-2} x[k-3],$$

$$y_f[k] = (x_f[k] + 5,67 \cdot 10^{18} y_f[k-1] - 8,48 \cdot 10^{18} y_f[k-2] +$$

$$+ 5,64 \cdot 10^{18} y_f[k-3] - 1,47 \cdot 10^{18} y_f[k-4]) / 1,42 \cdot 10^{18},$$

где $x[k]$, $y[k]$ и $x_f[k]$, $y_f[k]$ – входной и выходной дискретные сигналы регулятора и префильтра.

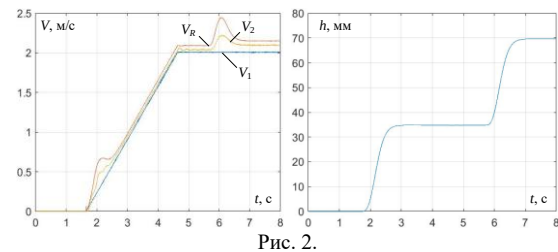


Рис. 2.

Проведенные исследования показали, что робастные свойства системы обеспечиваются при вариации отдельных параметров объекта в диапазоне $\pm 70\%$, чем подтверждается эффективность практического исполнения МС.

1. Тарарыкин, С. В. Оценка степени управляемости и наблюдаемости объекта при синтезе робастных систем управления / С. В. Тарарыкин, А. М. Аббясов // Вестник ИГЭУ. – 2025. – № 2. – С. 69-80.
2. Аббясов, А. М. Синтез робастных линейных стационарных динамических систем на основе улучшения управляемости и наблюдаемости расчетной модели объекта / А. М. Аббясов, А. А. Анисимов, С. В. Тарарыкин // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2023. – № 6. – С. 33-49.
3. Гайдук, А. Р. Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход) / А. Р. Гайдук. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. – 360 с.
4. № 2023687024 РФ. GRAMIAN PR: опубликовано 11.12.2023, Бюл. № 12 / Аббясов А. М., Тарарыкин С. В., Анисимов А. А.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ И НЕЙРОСЕТЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ

Албагачиев А.Ю.¹, Ерофеев М.Н.¹, Яковлева А.П.²

^{1,2}ИМАШ РАН,

²МГТУ им. Н.Э. Баумана Москва, Россия

В работе представлены результаты поиска эффективных методов для прогнозирования результатов комбинированных обрабатывающих технологий с использованием нейросетей. Описан механизм разработки нейросети с учителем, описаны входные данные, выходные данные и структура нейросети. Авторами представлен коэффициент эффективности комбинированных обрабатывающих технологий, его структура и взаимосвязь с входными и выходными данными.

Применение комбинированных обрабатывающих технологий (КОТ) доказало свою эффективность при изготовлении высокотехнологичных деталей [1]. Это подтверждено в трудах большого количества научных школ [1-4].

Однако, разработка и внедрение КОТ бывает трудозатратным и продолжительным во времени, поэтому необходимо искать новые пути для разработки и прогнозирования результатов таких технологий. Положительные результаты в экономике, медицине, приборостроении и др. отраслях, при прогнозировании результатов, дают нейросети (НС) или искусственный интеллект (ИИ) [5].

В машиностроении НС и ИИ позволяют автоматизировать и интеллектуализировать некоторые этапы проектирования технологических процессов. Применение ИИ в разработке технологических процессов уже продемонстрировало существенные преимущества [6, 7]:

- сокращение времени на проектирование ТП в 1,5–2 раза;
- снижение расхода инструмента на 10–15%;
- уменьшение числа корректировок при запуске производства;
- повышение повторяемости и стандартизации процессов.

Целью данной работы является определение эффективных путей снижения трудоемкости при разработке и внедрении КОТ. Решением может быть создание нейросети (НС) и применение искусственного интеллекта (ИИ).

НС могут быть различной архитектуры, например, однослойные, многослойные, рекуррентные [7, 8].

Для решения поставленной задачи выбираем многослойную НС с фиксированным количеством входных нейронов (параметров), обучаемую учителем – обучение предсказанию одного набора данных по другому набору, которая будет иметь следующую архитектуру:

- число входных нейронов;

- число скрытых слоев;
- число входных нейронов;
- активационная функция каждого нейрона;
- веса каждого соединения.

Для нейросетевого управления при изготовлении высокотехнологичных деталей в качестве входных нейронов (параметров) целесообразно использовать:

- название методов обработки, их количество;
- способы воздействия на поверхности заготовки (параллельное или последовательное);
- количество инструментов;
- технологическое назначение;
- характер воздействия (тепловой, механический и др.);
- применяемое оборудование.

Для оценки эффективности КОТ авторами предложено использовать коэффициент эффективности КОТ - K_c (рис. 1). Этот коэффициент будет выходным нейроном (параметром). Коэффициент эффективности КОТ будет иметь 3 основные составляющие:

- результативность (P_1);
- ресурсоемкость (P_2);
- оперативность (O).



Рис. 1. Структура коэффициента эффективности КОТ

Таким образом, $K_3 = P_1 + P_2 + 0$; $0 \leq K_3 \leq 1$.

Число скрытых слоев, при создании НС будем выбирать исходя из рекомендаций [7-9]. И так, НС будет иметь следующий вид (рис. 2):

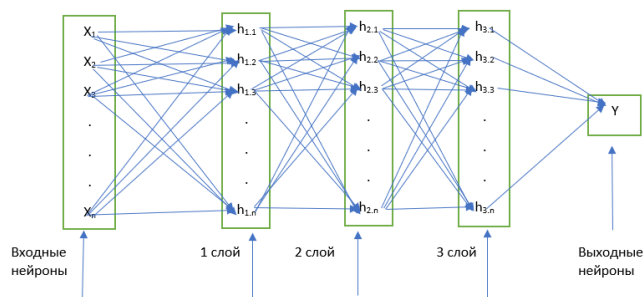


Рис. 2. Общий вид НС с входными и выходными нейронами и скрытыми слоями

Веса в представленной НС будем определять в процессе обучения [9-11]. Веса будут регулировать силу связей между нейронами и определять на сколько сильно они влияют на выходные нейроны.

Веса имеют решающее значение при оценке ошибки (расхождения) между прогнозируемым результатом и фактическим значением [8].

Схема обучения НС представлена на рис.3.

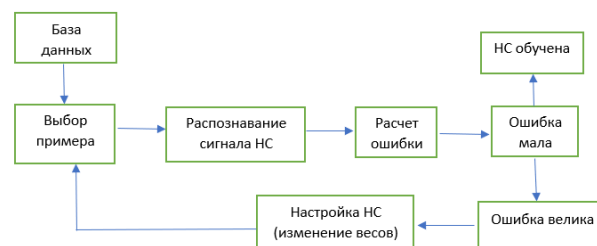


Рис. 3. Схема обучения НС

Для обучения НС необходимо иметь большой объем данных. Для этого авторами разработана методика по анализу и классификации КОТ. На первом этапе проведен анализ всех известных КОТ. Для удобства поиска и анализа информации авторы предлагают использовать таблицу.

Таблица 1. Пример классификации КОТ для поиска и анализа данных

Методы	Точение	Фрезерование	Шлифование	Сверление	Долбление	Зубофрезерование	.	.	.	Лазерная закалка	Плазменная закалка	ЭМО	ППД
Точение	X												
Фрезерование		X											
Шлифование			X										
Сверление				X									
Долбление					X								
Зубофрезерование						X							
.							X						
.								X					
.									X				
Лазерная закалка									X				
Плазменная закалка										X			
ЭМО												X	
ППД													X

Каждое сочетание методов, представленное в таблице, будет рассмотрено в соответствии с анализом литературы и патентным поиском. Будут выявлены входные и выходные нейроны. Часть информации будет использована для обучения НС, а часть для проверки адекватности полученных результатов.

Например, рассмотрим процесс комбинированной обработки – зубофрезерование и ППД. Согласно [12] входными нейронами можно считать:

- зубофрезерование, ППД - 2 метода;
- способ воздействия на поверхности заготовки – последовательный;
- количество инструментов – 2;
- технологическое назначение – повышение нагрузочной способности зубчатых колес (повышение износостойкости);
- характер воздействия – механический;

- оборудование – зубофрезерные станки повышенной точности.

В работе [13, 14] рассмотрен процесс комбинированной обработки – зубофрезерование и зубохонингование. В качестве входных нейронов будем иметь:

- зубофрезерование, зубохонингование – 2 метода;
- способ воздействия на поверхностный слой – последовательный;
- количество инструментов – 2;
- технологическое назначение – повышение нагрузочной способности зубчатых колес (снижение прижогов и термических трещин);
- характер воздействия – механический;
- оборудование – зубофрезерные станки, зубохонинговальные станки нормальной точности.

Анализ исходных данных для всех разработанных КОТ будет занесен в общую базу и затем будут определены коэффициент эффективности КОТ и веса.

Таким образом, в связи с тем, что КОТ имеют много параметров, с сильной нелинейностью и схоластикой — именно здесь ИИ и НС дадут наибольший выигрыш за счёт моделирования «чёрного ящика», адаптивной оптимизации и замкнутого управления.

Современное машиностроение сталкивается с необходимостью повышения эффективности, сокращения затрат и повышения качества продукции. Внедрение НС в разработку технологических процессов предлагает перспективы качественно нового уровня адаптации и планирования.

Использование ИИ в технологической подготовке производства высокотехнологичных деталей машин является ключевым направлением цифровой трансформации машиностроения, авиастроения, космической сферы и т.д. ИИ и НС не заменяют инженера-технолога или научного сотрудника, а выступают инструментарием интеллектуальной поддержки принятия решений, сокращают время разработки и снижают трудоемкость. В перспективе развитие алгоритмов машинного обучения и интеграция с системами промышленного интернета вещей обеспечат создание полностью адаптивных и самообучающихся производственных комплексов.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU- 2024-0023.

1. Сухочев Г. А. Комбинированные процессы повышения качества деталей / Г. А. Сухочев, В. П. Смоленцев // Вибрационные машины и технологии: Сб. науч. тр. Курск: КПИ, 1993. - Вып. 2. - С. 111-117.
2. Управление проектами реформирования промышленности / А. В. Мухин, Г. Э. Ганина, Ю. А. Островский, А. П. Яковлева. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. – 200 с.
3. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки / Е.В. Смоленцев. – М.: Машиностроение, 2005. – 250 с.
4. Албагачиев А.Ю., Ерофеев М.Н., Пухальский В.А., Сидоров И.М. [Цифровой двойник паспортных характеристик машиностроительной продукции](#) // [Известия Тульского государственного университета. Технические науки](#). - 2024.- № 10.- С. 111-115.
5. Крюков М.В., Ерофеев М.Н., Кравченко И.Н. Моделирование технологических параметров и режимов FDM-технологии и свойств изделий с помощью искусственного интеллекта. В книге: Моделирование синтеза и разрушения материалов. тезисы докладов VI Международной научной конференции МСРМ-2023, посвященной 95-летию Национальной академии наук Беларуси и 300-летию Российской академии наук . Минск, 2024. С. 208-215.
6. Складнова М.С., Ерофеев М.Н. [Методы математико-статистического моделирования для анализа процессов трения и износа](#) / В сборнике: Интеллектуальная трибология в машиностроении: BALGT TRIBO 2024. Материалы 1-й Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург, 2024. С. 270-276.
7. Козлов Н. А., Погодин С. В. Применение методов искусственного интеллекта в проектировании технологических процессов машиностроительных производств // Вестник МГТУ им. Баумана. Серия Машиностроение. – 2022. – № 3. – С. 45–56.
8. Дьяконов В. П. Нейронные сети. Полный курс. – М.: ДМК Пресс, 2021. – 520 с.
9. Lee J., Bagheri B., & Kao H.-A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems // Manufacturing Letters. – 2015. – Vol. 3. – P. 18–23.
10. ISO/IEC 22989:2022. Information technology — Artificial intelligence — Concepts and terminology.
11. ISO 23247-1:2021. Automation systems and integration — Digital Twin framework for manufacturing — Part 1: Overview and general principles.
12. Яковлева А.П., Омельченко И.С. [Повышение нагрузочной способности стальных деталей методом комбинированной обработки](#) // [Авиационная промышленность](#).- 2013. -№ 2. -- С. 16.
13. Албагачиев А.Ю., Яковлева А.П., Караванова А.Г. [Повышение качества поверхности блоков шестерен комбинированной отделочной обработкой](#) // [Проблемы машиностроения и надежности машин](#). - 2025. - № 2. - С.
14. Базров Б.М., Ерофеев М.Н., Хейфец М.Л., Гуревич В.Л. Схемы базирования и закрепления предмета в самоцентрирующих механизмах комплектом скрытых баз // [Проблемы машиностроения и автоматизации](#). -2024. -№ 2. - С. 4-11.

ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ НА МОМЕНТ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Албагачиев А.Ю.¹, Карцев И.С.¹

¹Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; johnkarcev@gmail.com

В работе представлена методика численного определения момента вращения инструмента при сварке трением с перемешиванием (FSW) на основе аппроксимации экспериментальных данных степенной зависимостью. Полученные результаты могут быть применены для построения инженерных моделей и прогнозирования режимов сварки.

Цель

Разработка и демонстрация численной методики определения момента вращения инструмента при сварке трением с перемешиванием, обеспечивающей сокращение числа входных параметров в аналитических моделях без потери точности описания процесса.

Материалы и методы

При моделировании процессов сварки трением с перемешиванием важнейшими параметрами являются осевое усилие, температура и момент сопротивления вращению инструмента. Последний характеризует уровень пластической деформации, трения и теплообразования в зоне контакта. Однако в большинстве экспериментальных работ момент определяется только для ограниченного числа режимов, что усложняет использование данных при расчётах температурных полей и напряжённо-деформированного состояния.

Поэтому возникает необходимость в численном восстановлении зависимости момента от частоты вращения и других параметров процесса [1]. Такой подход позволяет получить непрерывную функциональную зависимость и использовать её при построении аналитических и численных моделей FSW, исключая необходимость экспериментальных измерений на каждом режиме.

В качестве исходных данных были оцифрованы экспериментальные значения момента вращения инструмента из работы [7]. В качестве исследуемого материала в работе рассматривался алюминиевый сплав 5052-Н34 (система Al-Mg), широко применяемый в промышленности благодаря сочетанию высокой коррозионной стойкости, хорошей свариваемости и достаточной прочности при умеренной пластичности. По химическому составу и механическим характеристикам данный сплав близок к российским аналогам АМг2, АМг3 и АМг5, регламентируемым стандартами ГОСТ 4784-97 и ГОСТ 21631-76. Основной легирующий элемент магний (около 2.2–2.8 %) обеспечивает повышение прочности без существенного снижения пластичности, что делает сплавы этой группы востребованными в транспортном, судостроительном и авиационном машиностроении.

Выбор сплава 5052-Н34 обусловлен его типичностью для алюминиевых сплавов серии Al-Mg, широко используемых в Российской Федерации. По совокупности механических и тепловых свойств

он адекватно отражает поведение большинства конструкционных алюминиевых сплавов, применяемых в сварке трением с перемешиванием [4]. Таким образом, результаты анализа момента вращения и построенные модели могут быть экстраполированы на аналогичные материалы отечественного производства без значительных методических погрешностей.

Для исследования зависимости момента вращения M от частоты вращения n (об/мин) были оцифрованы экспериментальные точки по данным статьи [7]. Из графика «Figure 4» получены значения, приведенные в таблице 1:

Таблица 1. Зависимости момента от частоты вращения

n (об/мин)	M (Н*м)
693	17,35
965	12,70
1236	10,01
1507	8,31

Данные отражают убывающую зависимость момента от частоты вращения в процессе при сварке трением с перемешиванием. Для описания полученных точек предложено использовать степенную зависимость:

$$M(n) = An^p, \quad (1)$$

где: A , p — коэффициенты, определяемые методом аппроксимации.

Такой выбор функции обусловлен тем, что в процессах пластического деформирования и трения энергетические параметры часто подчиняются степенным законам.

Применение языка программирования Python для численного анализа и аппроксимации экспериментальных данных обусловлено его широкими возможностями в области научных вычислений и инженерного моделирования [2,3]. Python имеет развитую экосистему библиотек — NumPy, SciPy, Matplotlib, Pandas, обеспечивающих эффективную работу с массивами данных, реализацию методов статистического анализа, нелинейной регрессии и визуализацию результатов. В отличие от специализированных пакетов, Python предоставляет открытую и воспроизводимую среду вычислений, что особенно важно при верификации и последующем развитии моделей.

Для нахождения коэффициентов A и p применён метод нелинейной аппроксимации с помощью функции `curve_fit` из библиотеки SciPy (модуль `scipy.optimize`). Функция минимизирует сумму квадратов отклонений между экспериментальными и расчётными значениями:

$$S = \sum_i (M_i - A n_i^p)^2 \quad (2)$$

В результате расчёта для диапазона 700–1500 об/мин получены значения:

$$A = 8,59 \times 10^3, p = -0,949.$$

Данные значения обеспечивают наилучшее совпадение с экспериментальными точками на рассматриваемом диапазоне частот. Полученная зависимость имеет вид:

$$M = 8,59 \times 10^3 \cdot n^{-0,949}. \quad (3)$$

Далее на основе полученной зависимости выполним графическое представление результатов. Построим кривую модели в координатах «момент — частота вращения» и нанесём на тот же график экспериментальные точки, полученные оцифровкой по данным [7].

Такое сопоставление позволяет визуально оценить степень совпадения численных результатов с исходными экспериментальными значениями и определить характер расхождений (Рис 1).

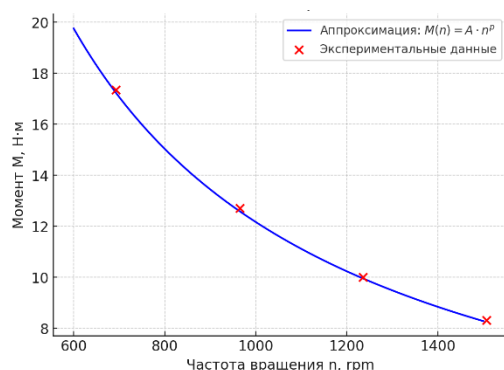


Рис. 1. Зависимость момента от частоты вращения

После графического анализа проведём численную проверку адекватности аппроксимационной модели. Для этого вычислим коэффициент детерминации R^2 , определяемый выражением:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (M_i - M_{\text{расч}})^2}{\sum (M_i - \bar{M})^2} \quad (4)$$

где M_i — экспериментальные значения момента, $M_{\text{расч}}$ — расчётные значения, полученные по модели, $\bar{M}$ — среднее значение момента, составляющее 12,5925 Н*м.

Высокое значение R^2 (близкое к 1) подтверждает

адекватность выбранной модели. На графике видно, что расчётная кривая плавно проходит через все экспериментальные точки, что подтверждает корректность метода.

Таблица 2. Экспериментальные и расчётные значения момента

n (об/мин)	M _i (Н*м)	M _{расч} (Н*м)
693	17,35	17,30837
965	12,70	12,64293
1236	10,01	9,99619
1507	8,31	8,27717

Величина R^2 характеризует долю дисперсии экспериментальных данных, объясняемую моделью, и служит количественным критерием её адекватности.

$$R^2 = 1 - \frac{0,00625892}{46,654475} = 0,9998658. \quad (5)$$

Отклонения менее 0,5% для всех точек, а также значение $R^2 = 0,9$, полученное в ходе расчётов, подтверждает высокую степень соответствия модели экспериментальным данным и свидетельствует о корректности выбора степенной зависимости для описания рассматриваемого процесса.

Практическое применение полученной зависимости заключается в ее использовании при моделировании процессов сварки трением с перемешиванием, что позволяет исключить момент вращения из числа независимых переменных [5,6].

Например, в уравнениях для расчёта тепловыделения или касательных напряжений момент может быть представлен в виде функции частоты вращения:

$$Q = \eta \cdot M(n) \cdot \omega, \quad (6)$$

где Q — тепловой поток, η — коэффициент полезного преобразования механической работы в теплоту, ω — угловая скорость.

Таким образом, изменение режима (частоты вращения) автоматически приводит к корректировке момента и тепловой мощности без необходимости введения дополнительного параметра.

Результаты и их обсуждение

Предложенная методика определения момента вращения инструмента при сварке трением с перемешиванием позволяет с высокой точностью описывать экспериментальные данные и использовать полученную зависимость в инженерных расчётах. Аналитическая форма обеспечивает возможность подстановки момента в уравнения теплового и механического баланса без дополнительных измерений. Таким образом,

количество входных переменных в модели уменьшается, а воспроизводимость расчётов повышается, что делает метод удобным для практического применения при проектировании режимов сварки трением с перемешиванием.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU- 2024-0023.

1. Албагачиев А.Ю. Резонанс при сварке трением с перемешиванием // Справочник. Инженерный журнал. 2025. № 4 (337). С. 33-35.
2. Айдана С. Использование Python для решения научно-технических задач // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2023. – Т. 15. – № 4. – С. 45–53.
3. Голубинский А. Н. Методы аппроксимации экспериментальных данных и построения моделей // Вестник НГТУ. – 2007. – № 3. – С. 22–36.
4. Лукин В.И., Иода Е.Н., Базескин А.В., Жегина И.П., Котельникова Л.В., Овчинников В.В. Сварка трением с перемешиванием высокопрочного алюминивно-литиевого сплава В-1469 // Сварочное производство. — 2012. № 4. (ВИАМ, Москва).
5. Технология сварки трением с перемешиванием алюминиевого сплава / В.Н. Стаценко, М.В. Бернавская. — Вестник Инженерной школы ДВФУ. — 2024. № 2(59). С. 12-20. DOI:10.24866/2227-6858/2024-2/12-20
6. Ghasemi-Hashjin M., Poursalehi R., Mansouri A. A Review on Friction Stir Welding/Processing: Numerical Modeling // Materials. 2023. Vol.16, №17. Art.5890. DOI:10.3390/ma16175890
7. Karen Johanna Quintana; Maria Cindra Fonseca; Jose Luis Silveira / Influence of Pin Shape Geometry on the Torque, Forces, and Residual Stresses in Friction Stir Welding of 5052-H34 Aluminum Alloy // Soldagem & Inspeção. 2022. Journal article DOI: 10.1590/0104-9224/si27.10

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ МЕДИ

Архипов В.Е., Куксенова Л.И., Москвитин Г.В., Козлов Д.А., Пугачев М.С.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; vearkhipov@mail.ru

Проведены исследования структурно-фазового состава газодинамических покрытий на основе меди. Установлено, что покрытия содержат твердые частицы корунда и пластичную матрицу из меди, цинка и их соединений. Результаты трибологических испытаний показали безызносность таких покрытий в условиях граничного трения. Предложен механизм работы газодинамического покрытия на основе меди в паре скольжения.

Во многих изделиях и механизмах используются узлы (подшипники скольжения), в которых вал опирается на опорную поверхность – вкладыш, изготовленный из бронзы, латуни, меди или других цветных металлов. Технология изготовления подшипников скольжения достаточно сложна, а работоспособность и ресурс зависят от многих причин и, в частности, от надёжности крепления вкладышей. Существует множество методов нанесения покрытий меди, например, гальваническое осаждение или с помощью высокоэнергетического воздействия, электроискровое легирование, лазерная обработка [1] все они направлены на повышения износостойкости узлов трения. Использование традиционных методов нанесения цветных металлов на поверхность изделия для создания опорных поверхностей трения может привести к перегреву и изменению свойств детали. Между тем, появились современные технологии, которые позволяют наносить слои металла высокого качества без значительного перегрева подложки и, соответственно, её деформации.

Одним из методов модификации функциональных поверхностей трения является развивающийся метод газодинамического напыления [2,3]. Он позволяет получать покрытия в труднодоступных местах, обладает мобильностью оборудования и перегревает подложку не более 150°C. Напыление покрытия производится из порошковой смеси частиц пластичных металлов и оксида алюминия (корунда), которая вводится в перегретый и разогнанный поток газа воздуха. Сверхзвуковой поток воздуха разгоняет вводимые частицы до высоких скоростей. Летящие с большой скоростью пластичные частицы металла сталкиваются с подложкой и схватываются с ней, а частицы корунда уплотняют схватившейся металл и отлетают прочь. Механические и трибологические свойства получаемого газодинамического покрытия существенно зависят от температуры потока воздуха и времени напыления, а также других параметров напыления. Адгезионная прочность таких покрытий меди может достигать 55 МПа, а когезионная 140 МПа [3].

Значительная пластическая деформация частиц металлов при напылении, а также воздействие температуры влияет на структурно-фазовые превращения в них, что в свою очередь оказывает влияние на триботехнические характеристики

сопряжений скольжения, одного из перспективных направлений применения рассматриваемых покрытий. Поэтому необходимо проведение исследований структуры покрытий и выявления её основных факторов, оказывающих влияние на процессы изнашивания в трибологической паре.

Цель

Исследовать структуру покрытий на основе меди и предложить механизм работы газодинамического покрытия на основе меди в подшипнике скольжения.

Материалы и методы

Для проведения исследований на подложку из стали 40Х наносили три покрытия: покрытие меди, покрытие цинка и покрытие медь-цинк при температуре потока воздуха 270°, 360°, 450°C.

С помощью дифрактометра Rigaku Ultima определяли фазовый состав покрытия. Рентгенофлуоресцентный анализ осуществляли на спектрометре Rigaku Primus. На сканирующем электронном микроскопе FEI «Quanta-650» исследовали морфологию и элементный состав покрытий.

Исследование триботехнических характеристик проводили на трибометре МТ-8 для испытания реверсивных пар трения скольжения. Оценивалась несущая способность пары трения сталь ШХ15 – сталь 40Х с покрытием медь-цинк.

Результаты исследований

Медное покрытие. Покрытие имеет монолитный характер с рельефом, который создает его пористость. На поверхности неравномерно расположены частицы корунда размером не более 5 мкм, они крепко закреплены в матрице и не удаляются при полировке. Такая структура предполагает высокие трибологические свойства покрытия [4].

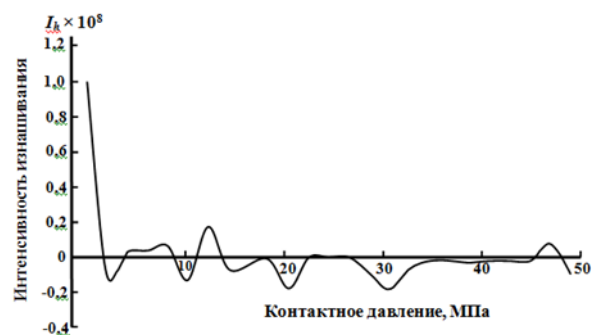
Покрытие цинка. В покрытии присутствуют частицы корунда в десять раз крупнее частиц в покрытии меди, кроме того, они слабо зафиксированы и могут оказывать влияние на фрикционный массоперенос.

Медно-цинковое покрытие. Это покрытие имеет значительно большие поры по сравнению с медным и большую неоднородность по размеру частиц корунда, при этом между частицами и матрицей

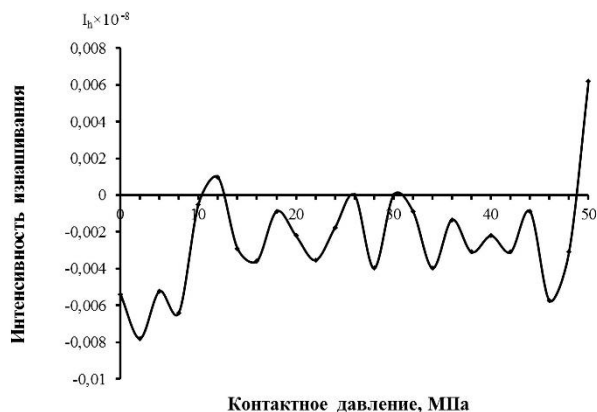
есть пустота, т.е. частицы хуже зафиксированы в покрытии. В покрытии присутствуют фазы, присущие разным латуням [5]. Содержание меди, цинка и их фаз в покрытии зависит от температуры и времени напыления.

Трибологические испытания. В условиях граничного трения в среде индустриального масла И-20А и пластичного смазочного материала Литол-24 покрытие меди, нанесённое при температурах воздуха 270° и 450°, имеют низкую интенсивность изнашивания I_h (покрытия) $\approx (1,1-1,5) \times 10^{-10}$ и I_h (контртела) $\approx (0,3-0,4) \times 10^{-11}$ при смазке маслом И-20А; I_h (покрытия) $\approx (2-5) \times 10^{-10}$ и I_h (контртела) $\approx 0,2 \times 10^{-11}$ при трении в среде Литол-24 [5].

Испытания покрытия медь-цинк полученного при температуре потока воздуха 450°С показали безызносность «рис. 1».



а



б

Рис. 1. Экспериментальные диаграммы зависимости интенсивности изнашивания от контактного давления. Износ: а – покрытия медь-цинк, б – контртела из стали ШХ15

Как описывалось ранее, низкий износ покрытий на основе меди связан с фрикционным массопереносом. Проведенные исследования структурно-фазового состава трех газодинамических покрытий позволяют предложить следующий механизм работы покрытия

на основе меди в подшипниках скольжения. В начале в контакт вступают две псевдоповерхности, первая – покрытие с выступающими частицами корунда, вторая – контртело с вершинами профиля микронеровностей. При нагружении пары и смещении поверхностей относительно друг друга частицы корунда врезаются в вершины микронеровностей контртела на глубину выступающих частиц корунда, остальная часть вершин микронеровностей врежется в поверхность покрытия и срежет слой металла, который остаётся на поверхности контртела, увеличивая его массу. При увеличении пути трения и ступенчатом повышении внешнего давления наиболее выступающие частицы корунда осуществляют обратный перенос на покрытие микрообъёмов меди, а также стальных фрагментов микронеровностей контртела. Эти процессы циклически повторяются при увеличении пути трения.

Выводы

Структура газодинамических покрытий медь, цинк и медь-цинк состоит из двух и более фаз с разными механическими свойствами. В покрытиях содержится корунд, который зафиксирован в менее прочной и пластичной матрице, состоящей из меди, цинка и их сплава.

Трибологические испытания показали высокую износостойкость газодинамических покрытий на основе меди.

Предложен механизм работы исследуемых покрытий в подшипниках скольжения, реализующий фрикционный массоперенос в условиях граничного трения.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0020, FFGU-2024-0021.

1. Архипов В.Е., Куксенова Л.И., Пугачев М.С., Козлов Д.А., Москвитин Г.В. Влияние модифицированных медью поверхностных слоев на работоспособность пар трения скольжения сталь-сталь // Трение и износ, 2023. Т.44. № 4. С. 322-334.
2. Алхимов А.П., Клишков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. М.: ФизМатЛит, 2010. 536 с.
3. Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С. Газодинамическое напыление: структура и свойства покрытий. М.: КРАСАНД, 2017. 240 с.
4. Тушинский Л.И., Потеряев Ю.П. Проблемы материаловедения в трибологии. Новосибирск: НЭТИ, 1991. 64 с.
5. Куксенова Л.И., Архипов В.Е., Пугачев М.С., Козлов Д.А. Структурно-фазовые превращения, массоперенос и триботехнические характеристики газодинамических медно-цинковых покрытий при трении скольжения // Научные технологии в машиностроении. 2025. №2. С.11-22

АВТОМАТИЗАЦИЯ СКЛАДСКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ

Албагачиев А.Ю.¹, Кушнир А.П.¹, Макаров М.А.², Хоменко С.Н.², Огорельцев Р.М.²

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; 89169521579@ya.ru

²Московский технологический университет «РТУ МИРЭА», Москва, Россия

Статья посвящена автоматизации складских технологических операций, в частности, внутрицеховой транспортной логистике. Рассмотрено решение на основе коботов и мобильных транспортных тележек (транспортных роботов). Предложенное решение позволяет автоматизировать складские операции, а также решить вопросы снабжения станков с ЧПУ заготовками и технологической оснасткой.

Цифровизация и автоматизация производства в рамках Индустрии 4.0. добавила такие направления, как интернет вещей, роботизация, цифровые двойники и тени, аддитивные технологии, нейросети, большие данные, облачные вычисления, симуляция динамических систем, искусственный интеллект, киберфизические системы. В настоящее время общество стоит на пороге Индустрии 5.0 или Пятой промышленной революции, в основе которой лежит принцип эффективного сотрудничества людей и машин [1-4], рис 1, 2.

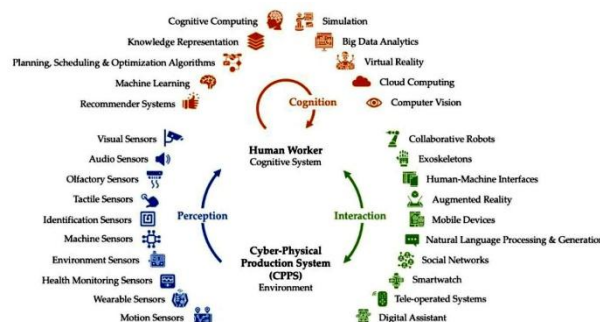


Рис. 1. Этапы промышленной революции



Рис. 2. Сравнительные характеристики Индустрии 4.0 и Индустрии 5.0

На рис. 3 приведены технологические составляющие Индустрии 5.0.



Любая промышленная революция начинается с появлением пакета технологий

Рис. 3. Технологические составляющие Индустрии 5.0

Если основными задачами четвертой промышленной революции были автоматизация производства и повышение эффективности, то в Индустрии 5.0 во главу угла ставятся синергия человека и машины, устойчивое развитие и повышение гибкости производства. В этой связи особую актуальность приобретают вопросы взаимодействия человека и робота, развитие коллаборативных систем.

В качестве таких систем можно рассматривать коллаборативные роботы или коботы, а также мобильные транспортные тележки с искусственным интеллектом серий AMR (автономные мобильные роботы) и AGV (автоматически управляемые тележки).

ИСТОЧНИК: WORLD ROBOTICS REPORT.

Категория	Единиц
Роботы военного назначения	58800
Доильные роботы	28600
Логистические мобильные системы	13300
Роботы медицинского назначения	7800
Роботы для уборки	6650
Системы контроля и наблюдения	4000
Роботы-спасатели	700
Прочие	32525
Всего	152375
Объём (млн долл.)	19600

Рис. 4. Структура мирового рынка профессиональной роботизированной техники

Логистические мобильные системы, рис. 4, представляющие собой комбинацию коботов и мобильных транспортных тележек, объединенных в единую информационную структуру, должны

оптимальным образом взаимодействовать с персоналом предприятия. По конструктивным решениям способа внутрицеховой транспортировки деталей и технологической оснастки, можно выделить следующие основные решения, рис. 5.

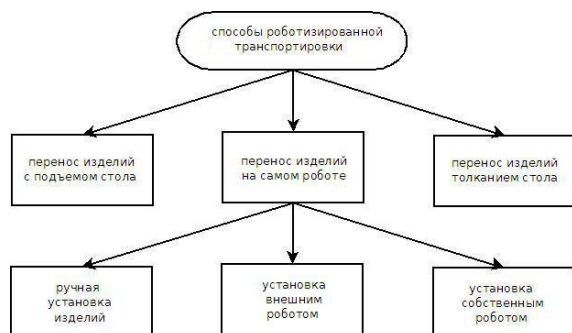


Рис. 5. Способы роботизированной транспортировки

Одним из наиболее перспективных решений является установка деталей, заготовок и технологической оснастки на мобильную транспортную тележку посредством встроенного на ней кобота, рис. 6.



Рис. 6. Мобильные транспортные тележки со встроенными коботами

Мобильный характер транспортной тележки определяет ряд требований, предъявляемых к захватному устройству кобота.

Следует отметить, что из-за значительного усложнения конструкции, требующей наличие источника пониженного давления, применение вакуумных захватов в мобильных устройствах нецелесообразно. Кроме того, данный вид захватов не может быть использован для неплоских заготовок, а также для деталей со сквозными отверстиями.

Магнитные захваты также не всегда могут быть использованы, например, при подъеме деталей, выполненных из немагнитных материалов.

Вследствие этих особенностей можно использовать лишь электромеханические захваты,

лишенные этих недостатков и хорошо сочетаемые по питанию с мобильными коботами.

Вместе с тем электромеханические захваты обычно ориентированы на подъем деталей определенной формы, например плоских или цилиндрических, рис. 7.

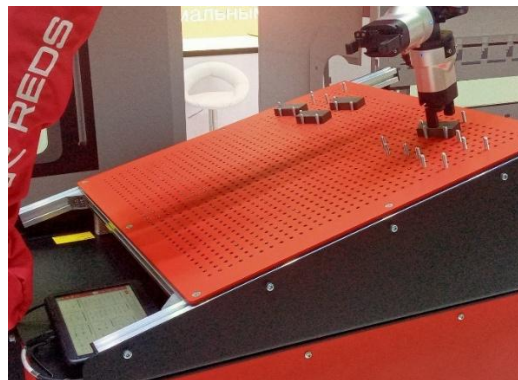


Рис. 7. Стол для заготовок прямоугольной формы

В случае многономенклатурного мелкосерийного производства данный фактор может потребовать использование на коботе нескольких сменных схватов. Соответственно, данное решение усложняет проект и приводит к снижению производительности всей линии из-за необходимости замены элементов оборудования в процессе работы.

Выходом из этой ситуации может быть применение нового универсального захвата конструкции РТУ МИРЭА, способного оперировать как с плоскими перфорированными изделиями, выполненными из немагнитных материалов, так и с деталями цилиндрической и прямоугольной формы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке АО «НПП «Исток» им. Шокина» в рамках выполнения СЧНИР «Исследование возможности создания роботизированной внутрицеховой многофункциональной платформы различного назначения» (шифр СЧ НИР «Платформа-М»).

1. Клаус Шваб. Технологии четвертой промышленной революции. - М.: ЭКСМО. 2018. - 320 с. ISBN 978-5-04-095268-7.
2. Аренс Ю.А., Каткова Н.А., Халимон Е.А., Брикошина И.С. Пятая промышленная революция – инновации в области биотехнологий и нейросетей//E-Management. 2021. Т. 4, № 3. С. 11–19.
3. РБК. Тренды. Что такое Индустрия 5.0 и когда наступит ее эпоха. <https://trends.rbc.ru/trends/industry/665833cf9a79470e99b00d87?> (дата обращения: 09.09.2025).
4. I-SCOOP digital. J-P De Clerck. Industry 5.0 – the essence and reasons why it gets more attention. https://www.i-scoop.eu/industry-4-0/industry-5-0/?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera. (дата обращения: 09.09.2025).
5. Александров В. Р., Азарнов Н. В., Щеткин А. А., Кушнир А. П., Огорельцев Р. М. Квазинечеткое управление автономным мобильным роботом // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2025. № 2. С. 57–67. doi: 10.21685/2307-5538-2025-2-7

ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦЕПНЫХ МУФТ

Албагачиев А.Ю.¹, Сергеев С.А.¹

¹Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; albagachiev@yandex.ru

Излагаются основные задачи оптимального проектирования как цепных муфт в целом, так и их подсистем.

Цепные муфты (ЦМ) являются муфтами общего назначения и широко распространены в различных отраслях машиностроения. Например, число цепных муфт, выпускаемых ежегодно только сельхозмашиностроением, составляет около 1,5 млн. шт. однако срок их службы в большинстве случаев составляет 30–50% ресурса машин [1]. Расширение области использования ЦМ в современных производственных машинах приводит к повышению скорости передачи и увеличению нагрузки на ее детали. При этом выявляются два существенных недостатка муфт: сравнительно низкая эксплуатационная надежность.

Современные ЦМ, например буровых установок [1], представляют собой достаточно сложную техническую систему, состоящую из нескольких подсистем (ПС): приводной цепи, звездочек-полумуфт, смазочных и защитных устройств. Причем наиболее важными ПС являются цепи и звездочки-полумуфты (ЗП). Следовательно, для решения проблемы повышения технического уровня и эффективности использования таких муфт необходимо совершенствовать конструкцию и технологию изготовления цепей и ЗП, располагать научно обоснованными методиками их выбора, нормировать режимы испытаний и эксплуатации ЦМ.

Цепные муфты входят в состав силового привода, который встраивают в ту или иную машину. Тогда структуру математической модели ЦМ, необходимую для ее исследования и проектирования, представим в виде, показанном на рисунке 1.



Рис. 1. Структура математической модели цепной муфты

Здесь модели основных ПС, образующие внутреннюю систему, входят, естественно, в состав ее модели, а силовой привод того или иного исполнительного механизма является внешней системой.

Количество ЦМ и их ПС обусловлено комплексом локальных критериев – выходных показателей, численные значения которых зависят от входных параметров, причем величина одних из этих критериев должна быть максимальной, а других – минимальной. Следовательно, задачи оптимизации конструкции приводной цепи, звездочек-полумуфт и оптимального синтеза ЦМ являются многокритериальными (векторными) и заключаются в следующем: необходимо выбрать такие выходные параметры подсистем, при которых все выходные показатели были бы оптимальными с учетом ограничений, накладываемых при этом на цепь, звездочки и ЦМ в целом [2]. Тогда математическая модель может быть записана в универсальном виде

$$\text{opt}F = \{\max F_1(x), \min F_2(x)\};$$

$$G(x) \leq N; 0 \leq x \leq V,$$

где $F_1(x) = \{f_k(x), K=1, K_1\}$, $F_2(x) = \{f_k(x), K=1, K_2\}$;

$$K_1 \cup K_2 = K,$$

где K – множество индексов критериев.

Чтобы разработать математическую модель для исследования и проектирования ЦМ и их ПС, необходимо располагать входными и выходными параметрами и установить связь между ними в виде целевых функций, а также оценить влияние рассеяния входных параметров на выходные показатели и выявить пути снижения разброса этих показателей. Данные вопросы являются общими как для ЦМ, так и для их ПС.

В работе [3] рассмотрен комплекс основных параметров приводных цепей, причем эти параметры условно разделены на ряд уравнений: самый низкий уровень – входные, а самый высокий – выходные параметры. Показано, что действительные значения входных параметров отличаются от расчетных, принятых за номинальные. Выявлено, что рассеяние значений входных параметров носит случайный характер и обусловлено: во-первых, ограниченностью точности технологического оборудования и оснастки; во-вторых, колебания свойств материала от партии к партии и; в-третьих, несовершенством сборки и контроля. Рассеяние входных параметров определяет разброс выходных показателей [4]. Установлена связь относительных значений этих показателей от входных параметров. Предложенные при этом математические модели позволяют

выявлять долевое влияние каждого из входных параметров на рассеяние выходных характеристик рассматриваемых изделий. Следовательно, полученные зависимости позволяют решать задачи анализа и синтеза приводных цепей. Первая из них заключается в определении границ рассеяния выходных величин изделий по известным входным параметрам, а вторая – в установлении допустимых границ рассеяния входных параметров по нормируемым выходным характеристикам. Кроме того, появляется возможность разработать такую методику контрольных испытаний выходных параметров, которая по значениям этих параметров сигнализировала бы о неполадках в технологическом процессе изготовления цепей.

Звездочки характеризуются рядом параметров. Структурная схема ЗП представлена на рисунке 2, причем ее параметры, как и для рассмотренной выше приводной цепи, условно разделены на три уровня: первый уровень – выходные, второй – промежуточные и третий – входные параметры.

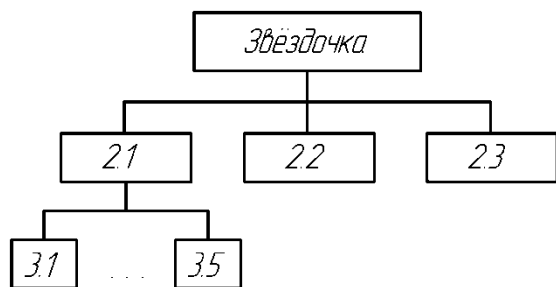


Рис. 2. Структурная схема звездочки

На рисунке 2, начиная со второго уровня, обозначения сложные; первые цифры соответствуют уровню и обозначают: 2 – деталь звездочки, 3 – элементы детали, вторые цифры характеризуют данную составляющую модель. В результате имеем следующие обозначения: 2.1 – венец; 2.2 – центр; 2.3 – их соединение (в большинстве случаев венец выполняют как одно целое с центром).

К входным параметрам ЗП относим величины, определяющие конструкцию и технологию изготовления ее деталей. Применительно к венцу это: 3.1 – геометрическая форма профиля зубьев; 3.2 – размеры зубчатого венца (шаг зубьев, диапазон изменения угла профиля $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$ радиуса кривизны профиля $\rho_{\min} \leq \rho \leq \rho_{\max}$); 3.3 – допуски размеров, формы и расположение поверхностей; 3.4 – марка материала, твердость зубьев и механические характеристики материала венца; 3.5 – шероховатость поверхностей и др.

Промежуточные параметры ЗП – это выходные параметры ее деталей. Применительно к венцу это: суммарные допуски формы и расположения поверхности венца и их осей; контактно-изгибная жесткость зубьев и т.п.

Выходные параметры ЗП – это величины,

позволяющие сравнивать конструкции звездочек между собой, и проявляющиеся факторы при их взаимодействии с приводной цепью. К ним относим: величину контактных напряжений в деталях с учетом числа зубьев звездочки, участвующих в передаче нагрузки; геометрические параметры и материал зубчатого венца; приведенную крутильную жесткость звездочки с учетом способа соединения зубчатого венца с центром и ступицы звездочки с валом; износостойкость зубьев; допустимое увеличение шага цепи из условия обеспечения надежного зацепления ее шарниров с зубьями звездочки; стоимость изготовления звездочки и др.

Разброс входных параметров ЗП имеет также технологический характер, а рассеяние их выходных показателей можно определить с помощью выражений и формул, приведенных в работе [2].

Основные задачи, касающиеся проектирования звездочек ЦМ, рассмотрены в работе [5] и в статье, помещенной в настоящий сборник.

Входные параметры ЦМ – это выходные показатели их ПС.

Промежуточные показатели характеризуют такие величины, которые обусловлены особенностями функционирования ЦМ, в частности, коэффициент динамичности, зависящий прежде всего от внутренней (собственной) динамики муфты и являющийся интегральным критерием качества конструкций приводной цепи и ЗП.

Входные параметры ЦМ разделены на две подгруппы. К первой подгруппе относим те критерии, с помощью которых будем оценивать непосредственно качество выполняемой муфтой работы, т.е. ее функциональные возможности: допустимую нагрузку, КПД, силовое воздействие на валы, точность передачи движения, виброакустические характеристики и т.п.

Во вторую подгруппу объединяем те критерии, которые характеризуют технико-экономические показатели муфты; габариты и массу, трудоемкость изготовления, себестоимость, надежность, затраты на эксплуатацию и т.п.

Рассмотрим теперь одну из важнейших задач проектирования цепных муфт – задачу оптимизации его надежности, причем в настоящей статье ограничимся лишь ее постановкой.

При проектировании цепной муфты как системы обеспечиваем удовлетворение следующего условия:

$$P \geq P^*,$$

где P и P^* – достигнутая и требуемая вероятность безотказной работы муфты.

В противном случае следует повысить показатели надежности позиций из подсистем или хотя бы одной из них (в рассматриваемом случае – как правило, приводной цепи), что потребует дополнительных затрат. При этом возникают следующие оптимизационные задачи:

первая – определение такой вероятности P_i^*

безотказной работы одной подсистемы, при которой возможна минимизация общих затрат ресурсов, т.е. перераспределяем требования к надежности системы между подсистемами при минимальных затратах;

вторая – минимизация расходов ресурсов для достижения требуемого уровня показателя надежности любой подсистемы или системы в целом

$$\sum_{i=1}^n C_i(P_i, P_i^*) \rightarrow \min ;$$

$$P > P^*,$$

где $\sum_{i=1}^n C_i(P_i, P_i^*)$ – дополнительные

затраты для повышения надежности системы с уровня P до P^* ;

третья – максимизация показателей надежности системы при заданных ограничениях на количество имеющихся ресурсов

$$P^* \rightarrow \max;$$

$$\sum_{i=1}^n C_i(P_i, P_i^*) < C,$$

где C – общее количество имеющихся ресурсов.

В процессе проектирования привода достаточно

решить первую и вторую или первую и третью задачи.

Задача определения надежности P_i^* каждой подсистемы с целью обеспечения требуемой надежности P системы при минимальных затратах ресурсов решена методом динамического программирования [5].

Таким образом, проведенный анализ определяет некоторые основные задачи оптимального проектирования цепных муфт как системы, а также приводных целей и звездочек-полумуфт, являющихся их основными подсистемами.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0023

1. Сергеев С.А. Цепные муфты: анализ и синтез / монография. Серия «Современное машиностроение». ТНТ, Старый Оскол. 2011. 392 с.
2. Сергеев С.А., Червяков Л.М., Емельянов И.П. Методология проектирования цепных муфт / монография. LAP LAMBERT Academic Publishing. Серия «Современное машиностроение». Saarbrücken, Germany. 2011. 325 с.
3. Сергеев С.А., Емельянов И.П., Москалев Д.В. Процесс инженерного проектирования // В сборнике: Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации. Материалы VI Международной научно-технической конференции: в 2-х частях. 2008. С. 57-61.
4. Албагачиев А.Ю., Мамедова И.Ю., Соколова М.Л., Милякова Н.Е. Промышленный дизайн и применение принципов универсальности при проектировании технических изделий // Вестник машиностроения. 2017. № 11. С.84-86.
5. Червяков Л.М., Сергеев С.А., Дмитрикова Т.В. // Технология металлов. 2011. № 12. С.45-48.

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦЕПНЫХ МУФТ

Албагачиев А.Ю.¹, Сергеев С.А.¹

¹Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; albagachiev@yandex.ru

Рассмотрены преимущества использования методики автоматизированного проектирования объектов машиностроения, на примере цепных муфт

Автоматизация проектирования обеспечивает целый ряд преимуществ, но лишь некоторые из них поддаются количественной оценке. Частично эффективность САПР достигается за счет неявных факторов улучшения качества работы, получения более содержательной и более полезной информации, совершенствования процесса управления – и все эти факторы трудно выразить в количественной форме. Хотя результат некоторых количественно измеримых факторов проявляется лишь на поздних стадиях, что затрудняет оценку их преимуществ при проектировании, целый ряд статей экономического эффекта от внедрения САПР/АПП измерим непосредственно [1]; к их числу относятся:

1. *Увеличение производительности труда конструкторов.* Всякое увеличение производительности труда конструкторов означает для фирмы повышение конкурентоспособности, поскольку в результате сокращаются потребности в людских ресурсах для выполнения каждого конкретного проекта. Как следствие этого, уменьшаются производственные издержки, увеличивается оперативность выполнения проектов с жестко заданными сроками.

2. *Сокращение длительности циклов производства.* Процесс интерактивного автоматизированного проектирования по своей сути протекает гораздо быстрее, чем при традиционной организации ручного проектирования. С помощью САПР возможно изготовление полного комплекта детализованных чертежей и пояснительных записок к ним в относительно короткие сроки. Благодаря увеличению производительности труда конструкторов, использующих САПР, наблюдается тенденция к сглаживанию критического влияния этапов конструирования, инженерного анализа и изготовления чертежей на общую длительность производственного цикла.

3. *Анализ проектных решений.* При наличии графических средств САПР упрощается процедура внесения изменений в исходные проектные решения и их анализ, создается возможность рассмотрения и сравнения большого числа альтернатив в отведенное на разработку время. Таким образом, САПР обеспечивают лучшее качество проектов.

4. *Повышение точности конструкторских расчетов.* С применением САПР открываются гораздо более широкие возможности для контроля размерных характеристик проектируемых изделий, недостижимые при ручном проектировании. Точность построения криволинейных поверхностей

в трехмерном пространстве, обеспечиваемая САПР, вообще не идет ни в какое сравнение с возможностями ручных методов.

5. *Повышение разборчивости и информативности чертежей.* Средства САПР в одинаковой степени пригодны для построения простых двумерных проекций, изометрии, косоугольных проекций и для постоянного поддержания их в состоянии, точно отражающем ход проектирования. Одинаково просто осуществляется изготовление и обновление чертежей, благодаря чему конструктор всегда может иметь чертеж любого типа, в котором учтены самые последние изменения.

6. *Совершенствование процедур внесения конструкторских изменений.* При наличии средств автоматизации реализация конструкторских изменений и управление процессом внесения изменений значительно облегчаются.

Для построения твердотельной модели цепной муфты были использованы системы автоматизированного проектирования КОМПАС-3D и Solid Works. Для выполнения инженерных расчетов использовалась программа Excel и Borland Delphi.

Программы КОМПАС-3D и Solid Works – системы автоматизированного проектирования Computer Aided Design (САД-системы). Эти системы позволяют проектировать технические изделия с помощью вычислительных машин: разрабатывать чертежи и схемы на базе интерактивной графики, а также выполнять моделирование проектируемого объекта [2].

На представленном рис.1 приведены все этапы конструкторского проектирования.

На первом этапе проектирования уточняется поставленная задача, и определяются свойства, которыми должно обладать изделие [3]. Далее производится выбор кинематических параметров цепных муфт. Кинематический и проектировочный расчеты выполняются с помощью программы Excel. Результатом первого этапа является кинематическая схема привода изделия.

На втором этапе, на основе кинематических характеристик, полученных на первом этапе, производится расчет элементов передающей системы [3]. Для проведения этих инженерных расчетов применяется программа Excel и Borland Delphi. Также могут выполняться проверочные расчеты (на прочность,

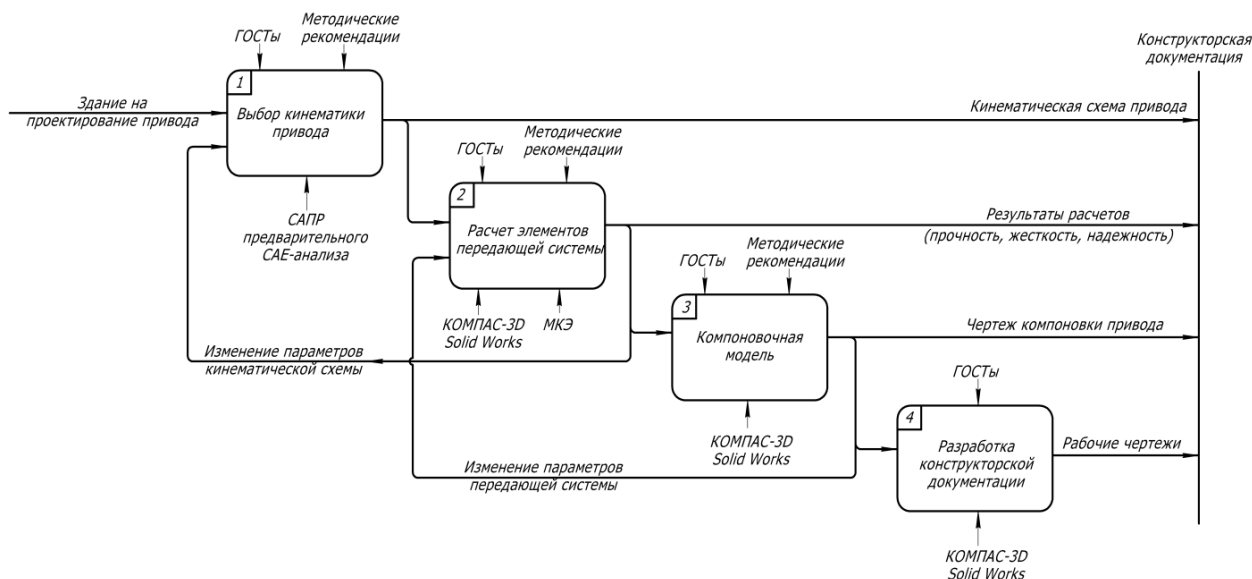


Рис. 1. Функциональная модель конструкторского проектирования

надёжность и т.д.) с применением МКЭ [4].

В зависимости от выбранной CAD-системы моделирование твердотельных элементов может быть как традиционным (КОМПАС-3D), так и параметрическим (Solid Works). Целесообразность

использования параметрического моделирования определяется в каждом конкретном случае отдельно [5]. Более подробно второй этап конструкторского проектирования представлен на рисунке 2.

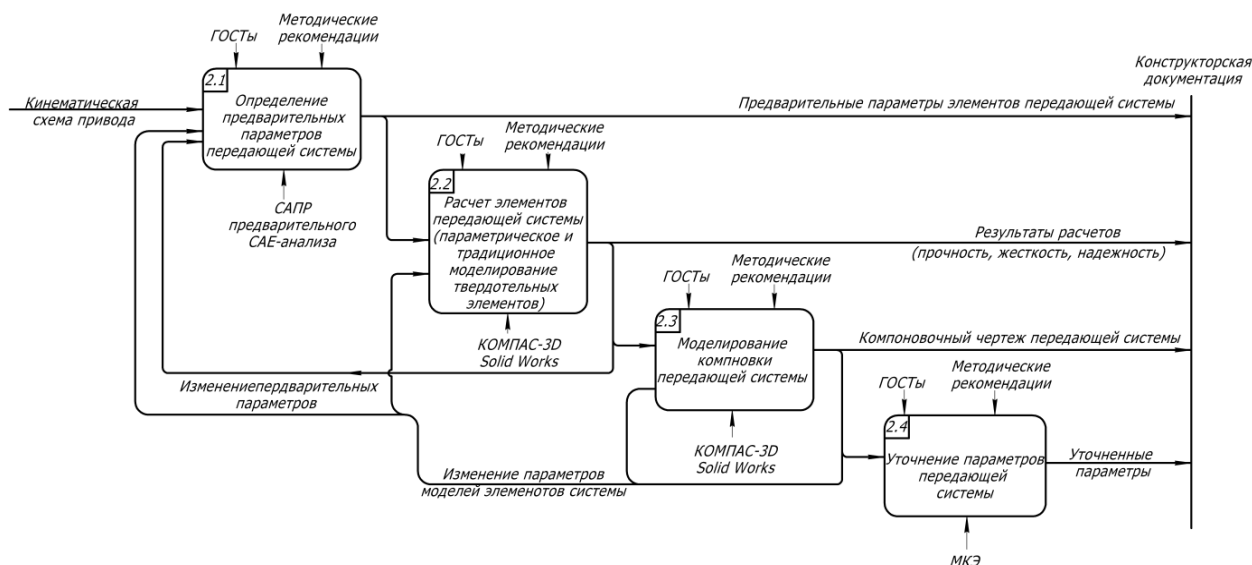


Рис. 2. Расчет элементов передающе системы

На третьем этапе проектирования, на основе кинематических параметров цепной муфты, полученных на первом и втором этапах моделирования, создаётся компоновочная твердотельная модель муфты [3].

Четвёртый этап конструкторского проектирования является заключительным [3]. К нему необходимо приступать, имея готовую твердотельную модель изделия, которая прошла все испытания (т.е. модель отвечает всем требованиям указанных заказчиком, выдержала все проверочные расчёты и достигла своих оптимальных

характеристик). На данном этапе на основе полученной твердотельной модели с помощью CAD-систем производится разработка технической документации изделия.

На рис. 2 видно, что в процессе конструкторского проектирования CAD-системы играют большую роль. Главное достоинство систем автоматизированного проектирования заключается в возможности получения чертежей на основе созданной твердотельной модели изделия. На приведенном ниже рисунке 3 изображена твердо тельная модель машиностроительного объекта

(комбинированной упруго-цепной муфты), полученного с помощью CAD-системы.

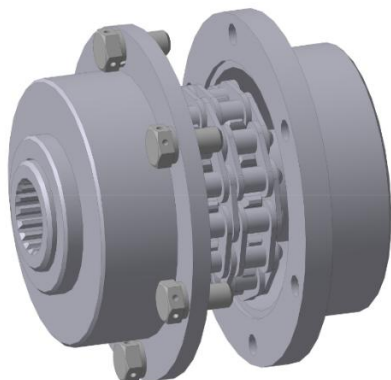


Рис. 3. Твёрдотельная модель упруго-цепной муфты

Таким образом разработана методика последовательного автоматизированного проектирования цепных муфт.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0023

1. Албагачиев А.Ю., Краско А.С., Радайкин Д.А. Необходимость применения автоматизированных систем в 21 веке. Предпосылки появления цифрового производства // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2023. № 2. С.62-74.
2. Цуканов И.Ю., Албагачиев А.Ю. Компьютерное моделирование поверхностей деталей машин с нерегулярными неровностями по параметрическим данным // Конструкторское бюро. 2016. № 1. С.30—39.
3. Сергеев С.А., Емельянов И.П., Москалев Д.В. Процесс инженерного проектирования // В сборнике: Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации. Материалы VI Международной научно-технической конференции: в 2-х частях. 2008. С. 57-61.
4. Сергеев С.А., Червяков Л.М., Емельянов И.П. Методология проектирования цепных муфт / монография. LAP LAMBERT Academic Publishing. Серия «Современное машиностроение». Saarbrücken, Germany. 2011. 325 с.
5. Сергеев С.А., Трубников В.Н., Боев С.Г. Динамика развития цепных муфт // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. 2017. №5. С. 32-37.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАССИВАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ ПАР ТРЕНИЯ

Аноприенко А.К.¹, Гантимиров Б.М.²

¹ Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН; Москва, Россия; anopralex@yandex.ru

² Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН; Москва, Россия

В статье рассмотрено влияния пассивации поверхности — специальной обработки, формирующей защитный слой в результате применения специальных составов и снижающей химическую активность материала — на интенсивность изнашивания пар трения.

Цель исследования - установить, как пассивация поверхности влияет на износостойкость контактирующих элементов, и оценить потенциал этого метода для практического применения.

Введение

В современных условиях эксплуатации машин и механизмов особую актуальность приобретает задача повышения износостойкости деталей, работающих в условиях трения [1]. Одним из перспективных методов решения этой задачи является пассивация поверхности — формирование на металле защитного слоя, снижающего его химическую активность и повышающего коррозионную стойкость. Пассивация — процесс образования на поверхности металла пассивного слоя (оксидной или солевой плёнки), препятствующего дальнейшему взаимодействию материала с агрессивной средой. Механизм защиты заключается в создании почти непроницаемого барьера, тормозящего диффузию коррозионно-активных частиц. К основным методам/способам пассивации относятся: химическая (погружение изделий в кислотные растворы или нанесение пассивирующих составов), электрохимическая (применение электрического тока в электролитическом растворе) и бесхроматная (формирование защитного слоя на поверхности без применения соединений шестивалентного хрома (Cr^{6+})) [2-4]. Преимущества и недостатки каждого из указанных методов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение методов пассивации

	Преимущества	Недостатки
Химическая пассивация хроматическим и растворами	Высокая эффективность, простота реализации	Токсичность хроматов, требования к утилизации отходов
Электрохимическая пассивация	Локальная обработка, быстрое формирование плёнки	Высокая стоимость оборудования
Бесхроматные покрытия (редкоземельные металлы)	Экологичность, сопоставимая с хроматными защита	Требуют оптимизации режимов обработки

Применение тех или иных способов показало, что применение пассивации приводит к снижению износа и уменьшению коэффициента трения [5-7].

Материалы и методы исследования

Исследование проводилось при помощи четырехшариковой машинки трения (ЧМТ) согласно ГОСТ [8]. Основной особенностью конструкции является узел трения в виде пирамиды из четырёх контактирующих шариков: три нижних шарика закреплены неподвижно в чашке с испытуемым смазочным материалом; верхний шарик закреплён в шпинделе и вращается относительно трёх нижних под заданной нагрузкой.

В качестве образцов для испытания на износ были использованы шарики диаметром 12,7 мм, материал сталь ШХ-15. Были проведены испытания как без нанесения пассивирующего вещества на поверхность (исходное состояние), так и с применением химической пассивации. Пассивация проводилась при комнатной температуре с выдержкой предварительно обезжиренных образцов в растворе, содержащем следующие компоненты: азотная кислота (15 %), серная кислота (6 %), плавиковая кислота (3 %), нерастворимые в воде фторидные структуры. Образцы выдерживались при полном погружении в раствор 15 мин с последующей промывкой в проточной воде и сушкой тёплым воздухом при 60–90 °С до полного высыхания.

Нагружение проводилось при наличии смазочного материала при следующих параметрах:

- нагрузка - 100 кгс (980 Н);
- погрешность нагрузки не более ± 1 %;
- продолжительность - 60 мин;
- среда: воздух (22 ± 2 °С, влажность 60 ± 5 %),
- смазочный материал: масло Mobil 10W-40

Результаты и обсуждение

В результате микроскопических исследований выявлено, что диаметры пятен износа на шариках в исходном состоянии и с пассивацией поверхности практически идентичны. На образцах без пассивации присутствуют глубокие царапины и вырывы металла (рис. 1), на пассивированных образцах – менее выраженные следы абразивного воздействия, отсутствие макроскопических вырывов, границы пятна износа четкие (рис. 2).

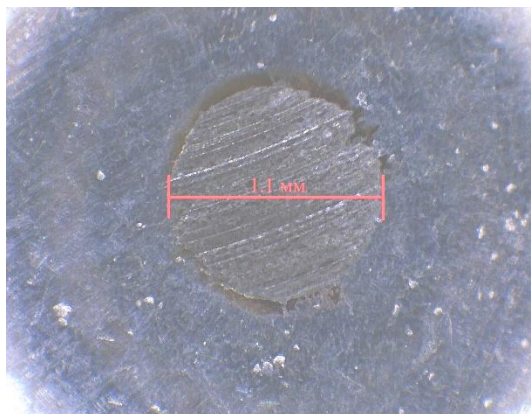


Рисунок 1. Образец без пассивированного слоя (исходное состояние)



Рисунок 2. Образец после пассивации поверхности

Пассивация позволяет достичь на поверхности металлов защитной плёнки, что значительно повышает твёрдость поверхности и снижает адгезионное взаимодействие в зоне трения, что особенно важно для деталей, работающих в условиях износа.

Заключение

Применение химической пассивации поверхности хромированных шариков из стали ШХ15 продемонстрировало положительный эффект: интенсивность износа снизилась на 5%. Это подтверждает, что формирование пассивного слоя (оксидной или солевой плёнки) эффективно снижает химическую активность металла, тормозит диффузию коррозионно-активных частиц и уменьшает адгезионное взаимодействие в зоне трения. Хотя достигнутое снижение износа относительно невелико, оно свидетельствует о работоспособности метода и открывает возможности для его оптимизации — например, за счёт корректировки состава раствора, времени обработки или сочетания с другими технологиями поверхностного упрочнения. В целом, химическая пассивация может стать экономически целесообразным способом повышения ресурса деталей, работающих в условиях трения (подшипников, роликов и т.п.), особенно при дальнейшей доработке процесса и контроле

качества формируемого защитного слоя. Можно говорить о том, что данный метод будет актуален для операций с высокими скоростями резания и применением СОЖ, где критично сочетание коррозионной стойкости и механической прочности.

Финансирование работы

Данное исследование было частично проведено в связи с доведением РТУ МИРЭА Государственного задания № 075-00701-24-07 от 03.04.2024г. и заключением дополнительного соглашения к Соглашению о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от 05.04.2024г. №075-03-2024-077/8 по теме "Исследование методов пассивации поверхностей в процессах механической обработки и эксплуатации" (шифр "Наука").

1. Трибологические противоизносные покрытия / Албагачиев А.Ю., Ставровский М.Е., Сидоров М.И. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. - № 1. - С. 73-82.
2. Пассивация черных и цветных металлов / Тихомирова С.А., Григорян Н.С., Абрашов А.А., Смирнов К.Н., Ваграмян Т.А. // Успехи в химии и химической технологии. 2015. - Т. 29. - № 3 (162). - С. 51-52.
3. Нырклов Н.П., Шувалов Д.А. Бесхроматные способы пассивации металлических покрытий // Вестник науки, 2020 - №1 (22) том 3. - С. 170 - 175.
4. Бесхроматная пассивация цинковых поверхностей в растворах на основе соединений редкоземельных металлов / А. А. Абрашов [и др.] // Современные электрохимические технологии и оборудование - 2019 : материалы Международной научно-технической конференции, Минск, 13-17 мая 2019 г. - Минск : БГТУ, 2019. - С. 100-103.
5. Алибекова, Е. В. Коррозия и защита металлов : учебное пособие / Е. В. Алибекова, С. Я. Алибеков, Н. Г. Крашенинникова. - Йошкар-Ола : Поволжский государственный технологический университет, 2022. - 468 с.
6. Константинов, В. М. Влияние пассивационной обработки на эксплуатационные свойства цинковых диффузионных слоев / В. М. Константинов, И. А. Булойчик // Современные технологии для заготовительного производства [Электронный ресурс] : сборник научных работ Республиканской научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов МТФ БНТУ (проводится в рамках 74-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных работников, докторантов и аспирантов БНТУ), 14 апреля 2021 г. / сост. А. П. Бежок. – Минск : БНТУ, 2021. – С. 29-31.
7. Чукарев Б. Влияние покрытия на основе Cu-Mo-S и окружающей среды на износ медной пары трения : магистерская диссертация / Б. Чукарев ; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Инженерная школа новых производственных технологий (ИШНПТ), Отделение материаловедения (ОМ) ; науч. рук. В. П. Сергеев. — Томск, 2020.
8. ГОСТ 9490-75 «Материалы смазочные жидкие и пластичные. Метод определения трибологических характеристик на четырёхшариковой машине»
9. ГОСТ 9.106-2021 «Единая система защиты от коррозии и старения. Коррозия металлов. Термины и определения»

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО МЕДНО-ЦИНКОВОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ТИПА «ЛАТУНЬ»

Архипов В.Е., Москвитин Г.В., Пугачев М.С.

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; vearkhipov@mail.ru

Проведены исследования влияния технологических режимов напыления газодинамического покрытия медь-цинк на его структурно-фазовый состав. Установлено, что в покрытии формируются фазы, присущие латуням различного состава и их массовая доля зависит от температуры напыления. Получение сплошного покрытия на плоскости со смещением напыляющего сопла 2 мм приводит к образованию γ и β' -фаз из-за значительной пластической деформации металлов при напылении. При температуре напыления 270°C на структуру покрытия основное влияние оказывает межграницная диффузия за счет величины областей когерентного рассеивания.

Многие механизмы не вырабатывают ресурс и выходят из эксплуатации из-за механического износа и воздействия коррозионной среды. Применение традиционных методов наплавки или газопламенных технологий при восстановлении изношенных поверхностей деталей и корпусных изделий не всегда обеспечивает необходимый комплекс физико-механических характеристик. Поэтому, исследование новых методов нанесения на поверхность изделий металлов, обладающих хорошими характеристиками, является актуальной задачей. К одному из современных и наиболее перспективных способов изменения свойств поверхности можно отнести газодинамическое напыление покрытий. К основным преимуществам способа можно отнести возможность нанесения металлов специального назначения на локальные участки поверхности детали или конструкции и минимальный разогрев подложки не более 150°C, в результате чего не происходит изменение свойств и геометрии изделия. Адгезионная прочность таких покрытий меди может достигать 55 МПа, а когезионная 140 МПа [1]. Рассматриваемые покрытия на основе цинка, а также композиций из цинка, меди и никеля в разном сочетании при нанесении на железоуглеродистые сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью в среде слабого электролита [2]. Трибологические испытания покрытия меди в условиях граничного трения в среде индустриального масла И-20А и пластичного смазочного материала Литол-24 показали низкую интенсивность изнашивания I_h (покрытия) $\approx (1,1-1,5) \times 10^{-10}$ и I_h (контртела) $\approx (0,3-0,4) \times 10^{-11}$ при смазке маслом И-20А; I_h (покрытия) $\approx (2-5) \times 10^{-10}$ и I_h (контртела) $\approx 0,2 \times 10^{-11}$ при трении в среде Литол-24 [3]. Испытания покрытия медь-цинк полученного при температуре потока воздуха 450°C также в условиях граничного трения в среде индустриального масла И-20А в паре с контртелом из стали ШХ15 показали его безызносность до контактных давлений в 50 МПа [4]. Металлофизические методы исследования покрытий, нанесенных методом холодного газодинамического напыления смеси частиц меди, цинка и оксида алюминия (корунда) в диапазоне температур 270° - 450°, позволили выявить диффузию меди в частицы цинка в процессе

напыления с формированием фаз, присущих латуням от твердого раствора цинка в меди с разной концентраций цинка (α – фаза) до твердого раствора меди в цинке (η – фаза), в результате чего формируется много компонентная градиентная структура покрытия типа «латуни» [5].

Цель

Исследовать структуру покрытия медь - цинк и оценить влияние на неё температуры напыляющего потока воздуха и времени напыления.

Материалы и методы

Для проведения исследований на подложку из стали 40Х наносили покрытие медь-цинк при температуре потока воздуха 270, 360, 450, 540°C.

В процессе получения сплошного покрытия напыляющее сопло смещалось на 2 и 3 мм относительно ранее нанесенного слоя «табл. 1». Толщина покрытия регулировалась количеством нанесения покрытий друг на друга, т.е. количеством циклов и составляла 3 цикла напыления. Время нанесения покрытия зависит от величины смещения сопла и количества циклов нанесения покрытия.

С помощью дифрактометра Rigaku Ultima определяли фазовый состав покрытия. Рентгенофлуоресцентный анализ осуществляли на спектрометре Rigaku Primus. На сканирующем электронном микроскопе FEI «Quanta-650» исследовали морфологию и элементный состав покрытий.

Таблица 1. Характеристики процесса напыления

Смещение сопла, мм	Кэф. пер., %	Поверхность мм ² , подвергаемая воздействию частиц, раз		
		1 (площадь)	2 (площадь)	3 (площадь)
2	64	20	90	115
3	55	52	173	-

Результаты исследований

При напылении покрытия металлы, осевшие на поверхности подложки подвергаются ударам твердых частиц корунда, которые формируют в них микродеформации релаксирующие при их нагреве и стимулирующие процесс диффузии меди в цинк [6]. Смещение сопла на 2 и 3 мм образует в структуре

покрытия ε – фазу, содержание которой увеличивается с ростом температуры напыления приблизительно на 10% «табл. 2». При смещении 2 мм дополнительно образуются γ и β' фазы с массовыми долями 17 и 1 % соответственно, наличие таких фаз свидетельствует об образовании покрытия по составу, близкому к латуням.

Таблица 2. Рентгеноструктурный фазовый анализ покрытия

Т°С/ сместе- нение, мм	Массовая доля металлов и фаз, %				
	Cu	Zn	ε -фаза	γ -фаза	β' -фаза
270/2	87,9	1,44	5,3	-	-
270/3	83,8	1,3	8,5	-	-
360/2	62,0	7,9	7,9	17,0±2,0	-
360/3	69,0±0,8	12,6±0,6	10,4±0,5	-	-
450/2	46,6	30,1	10,8	5,6±1,1	-
450/3	40,3±0,8	27,0±0,6	15,1 ±0,8	-	-
540/2	45,0	30,8	12,9	-	1,0±1,3
540/3	41,6±0,7	28,6 ±0,8	15,6 ±0,8	-	-

Период решетки цинка при всех температурах напыления значительно больше исходного периода, что объясняется наличием внедренных межузловых атомов в результате ударного воздействия корунда. Минимальная температура напыления не изменяет механические свойства металлов. При температуре напыления 360° величина микродеформаций при смещении сопла на 2 мм больше (0,149 %), чем при смещении на 3 мм (0,129 %), это можно объяснить как достижение более высокой степени деформации от ударов корунда по частицам меди при смещении сопла на 2 мм. Увеличение температуры напыления приводит к еще более высокому росту микродеформаций и стимулирует диффузию в приграничной зоне. При максимальной температуре микродеформации снижаются из-за существенного изменения механических свойств металлов и более «мягким» характером взаимодействия частиц.

Выводы

Газодинамическое покрытие медь-цинк является

многокомпонентным покрытием типа «латуни», т.к. при напылении в его структуре из-за процессов диффузии формируются ε , γ , β' фазы твердого раствора электронного типа, присущих латуням.

Рост температуры напыления с 270° до 540° сопровождается увеличением массовой доли ε – фазы с 5,3 % до 15,6 %, а смещение сопла на 2 мм способствует формированию γ – и β' – фаз с массовой долей до 17,0 % и 1 %, что связано с дополнительным воздействием потока частиц корунда и деформацией частиц металлов.

Значения микродеформаций продуктов превращения - ε до 0,24 %, γ до 0,304 % и β' до 0,207 % связаны с превращениями в самих фазах.

Меняя технологические параметры газодинамического напыления покрытия медь-цинк можно существенно изменять его структурно-фазовый состав и получать функциональные поверхности с заданными свойствами.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0020.

1. Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С. Газодинамическое напыление: структура и свойства покрытий. М.: КРАСАНД, 2017. 240 с.
2. Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С., Широкова Н.В. Основные свойства газодинамических покрытий // Вестник машиностроения. 2017. №1. С. 75-79.
3. Куксенова Л.И., Архипов В.Е., Пугачев М.С., Козлов Д.А. Структурно-фазовые превращения, массоперенос и триботехнические характеристики газодинамических медно-цинковых покрытий при трении скольжения // Научные технологии в машиностроении. 2025. №2. С.11-22.
4. Архипов В.Е., Куксенова Л.И., Пугачев М.С., Козлов Д.А., Москвитин Г.В. Влияние модифицированных медью поверхностных слоев на работоспособность пар трения скольжения сталь – сталь // Трение и износ. 2023. Т. 44, № 4. С. 322–335.
5. Winnicki M., Baszczuk A., Jasierski M. Experimental study on aluminium bronze coatings fabricated by low pressure cold spraying and subsequent heat treatment // Surface and Coatings Technology. 2023. 456. 129260. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129260>.
6. Еремеев В.С. Диффузия и напряжения. М.: Энергоатомиздат, 1984. 182 с

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ЛЕТУЧИХ ИНГИБИТОРОВ КОРРОЗИИ

Барчукова А.С.^{1,2} Ветрова С.М.²

[*techmash@rgau-msha.ru](mailto:techmash@rgau-msha.ru)

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», Москва, Российская Федерация

² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

В работе было определено, что при электрохимическом исследовании в 0,1М растворе хлорида натрия наилучшие защитные свойства наблюдаются при использовании ингибитора на основе продукта взаимодействия этаноламина и борной кислоты в мольном соотношении 3:1, а именно, три(аминоэтил)бората.

Оптимальная концентрация ингибитора на стальных поверхностях при ускоренных испытаниях в среде с относительной влажностью 100% воздуха составляет 200 г/м³.

Введение

Высокую антикоррозионную активность по отношению к черным и цветным металлам показали аминоспирты. Антикоррозионное действие таких производных спиртов можно объяснить образованием комплексных соединений между гетероатомами (азотом или кислородом) и ионом металла. При использовании борных эфиров аминоспиртов возможно также получение прочных хелатных комплексов, что приводит к появлению на поверхности металла труднорастворимых защитных пленок, образуемой посредством донорно-акцепторной связи между атомами азота и кислорода с одной стороны и атомом металла с другой

Материалы и методы

Измерение поляризационной кривой потенциометрическим методом проводили на электрохимическом приборе Autolab Metrohm PGSTAT302N с 3-электродной системой: рабочий электрод из исследуемого материала (сталь Ст3), Электродом сравнения служил хлорсеребряный электрод, помещенный в капилляр Габера-Луггина, противоэлектрод – из нержавеющей стали. В качестве фонового раствора использовался 0,1 М раствор NaCl. Диапазон сканирующего потенциала составляет от -0,5 В до +0,5 В, рассчитанный по хлорсеребряному электроду сравнения, скорость сканирования составляет 0,25 В/с, время погружения образца перед измерением составляет 300 секунд, регламентируется ГОСТ 9.509-89. Температура во всех измерениях была постоянной $t = 25^{\circ}\text{C}$. Параметры коррозии стали Ст3 рассчитываются методом тафелевской экстраполяции с использованием программным обеспечением NOVA 2.1. Испытательные пластинки из стали Ст3 с площадью поверхности $[(50,0 \times 50,0) \pm 0,2]$ мм, толщиной 3,0-3,5 мм зачищали наждачной бумагой, промывали в спирте, ацетоне и высушивали. Образцы подвешивали вертикально на штативах из нержавеющей стали так, чтобы расстояние между ними составляло не менее 10 мм и не менее 100 мм от дна банки, а

испытательный штатив помещали в банку-эксикатор с плотной крышкой.

Образцы ингибиторов коррозии ЛИК, помещали в стеклянном стакане (концентрация ингибитора в резервуаре составила 100, 200 и 300 г/м³). Испытательный сосуд с ингибитором коррозии выдерживали в течение 3 дней при комнатной температуре, чтобы обеспечивать полную адсорбцию ингибитора коррозии на поверхности испытуемых образцов. Контрольные образцы были обработаны аналогично образцам с ингибитором коррозии, но в сосуд с ингибитором не помещались.

Результаты и обсуждения

По результатам проведенных электрохимических и ускоренных испытаний были рассчитаны скорость коррозии, степень защиты и коэффициент торможения.

Результаты электрохимических исследований

Сравнение защитной способности различных ингибиторов

Для сравнения защитной способности ингибиторов электрохимическим методом были взяты образцы ингибиторов ЭА, V2, V3 в одной концентрации 2,0% в фоновом 0,1 М растворе NaCl. Результаты исследования представлены в таблице 1.

Потенциометрическое исследование показало, что присутствие в 0,1 М растворе NaCl ингибитора ускоряют катодную и сильно замедляют анодную реакцию, потенциал коррозии смещается при этом в положительную сторону. Таким образом, ингибиторы ЭА, V2, V3 по характеру защитного действия являются соответственно анодными. Наблюдаемый синергетический эффект ингибиторов можно объяснить воздействием их на анодные участки. Анодные ингибиторы, являются донором электронов по отношению к металлу, уменьшают энергию выхода электрона из металла. Данный ингибитор образует хемосорбционные соединения прежде всего на положительно заряженных электроноакцепторных участках, т.е. на анодных участках корродирующего металла. Ингибирование коррозии увеличивается в порядке ЭА < V2 < V3. Лучшее торможение процесса

коррозии происходит при использовании ингибитора V3, что согласуется с ускоренными опытами. Как видно из поляризационных кривых, такой ингибитор значительно смещает потенциал коррозии в положительную сторону ($\Delta E_{\text{corr}} = 350\text{mV}$) по сравнению с E_{corr} в фоновом растворе.

Исследования защитной способности ингибитора V3 при различных концентрациях

Для исследования были взяты ингибитор V3 в диапазоне концентрации $0,5 \div 3,0\%$ в 0.1M фоновом растворе NaCl.

Заключение

Потенциометрическое исследование показало, что присутствие в $0,1\text{M}$ растворе NaCl ингибитора V3 в диапазоне концентрации $0,5 \div 3,0\%$ ускоряют катодную и замедляют анодную реакцию, потенциал коррозии смещается при этом в положительную сторону. Максимальный защитный эффект $75,59\%$ достигается при концентрации V3 2% .

1. Y. Guo, A. Rogov, A. Hird, B. Mingo, A. Matthews, A. Yerokhin, Plasma electrolytic oxidation of magnesium by sawtooth pulse current, *Surf. Coat. Technol.*, 2022, **429**, 127938. doi: [10.1016/j.surfcoat.2021.127938](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127938)
2. A.A. Al-Amiery, A.Y.I. Rubaye, A.A.H. Kadhum and W.K. Al-Azzawi, Thiosemicarbazide and its derivatives as promising corrosion inhibitors: a mini-review, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2023, **12**, no. 2, 597-620. doi: [10.17675/2305-6894-2023-12-2-12](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-2-12)
3. S. Abdulhadi, A. Mohammed, W.K. Al-Azzawi, T. Gaaz, A.A.H. Kadhum, L.M. Shaker and A.A. Al-Amiery, The corrosion inhibition abilities of PVA and PVP against the corrosion of mild steel in hydrochloric acid, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2023, **12**, no. 2, 645-663. doi: [10.17675/2305-6894-2023-12-2-14](https://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-2-14)
4. V.I. Levashova, I.V. Yangirova, E.V. Kazakova, Обзор ингибиторов коррозии на основе борорганических соединений, *Современные проблемы науки и образования*, 2014, № 6, с. 21.
5. С.М. Гайдар, В.Е. Коноплев, Д.И. Петровский, И.А. Посулько, А.М. Пикина, Исследование синергетического эффекта контактных ингибиторов анодного и катодного действия при защите стали от коррозии, *Коррозия: материалы, защита*, 2021, № 12, с. 10-14. doi: [10.31044/1813-7016-2021-0-12-10-14](https://doi.org/10.31044/1813-7016-2021-0-12-10-14)

ОЦЕНКА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИЭФИРИМИДА МОДИФИЦИРОВАННОГО РАЗЛИЧНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ

Бирюков В. П., Горюнов Я. А., Якубовский А.А.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; laser-52@yandex.ru

В данной работе проводилась оценка триботехнических характеристик исходного и модифицированного полиэфиримида в паре со сталью. Установлено, что образцы, модифицированные стекловолокном, демонстрировали наибольшую стойкость к заеданию при этом наибольшая стойкость к абразивному износу была у исходного полиэфиримида. Главным механизмом изнашивания исходного полимера являлось микрорезание. Основным механизмом изнашивания композитов было усталостное изнашивание и частично микрорезание за счет отделившихся волокон

Цель

Целью данной работы являлось определение зависимости давления заедания, анализ морфологии поверхностей трения и абразивной стойкости образцов исходного и модифицированного полиэфиримида.

Введение

Полиэфиримид (ПЭИ) – это термопластичный аморфный полимер, применяющийся при изготовлении различных уплотнений, подшипников скольжения и крыльчатках. Отрицательными чертами ПЭИ являются высокий коэффициент трения и низкая износостойкость, что ограничивает их применение для пар трения. Одним из способов повышения триботехнических характеристик является модифицирование матрицы различными добавками – компаундами (стекловолокно, углеволокно, политетрафторэтилен, дисульфид молибдена, графит и др.).

Трибологические характеристики образцов композитов с размерами $20 \times 6 \times 10$ мм на основе ПЭИ [1] (1350 кг/м^3), наполненных 5–20 мас. % политетрафторэтиленом (ПТФЭ) (2100 кг/м^3), были определены на испытательном стенде с применением схемы: «колодка (полимер, композит) – ролик (сталь)». Испытания проходили при нагрузке 98,1 Н и скорости скольжения 0,84 м/с в течение 30 минут. Ролик, диаметром 40 мм, был изготовлен из стали ANSI 440C. По завершении испытаний установлено, что наименьшим коэффициентом трения 0,25 обладали образцы, наполненные 20 мас. % ПТФЭ, что в 1,8 раз ниже, чем у исходного ПЭИ 0,45. При этом минимальную удельную интенсивность изнашивания $2 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Нм}$ показывали образцы, наполненные 10 мас. % ПТФЭ, что в 7,6 раз меньше, чем у образцов исходного ПЭИ $15,2 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Нм}$.

В работе [2] проведено исследование на определение триботехнических характеристик композитных образцов с размерами $4 \times 5 \times 10$ мм на основе ПЭИ. Перед испытаниями образцы разделили на несколько групп. В первую группу входили образцы армированные 10 об. % короткими углеродными волокнами (SCF) ($1,6 \text{ г/см}^3$), длиной 90 и диаметром 14,5 мкм, и 15 об. % частицами графита (Гр) (20 мкм, $2,25 \text{ г/см}^3$) (ПЭИ+SCF+Гр). Во второй группе находились образцы армированные

10 об. % SCF и 15 об. % Гр с добавлением 5 об. % частиц оксида титана (TiO_2) (0,3 мкм, $4,05 \text{ г/см}^3$). В третью группу входили образцы модифицированные 10 об. % SCF и 15 об. % Гр с добавлением 5 об. % частиц силиката кальция (CaSiO_3) (2,5 мкм, $2,85 \text{ г/см}^3$). В четвертой группе размер частиц CaSiO_3 составлял 3,5 мкм. Испытания для определения триботехнических характеристик проходили по схеме: «палец (композит) – диск (сталь)» при давлении 2 МПа и скорости скольжения 1 м/с. Диск был изготовлен из стали 100Cr6 (62 HRC). По завершении испытаний получено, что наименьший коэффициент трения 0,18 наблюдался у образцов из группы 3, что в 1,94 раза ниже, чем у образцов из группы 1 0,35. Минимальная удельная интенсивность изнашивания $2,02 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/\text{Нм}$ выявлена у образцов из группы 4, что в 2,65 раз меньше, чем у образцов из группы 1 $5,36 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/\text{Нм}$.

Композитные образцы на основе ПЭИ [3] были выбраны для определения триботехнических характеристик. Перед испытаниями образцы разделили на две группы. В первую группу входили образцы армированные 10 об. % ПТФЭ ($1,31 \text{ г/см}^3$). Во второй группе находились образцы армированные 10 мас. % ПТФЭ и модифицированные 5 об. % циркониевым вольфрамом (ZT). Испытания для определения триботехнических характеристик проводились по схеме: «шар (сталь) – диск (композит)» при нагрузке 5 Н и скорости скольжения 0,3 м/с. Шар, диаметром 6 мм, был изготовлен из стали AISI 52100 (60 HRC). Путь трения составил 1 км. По результатам испытаний самый низкий коэффициент трения 0,052 был замечен у образцов из группы 1, что в 2,26 раз ниже, чем у образцов из группы 2 0,118. Минимальная удельная интенсивность изнашивания $0,8 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Нм}$ также наблюдалась у образцов из группы 1, что в 1,56 раз меньше, чем у образцов из группы 2 $1,25 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Нм}$.

Материалы и методы

Образцы диаметром 25 и высотой 15 мм были изготовлены из ПЭИ (ZX410) и его композитов с углеродным (ZX410VMT) и стекловолокнистым наполнением (ZX410GF30). Для проведения экспериментов на износостойкость и задиростойкость образцов была выбрана машина

трения с вертикальной осью вращения. Испытания для определения зависимости давления заедания от скорости скольжения проводились по схеме: «торец стальной вращающейся втулки – плоская поверхность неподвижного образца полимера, композита» в среде гидравлического масла МГЕ-10А. В качестве основных режимов были выбраны давление на поверхность полимерного образца 2,2–9,0 МПа и скорость скольжения стального контробразца 0,09–1,0 м/с. Давление и скорость скольжения изменялись ступенчато, увеличиваясь от минимальных до максимальных значений. Испытания для определения абразивной стойкости проходили по схеме: «торец кольцевой оправки с наклеенной наждачной бумагой – плоская поверхность образца полимера, композита» при постоянных нагрузке 2,2 МПа и скорости скольжения 0,09 м/с.

Результаты и обсуждения

На рис. 1 приведен график критических давлений заедания от скорости скольжения образцов полиэфиримида. Образцы ZX410VMT демонстрировали чуть меньшую стойкость к задирам по сравнению с образцами ZX410GF30. Минимальная задиростойкость наблюдалась у образцов ZX410. Исследование морфологии поверхностей трения полимерных образцов выявило, что главным механизмом изнашивания являлось усталостное изнашивание и частично микрорезание за счет отделившихся волокон.

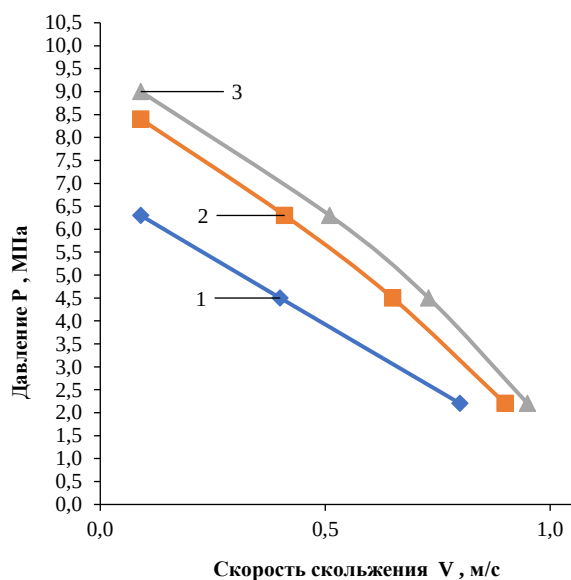
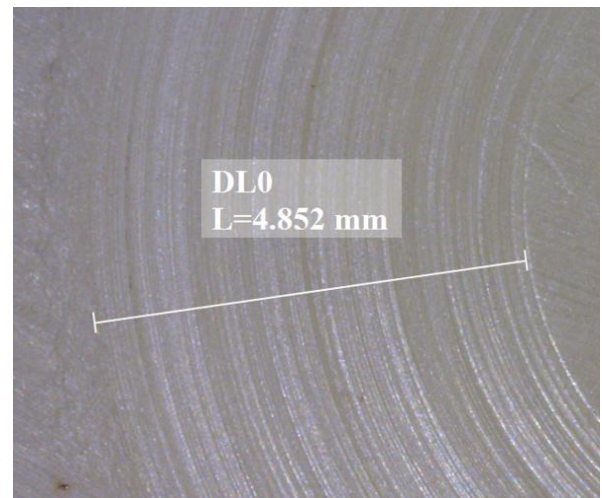


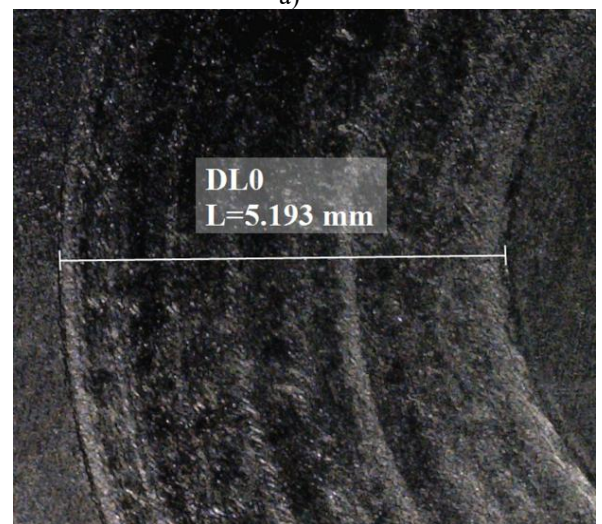
Рис. 1. График критических давлений заедания от скорости скольжения образцов полиэфиримида: 1 – ZX410, 2 – ZX410VMT, 3 – ZX410GF30.

На рисунке 2 представлена морфология поверхностей трения образцов после испытаний закрепленным абразивным зерном. На всех образцах наблюдались мелкие риски и следы микрорезания. Как видно из таблицы 1, средняя

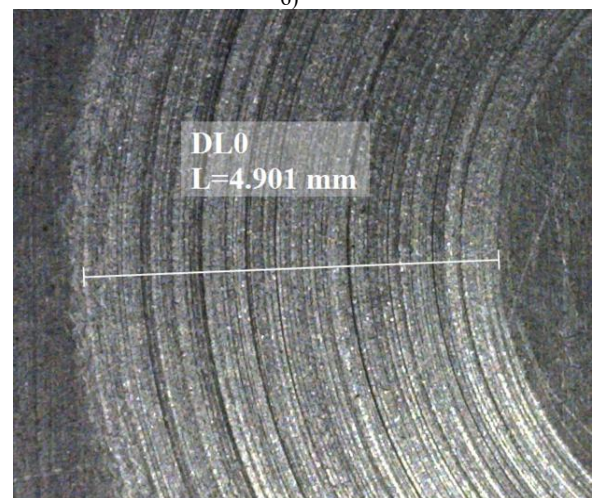
потеря массы образцов ZX410GF30 составила 0,075 г, что в 2,13 раз меньше, чем у образцов ZX410VMT 0,160 г.



а)



б)



в)

Рис. 2. Морфология зон трения образцов полиэфиримида после испытания закрепленным абразивным зерном: а – ZX410; б – ZX410VMT; в – ZX410GF30.

Результаты испытаний полиэфиримида на абразивное изнашивание закрепленным зерном представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты испытаний на абразивное изнашивание закрепленным абразивом

№ образц а	Масса до испытаний, г	Масса после испытаний, г	Потеря массы, г	Средня я потеря массы, г
1.1	8,3379	8,3324	0,0055	0,0060
1.2	8,3101	8,3036	0,0065	
1.3	8,2775	8,2836	0,0061	
2.1	9,1095	9,0978	0,0117	0,0160
2.2	9,0624	9,0524	0,0100	
2.3	9,0262	8,9998	0,0264	
3.1	10,1909	10,1821	0,0088	0,0075
3.2	10,1516	10,1443	0,0073	
3.3	10,1195	10,1129	0,0066	

Заключение

По результатам испытаний получено, что наибольшую задиристость демонстрировали образцы ZX410GF30, за ними по уменьшению задиристости следовали образцы ZX410VMT и ZX410. Проведенные эксперименты показали, что максимальной износостойкостью при изнашивании закрепленным абразивным зерном обладали образцы ZX410. При этом главным механизмом

изнашивания исходного полимера и композита со стекловолокном являлось микрорезание. Основным механизмом изнашивания композитов с углеродным волокном было усталостное изнашивание и частично микрорезание за счет отделившихся волокон.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Научноёмкие технологии создания машин будущего» Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Москва, Россия)

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0023

1. Wang L. Q., Sun J. W., Gu L., Friction and wear behavior of polyetherimide (PEI) filled with polytetrafluoroethylene (PTFE) // International Joint Tribology Conference. 2010. P. 313—315.
2. Xian G., Zhang Z., Friedrich K., Tribological Properties of Micro- and Nanoparticles-Filled Poly(etherimide) Composites // Journal of Applied Polymer Science. V. 101. P. 1678—1686.
3. Tarasov S. Y., Buslovich D. G., Panin S. V., Savchenko N. L., Kornienko L. A., Filatov E. Y., Moskvichev E. N., Structure and tribological behavior of a polyetherimide/polytetrafluoroethylene matrix filled with negative thermal expansion zirconium tungstate particles // Wear. 2024. V. 558—559. P. 205567.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРОВ И КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ СУХОГО ТРЕНИЯ И В МАСЛЕ

Бирюков В.П.¹, Якубовский А.А.¹, Горюнов Я.А.¹

¹Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; laser-52@yandex.ru

В данной работе проводилась оценка триботехнических характеристик исходного и модифицированного полиэфирэфиркетона в паре со сталью. Установлено, что композит, армированный стекловолокном, имел минимальные коэффициенты трения при смазке маслом, а максимальные коэффициенты трения были у всех образцов при обработке торца втулки бумагой P180.

Цель

Целью данного исследования являлось определение коэффициентов трения полимеров и композитов в зависимости от различной шероховатости контробразца при трении с использованием масла и в условиях сухого трения.

Введение

Композитные образцы [1] в виде штифтов диаметром 55 мм были изготовлены на основе полиэфирэфиркетона (ПЭЭК) с армированием 30% углеродным волокном (УВ). Трибологические испытания были выполнены при полном погружении образцов в трансмиссионное масло ATF Dexron VI по схеме: «торец штифта (три образца композита расположенные под углом 1200 друг к другу) – плоскость (стальной диск)», при скорости скольжения 1,5–12 м/с, давлении на образцы 1–7 МПа. Торцы штифтов были отполированы наждачной бумагой с зернистостью 0,5 мкм. Диск был изготовлен из стали SAE 8620 и закален до твердости 58–63 HRC. После термообработки поверхность диска была обработана четырьмя различными способами до шероховатости Ra (мкм): точением (1,264), шлифованием (0,825), хонингованием (0,277) и полированием (0,048). Для получения зависимостей коэффициентов трения от скорости скольжения образцы прирабатывали в течение 60 минут со скоростью 2 м/с и давлением 2 МПа, а затем испытывали при давлениях 1 и 7 МПа. При каждом давлении на штифты испытания проводили с 10 различными скоростями в течение 10 минут. Начальная скорость была равной 1,2 м/с и увеличивалась в арифметической прогрессии со скоростью 1,2 м/с для каждого шага, до 12 м/с. В ходе этих экспериментов удалось определить коэффициенты трения для различных режимов смазки. В диапазоне давлений от 1 до 7 МПа коэффициенты трения для граничного режима составляли 0,09 - 0,13, для смешанного режима 0,04–0,09, а для гидродинамического режима он был ниже 0,04. Средние показатели износа, полученные при испытаниях дисков до различной шероховатости, были очень схожими, в то время как полированные образцы демонстрировали гораздо меньший износ из-за того, что они находились в гидродинамическом режиме смазки.

Для экспериментов были изготовлены образцы

[2] композитов на основе ПЭЭК с наполнителем из 10 мас.% ПТФЭ, 10 мас.% графита и 10 мас.% углеродного волокна (CF). Трибологические характеристики пары ПЭЭК/52100 были определены в зависимости от шероховатости металлической поверхности, полученной при дробеструйной обработке, шлифованием, полировании абразивом 1 мкм и 9 мкм. Испытания были проведены по схеме: «диск (сталь 52100 диаметром 30 мм высотой 10 мм) – образующая поверхность цилиндрического образца композита диаметром 8 мм высотой 4 мм» при возвратно-поступательным движением с нормальной нагрузкой 100 Н. Продолжительность испытания составляла 2 часа, при частоте двойных ходов 2 Гц, и длине хода 10 мм. Обработка поверхности диска шлифованием и дробеструйной обработкой способствовала образованию пленок переноса. Наивысший коэффициент трения, получен для полированных образцов с использованием абразивного зерна 9 мкм, в то время как наибольшая скорость износа, полученная для образцов с дробеструйной обработкой.

Композитные образцы [3] на основе ПЭЭК были заполнены короткими углеродными волокнами, твердым смазочным материалом и керамическими частицами (ПЭЭК/КОМ). В качестве смазочных материалов использовали моторное масло с ультранизким содержанием серы. Моторное масло, использованное в этом эксперименте, состояло из минерального масла высокой очистки, полиолефина и добавок. Трибологические испытания были проведены по схеме: «блок (полимер, композит 4×4×10 мм) - образующая наружная поверхность кольца (сталь 100Cr6 диаметром 60 мм с шероховатостью поверхности трения 0,2–0,3 мкм)». Постепенное увеличение скорости скольжения приводило к увеличению коэффициента трения материалов. На этапе приработки, на каждом скоростном режиме коэффициенты трения материалов снижались, с образованием трибопленки на стальном кольце. Благодаря смазке моторным маслом полимеры ПЭЭК ПЭЭК/КОМ обладали гораздо большей износостойкостью, чем сталь 100Cr6

Материалы и методы

Для исследования трибологических характеристик были выбраны образцы (рис.1)

цилиндрической формы с диаметром 25 мм и высотой 15 мм, полиэфиркетон (ПЭК) (1) ZX-324 и композитов на его основе с добавлением стекловолокна (2) ZX-324 SW и углеволокна (3) ZX-324 UG30. Для определения триботехнических свойств использовали машину трения на базе настольного сверлильного станка оснащенную датчиками момента трения и усилия нагружения образцов по схеме «плоскость (торец полимера, композита)-торец кольцевой оправки, сталь 40Х». Испытания проводили в условиях сухого трения и с добавлением масла МГЕ10-А при нагрузке 20Н, частоте вращения 160 мин⁻¹, и времени цикла 1 мин.



Рис. 1. Полимеры и композиты на основе ПЭК: (а) ZX-324, (б) ZX-324 SW, (в) 3- ZX-324 UG30

Результаты и обсуждения

В зависимости от шероховатости втулки, торец которой был обработан на наждачной бумаге разной зернистостью, P180, P600, P1200, 2500 были получены средние значения коэффициентов трения при сухом трении и со смазкой представленные в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Коэффициенты трения в условиях сухого трения

№	Коэффициент трения, f			
	P180	P600	P1200	P2500
1	0,35	0,27	0,15	0,24

2	0,3	0,24	0,13	0,21
3	0,42	0,39	0,31	0,27

Таблица 2. Коэффициенты трения при смазке маслом

№	Коэффициент трения, f			
	P180	P600	P1200	P2500
1	0,26	0,24	0,18	0,15
2	0,23	0,21	0,16	0,13
3	0,33	0,27	0,21	0,18

Полученные результаты испытаний показали, что композит, армированный стекловолокном ZX-324 SW, имел минимальные коэффициенты трения при смазке маслом во всех случаях испытаний. Образцы с добавлением углеволокна ZX-324 GF30 показали самый высокий коэффициент трения при разной шероховатости. Коэффициенты трения исходного композита ПЭК были немного выше, чем с добавлением стекловолокна. Все испытанные образцы показали тенденцию снижения коэффициента трения с уменьшением шероховатости, самые оптимальные коэффициенты трения были у образцов в паре трения с втулкой обработанной наждачной бумагой P1200.

Заключение

Определено влияние шероховатости поверхности контрообразцов стали на изменение коэффициентов трения без смазки и при смазке маслом МГЕ-10А при трении с образцами полиэфиркетона и композитами на его основе с добавками стекловолокна и углеродного волокна. Установлено, что композит, армированный стекловолокном ZX-324 SW, имел минимальный коэффициент 0,13 трения при смазке маслом при обработке торца втулки бумагой P2500. Максимальные коэффициенты трения были у всех образцов при обработке торца втулки бумагой P180.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Научно-технические технологии создания машин будущего» Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Москва, Россия).

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0023

- Andrade T. F., Wiebeck H., Sinatora A. Effect of surface finishing on friction and wear of Poly Ether-Ether-Ketone (PEEK) under oil lubrication // Polimeros. 2016. Vol.26(4). P. 336-342. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-1428.2183>.
- Rzatkı F.D., Barboza D.V.D., Schroeder R.M., Barra G.M.O., Binder C., Klein A.N., Mello J.D.B. Effect of surface finishing, temperature and chemical ageing on the tribological behaviour of a polyether ether ketone composite/52100 pair // Wear. 2015. Vol. 332-333. P. 844-854. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2014.12.035>.
- Zhang G., Wetzel B., Wang Q. Tribological behavior of PEEK-based materials under mixed and boundary lubrication conditions // Tribology International. 2015. Vol.88. P.153-161. <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2015.03.021>.

ОСОБЕННОСТЬ СИЛОВОГО РАСЧЕТА ПЛАНЕТАРНЫХ РОЛИКОВИНТОВЫХ МЕХАНИЗМОВ ДЛЯ РОБОТОТЕХНИКИ

Блинов Д.С.¹, Морозов М.И.², Пугачевский Д.Н.¹

¹МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия dmitriyblinov@mail.ru

²ООО «НПО ПКРВ», Москва, Россия mihailmi@mail.ru

В роботостроении используются линейные приводы, предназначенные для преобразования вращательного движения в поступательное. В настоящее время среди них наиболее перспективными являются планетарные роликовинтовые механизмы (ПРВМ), которые являются многопоточными и имеют многочисленные избыточные связи. Для их проектирования нужны сложные силовые расчеты, которым и посвящена данная работа.

Обоснование использования в роботах планетарных роликовинтовых механизмов (ПРВМ)

В линейных приводах роботов и манипуляторов используются винтовые механизмы качения: шариковинтовые (ШВМ) и ПРВМ. При этом чаще применяются ШВМ, хотя ПРВМ существенно превосходят последние по основным эксплуатационным параметрам. К примеру, нагрузочная способность ПРВМ в 2,5–3 раза выше, чем у ШВМ, а ресурс – в 15–30 раз [1]. Объясняется это неготовностью нашей промышленности к широкому освоению производства ПРВМ из-за отсутствия нормативно-технической базы, методик расчета и проектирования этих механизмов и т.д.

Однако, преодолев указанные недостатки, можно с уверенностью предположить о расширении области применения ПРВМ в робототехнике, так как эти механизмы обладают исключительно высокими эксплуатационными параметрами и высокой надежностью.

Конструкции ПРВМ и ее особенности

ПРВМ, являясь подклассом роликовинтовых механизмов [1, 2], имеют целый ряд конструкций и исполнений, что является их преимуществом. На рис. 1 показана простейшая конструкция ПРВМ.

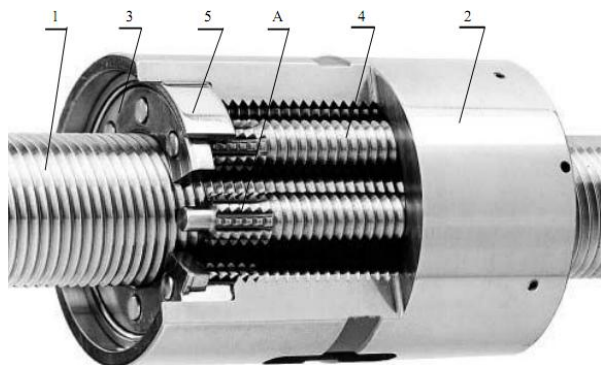


Рис. 1. ПРВМ с зазорами между резьбовыми деталями

Она состоит из многозаходных винта 1 и гайки 2, двух сепараторов 3, в отверстиях которых с возможностью поворота установлены резьбовые ролики 4. На концах роликов прямо по резьбе нарезаны прямозубые венцы «А». Они находятся в зацеплении с внутренними венцами втулок 5,

закрепленных в гайке. Указанные зубчатые зацепления синхронизируют движение роликов, которые вместе с сепараторами вращаются вокруг винта, а каждый ролик вращается еще вокруг собственной оси, то есть ролики совершают планетарное движение. При этом витки роликов зацепляются по одной образующей за витки винта, а по противоположной образующей – за витки гайки. Количество роликов (число силовых потоков) обычно от 7 до 14, число витков ролика вдоль образующей обычно от 25 до 60. Отсюда сила с винта на гайку передается через несколько сотен сопрягаемых витков сначала винта и роликов, а затем роликов и гайки.

Цель исследования

ПРВМ рассчитывается по аналогии с подшипниками качения по статической и динамической грузоподъемностям. При этом статическая грузоподъемность – это допускаемая статическая нагрузка, для которой необходимо определить наиболее нагруженную пару сопрягаемых витков гайки и ролика или ролика и винта, то есть выполнить силовой расчет пространственного многопоточного механизма с многочисленными избыточными связями. Далее по теории Герца выполняют прочностной расчет найденной пары сопрягаемых витков. Отсюда силовой расчет ПРВМ ключевым звеном при проектировании механизма.

Динамическая грузоподъемность связана с ресурсом, достоверно определить который можно экспериментально.

Отсюда цель исследования – это разработка силового расчета ПРВМ с зазорами между его резьбовыми деталями.

Поскольку силовой расчет является очень сложным, то надо ввести обоснованные допущения и проанализировать параметры, влияющие на силовое распределение между сопрягаемыми витками резьбовых деталей суммарной силы F_{Σ} , действующей на гайку.

Анализ параметров, влияющих на распределение нагрузки между сопрягаемыми витками резьбовых деталей ПРВМ

Почти все указанные параметры являются погрешностями изготовления размеров резьбовых

деталей ПРВМ. Например, из-за разноразмерности в пределах поля допуска на средний диаметр резьбы всех роликов в механизме суммарная сила F_{Σ} будет неравномерно распределяться по потокам.

Из-за отклонений в пределах полей допусков реальных шагов резьбы от номинальных для сопрягаемых витков резьбовых деталей нормальные силы между этими витками будут различными.

Другие погрешности изготовления в пределах полей допусков менее значимы для силового расчета ПРВМ.

Допущения

Из-за того, что ролики являются промежуточными деталями между гайкой и винтом, а осевой профиль их витков выпуклый с двух сторон, контакт всех сопрягаемых витков точечный. При приложении F_{Σ} в зоне контакта между произвольными сопрягаемыми витками будет действовать осевая F_A , радиальная F_R и окружная F_t силы. Обычно окружную силу F_t не учитывают ввиду малости и получают плоскую схему нагружения ролика.

Как показал анализ работ по силовому расчету ПРВМ, первоначально почти все авторы не учитывают неравномерность распределения суммарной осевой силы F_{Σ} между роликами (силовыми потоками), а далее между витками ролика вдоль его оси, взаимодействующими по одной образующей с гайкой, а по другой образующей – с винтом.

Если еще не учитывать осевые перемещения винта, роликов и гайки как бруса, то мы получим номинальное нагружение всех резьбовых деталей, когда все сопрягаемые витки этих деталей равнонагружены. Но тут проявляется особенность нагружения ролика.

Особенность нагружения ролика

Так как в ПРВМ угол профиля витков деталей равен 90° , на произвольном витке $F_R = F_A$. С учетом этого, а также ряда дополнительных допущений на рис. 2 показан ролик для случая его номинального нагружения (d_{p2} – средний диаметр резьбы ролика, L_p – длина резьбовой части ролика, P – шаг резьбы), когда все его витки равнонагружены.

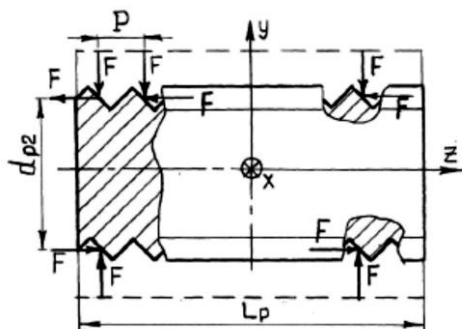


Рис. 2. Номинальное нагружение ролика

Пусть m – число витков ролика вдоль образующей, тогда $F \cdot m = F_{\Sigma} / n$, где n – количество роликов в ПРВМ. Получается, что ролик неуравновешен, так как по верхней и нижней образующей на него действует пара сил (F_{Σ} / n) , которая пытается его опрокинуть моментом $M_x = (F_{\Sigma} / n) \cdot d_{p2}$. В этом и состоит особенность нагружения ролика.

Способы уравнивания ролика

Ролик должен быть уравновешен только той нагрузкой, которая на него действует, см. рис. 2. Это возможно только за счет перераспределения нагрузки, действующей на витки ролика по двум его образующим, то есть номинальное нагружение невозможно. Первое ограничение – суммарные осевые силы на двух образующих ролика не должны измениться: $(F_{\Sigma} / n) = \sum_1^m F_A[I] = \sum_1^m F_A[J]$, где I и J – номер витка от левого торца ролика на верхней и на нижней образующей. Второе ограничение – осевая сила на каждом витке равняется радиальной. Третье ограничение – суммы радиальных сил на двух образующих ролика должны быть равными, то есть $\sum_1^m F_R[I] = \sum_1^m F_R[J]$. Четвертое ограничение – опрокидывающий момент от радиальных сил относительно начала координат должен равняться полученному $M_x = (F_{\Sigma} / n) \cdot d_{p2}$.

Определив силы на витках, удовлетворяющие указанным ограничениям, мы выполним силовой расчет ПРВМ без учета погрешностей изготовления деталей механизма.

Обзор методов и методик силового расчета

Данная проблема является актуальной, получить общепризнанный результат всё еще не удастся из-за сложности расчетной модели ПРВМ, постоянного перераспределения нагрузки, износных явлений и т.д. Этой проблемой постоянно занимаются во многих странах за рубежом [3, 4], и в РФ две научные школы: одна во Владимире [2, 5–6], а вторая в МГТУ им. Н.Э. Баумана [1, 7–8].

В работе [7] по аналогии с известными расчетами деталей машин (профильного соединения с квадратным сечением [9], муфты с промежуточным жестким подвижным элементом) была разработана простая в применении методика расчета. Она основана на использовании метода суперпозиций – на номинальное нагружение ролика (см. рис. 2) накладывается его нагружение, показанное на рис. 3.

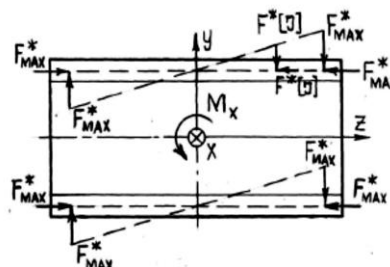


Рис. 3. Принимаемое дополнительное нагружение ролика

Принимаемое дополнительное нагружение ролика подобрано так, чтобы оно было статически уравновешено, но создавало заданный опрокидывающий момент M_x (показан условно для определения радиальных сил). Сложив силовые факторы, показанные на двух схемах, получим уравновешенное нагружение ролика: осевые силы на двух образующих изменятся, но их суммы останутся прежними, и они будут создавать тот же момент M_x , который будет уравниваться измененными радиальными силами.

В работе [8] определено распределение нагрузки по виткам ролика с учетом контактных явлений между сопрягаемыми витками по формуле Герца. Максимальная сила, действующая на наиболее нагруженный виток ролика, отличается от аналогичной силы, полученной по приведенной выше методики расчета, на несколько процентов.

Методики силового расчета, разработанные другими авторами, являются или сложными, или вызывают целый ряд вопросов, см. например работу [6].

Обсуждение полученных результатов

1. Равномерное (номинальное) распределение нагрузки между витками ролика достичь невозможно из-за возникновения опрокидывающего момента от осевых сил, действующих на витки ролика. Для заданной силы, действующей на ролик, опрокидывающий момент будет постоянным при перераспределении осевых сил на витках ролика. То есть опрокидывающий момент является постоянной закономерной причиной неравномерного нагружения ролика.

2. Случайными причинами неравномерного нагружения ролика являются погрешности изготовления его резьбовых деталей. При этом надо учитывать, что при работе ПРВМ происходит постоянное перераспределения нагрузки между сопрягаемыми витками деталей механизма от этих случайных причин.

3. Предположительно неравномерность нагружения ролика от опрокидывающего момента является доминирующей причиной, так как за счет изнашивания сглаживается концентрация нагрузки из-за погрешностей изготовления резьбы винта, роликов и гайки по шагу. К тому же неравномерность нагружения ролика от опрокидывающего момента является постоянно действующей причиной.

4. Для определения распределения нагрузки, действующих на витки ролика от действия опрокидывающего момента, разработаны две методики расчета: первая (приближенная) основана на аналогии с известным расчетом профильного соединения; вторая (точная в пределах заданных допущений) основана на условиях контактного взаимодействия сопрягаемых витков резьбовых деталей ПРВМ. Полученные по этим методикам результаты для наиболее нагруженной пары

сопрягаемых витков имеют расхождения в несколько процентов. Поэтому приближенную методику расчета, которая простая и удобная в применении, можно рекомендовать для использования в силовых и прочностных расчетах.

5. Если определить распределение суммарной осевой силы F_z между роликами, то на каждом ролике будет возникать свой опрокидывающий момент, уравнивание которого можно реализовывать предложенным приближенным методом.

6. Величина максимальная сила, действующая на наиболее нагруженный виток ролика от возникновения опрокидывающего момента, превышает номинальное значение на 40 ... 55%, то есть это увеличение очень существенное.

7. Несмотря на 50% увеличение максимальной силы, действующая на наиболее нагруженный виток ролика, нагрузочная способность ПРВМ является очень высокой. В работающем приводе на базе ПРВМ, как правило, в первую очередь отказывают опорные устройства.

Вывод по работе

ПРВМ являются наиболее перспективными преобразователями вращательного движения в поступательное. Они обладают высокой нагрузочной способностью, осевой жесткостью, точностью, надежностью, быстродействием. Поэтому они успешно применялись и будут применяться в робототехнике.

1. Блинов Д.С. Планетарные роликовинтовые механизмы. Конструкции, методы расчетов / Под ред. О.А. Ряховского. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2006. 222 с.
2. Козырев В.В. Конструкции роликовинтовых передач и методика их проектирования: Учеб. пособие / Владимир. гос. ун-т. Владимир. 2004. 100 с.
3. J. Yang, Z. Wei, J. Zhu, and W. Du, "Calculation of load distribution of planetary roller screws and static rigidity," Journal of Huazhong University of Science and Technology, vol. 39, no. 4, pp. 1-4, 2011.
4. Jan Ryś, Filip Lisowski "The computational model of the load distribution between elements in a planetary roller screw", Journal of Theoretical and Applied Mechanics 52, 3, pp. 699-705, Warsaw, 2014.
5. Козырев В.В. Анализ и синтез роликовинтовых передач как исполнительных механизмов электромеханических приводов: дис. ... докт. техн. наук. Владимир. ВладГТУ. 1995. 408 с.
6. Жданов А.В., Степенькин А.В., Шаламберидзе А.З. Теоретические исследование распределения нагрузки по виткам резьбы роликовинтовых механизмов // Научно-технический вестник Поволжья. 2011. № 2. С. 87-90.
7. Блинов Д.С., Морозов М.И. Неравномерность распределения нагрузки между сопрягаемыми витками ролика и винта с гайкой планетарной роликовинтовой передачи / Наука и образование: электронное научно-техническое издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 9. С. 1-14.
8. Блинов Д.С., Цветков Д.И. Силовой анализ планетарной роликовинтовой передачи с учетом контактной подаваемости сопрягаемых витков ее деталей / Справочник. Инженерный журнал. 2024. № 4. С. 11-23.
9. Детали машин: Учебник для вузов / Л.А. Андриенко и др.; под ред. О.А. Ряховского. 4-е изд. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. 465 с.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОСТОРОННЕГО ДИСКРЕТНОГО КОНТАКТА ДЛЯ УПРУГОЙ ПОЛУПЛОСКОСТИ С ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫМ ПОКРЫТИЕМ

Бобылев А. А.

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия; abobylov@gmail.com

Рассмотрены задачи о вдавлении жесткого штампа с регулярным микрорельефом в упругую полуплоскость с функционально-градиентным покрытием. Приведены граничные вариационные формулировки задач с использованием оператора Пуанкаре-Стеклова. При аппроксимации этого оператора применялись алгоритмы быстрого преобразования Фурье. Для вычисления передаточной функции использовалась вариационная формулировка краевой задачи для трансформант перемещений. Установлен ряд закономерностей контактного взаимодействия.

Введение

Перспективным направлением повышения триботехнических характеристик материалов является создание функционально-градиентных покрытий (ФГП), представляющих собой гетерогенные структуры (композиты) с непрерывным изменением по глубине фазового состава и физико-механических свойств [1]. При исследовании локального контактного взаимодействия тел с покрытиями в качестве расчетной схемы, как правило, выбирается упругая полоса или слой, сцепленные с упругим основанием. Учет поверхностного микрорельефа контактирующих тел приводит к постановке задач дискретного (множественного) контакта [2-3].

В настоящей работе рассматриваются задачи одностороннего дискретного контакта упругой полуплоскости с ФГП и жесткого гладкого штампа конечных размеров, основание которого имеет регулярный микрорельеф (РМР). Разработан вычислительный алгоритм и проведено численное исследование некоторых закономерностей контактного взаимодействия.

Постановка контактной задачи

Пусть однородная изотропная упругая полуплоскость занимает область $\Omega_0 = \{\mathbf{x} = (x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2 : x_2 \leq 0\}$. По всей своей границе Γ_0 полуплоскость сцеплена с покрытием – функционально-градиентной упругой полосой толщины h , занимающей область $\Omega_1 = \{\mathbf{x} = (x_1, x_2) \in \mathbb{R}^2 : 0 \leq x_2 \leq h\}$. Границу полосы $x_2 = h$ обозначим Γ_1 . Параметры Ламе λ_0 и μ_0 материала полуплоскости являются постоянными в Ω_0 , а параметры Ламе материала полосы Ω_1 – произвольными непрерывными функциями координаты x_2 : $\lambda = \lambda(x_2)$ и $\mu = \mu(x_2)$.

Через $\mathbf{u}^{(n)}(\mathbf{x})$, $\boldsymbol{\varepsilon}^{(n)}(\mathbf{x})$, $\boldsymbol{\sigma}^{(n)}(\mathbf{x})$, $n = 0, 1$, обозначим соответственно вектор перемещений и тензоры деформаций и напряжений в точке $\mathbf{x} \in \Omega_n$. Для упрощения обозначений всюду, где это возможно, говоря о параметрах, относящихся к области Ω_n , будем опускать индекс, указывающий на эту

область.

Полуплоскость и полоса находятся в условиях плоской деформации. Их напряженно-деформированное состояние описывается системой уравнений:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \text{def } \mathbf{u}, \quad \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{S} : \boldsymbol{\varepsilon}, \quad \text{div } \boldsymbol{\sigma} = 0 \text{ в } \Omega_0 \cup \Omega_1, \quad (1)$$

где $\text{def} \equiv 1/2(\text{grad} + \text{grad}^T)$, $\mathbf{S}$ – тензор модулей упругости.

Условия полного сцепления полуплоскости и полосы имеют вид:

$$u_1^{(1)} = u_1^{(2)}, \quad u_2^{(1)} = u_2^{(2)}, \quad \sigma_{12}^{(1)} = \sigma_{12}^{(2)}, \quad \sigma_{22}^{(1)} = \sigma_{22}^{(2)} \text{ на } \Gamma_0. \quad (2)$$

В полуплоскость с ФГП вдавливаются штамп с РМР. Часть границы Γ_1 , по которой возможен контакт со штампом, обозначается Γ_p . Положение и предельные размеры Γ_p задаются априори, исходя из геометрических соображений. Остальная часть границы Γ_1 свободна от внешних нагрузок:

$$\sigma_{12} = \sigma_{22} = 0 \text{ на } \Gamma \setminus \Gamma_p. \quad (2)$$

Форма основания штампа с РМР описывается функцией $\Phi(x_1)$, значение которой в точке $\mathbf{x} \in \Gamma_p$ равно расстоянию от этой точки до поверхности штампа, измеренному вдоль направления внешней нормали к границе Γ_p . Расстояние $\Phi(x_1)$ отсчитывается по отношению к недеформированному состоянию полуплоскости с ФГП. Для определенности полагаем, что $\min \Phi(x_1) = 0$. В случае штампа с РМР функция $\Phi(x_1)$ является мультимодальной (многоэкстремальной).

Положение штампа определяется вектором перемещений $\boldsymbol{\delta} = (\delta_1, \delta_2)$ и углом поворота φ_3 . Главный вектор $\mathbf{F} = (F_1, F_2)$ и главный момент M_3 внешних сил, приложенных к штампу, считаются заданными. В качестве центра приведения выбирается точка $\mathbf{x}^c = (x_1^c, x_2^c)$. Рассматривается задача нормального контакта полосы со штампом, поэтому полагаем $F_1 = 0$ и $\delta_1 = 0$.

Контактное взаимодействие штампа и полуплоскости с ФГП описывается условиями одностороннего гладкого контакта:

$$u_2 \leq \Phi + \delta_2 + \varphi_3(x_1 - x_1^c), \quad \sigma_{22} \leq 0, \quad \sigma_{12} = 0, \\ \sigma_{22} [u_2 - \Phi - \delta_2 - \varphi_3(x_1 - x_1^c)] = 0 \text{ на } \Gamma_p. \quad (3)$$

Уравнения равновесия штампа имеют вид:

$$\int_{\Gamma_p} \sigma_{22} dx_1 = F_2, \quad \int_{\Gamma_p} \sigma_{22}(x_1 - x_1^c) dx_1 = M_3. \quad (4)$$

Для существования решения контактной задачи предполагается, что внешние силы и моменты, приложенные к штампу, согласованы между собой таким образом, что существует распределение нормальных напряжений $\sigma_{22} \leq 0$ на Γ_p , удовлетворяющее уравнениям равновесия штампа (4).

Для выделения класса единственности решения в рассматриваемой задаче вводятся дополнительные условия на поведение решения на бесконечности и на смещения полуплоскости как жесткого целого [4].

Задача состоит в определении полей перемещений, деформаций и напряжений, удовлетворяющих уравнениям (1), граничным условиям (2)-(3), уравнениям равновесия штампа (4), условиям на бесконечности и дополнительным условиям на перемещения полуплоскости как жесткого целого. Подчеркнем, что в рассматриваемой задаче одностороннего дискретного контакта априори задается лишь область возможного контакта Γ_p , положение и размеры пятен контакта заранее неизвестны и подлежат определению в процессе решения задачи.

Оператор Пуанкаре-Стеклова

Для упругой полуплоскости с ФГП оператор Пуанкаре-Стеклова (ОПС) $G: q \mapsto w$, отображающий на части Γ_p границы (в зоне возможного контакта) напряжения $q(x_1) \equiv \sigma_{22}(x_1, h)$ в перемещения $w(x_1) \equiv u_2(x_1, h)$, имеет вид

$$w(x_1) = \int_{\Gamma_p} g(x_1 - \xi_1) q(\xi_1) d\xi_1, \quad (5)$$

где $g(\cdot)$ – функция Грина. Получить представление этой функции в явном виде для произвольного ФГП затруднительно. Учитывая, что правая часть (5) является интегральным оператором типа свертки, с помощью интегрального преобразования Фурье по переменной x_1 можно получить алгебраическое соотношение для трансформант нормальных перемещений $\tilde{w}(\alpha)$ и нормальных напряжений $\tilde{q}(\alpha)$:

$$\tilde{w}(\alpha) = \tilde{g}(\alpha) \tilde{q}(\alpha), \quad (6)$$

где α – параметр преобразования Фурье; $\tilde{g}(\alpha)$ – трансформанта функции Грина (передаточная функция). Для построения передаточной функции применялся подход, основанный на использовании вариационной формулировки краевой задачи для трансформант перемещений [5]. Аппроксимация

вариационной задачи производилась методом конечных элементов.

При решении задач дискретного контакта для штампов с РМР требуется вычислять значения передаточной функции ОПС в достаточно широком диапазоне изменения параметра преобразования Фурье α . С целью уменьшения вычислительных затрат в настоящей работе для больших значений параметра α применялся алгоритм, использующий трехчленное асимптотическое разложение передаточной функции и построенные на его основе аппроксимации Паде [6].

Вариационные формулировки задач

Для построения вариационных формулировок задач одностороннего дискретного контакта введем необходимые функциональные пространства – гильбертов триплет $H^{1/2}(\Gamma_p) \subset L_2(\Gamma_p) \subset \tilde{H}^{-1/2}(\Gamma_p)$ [7]. Отношение двойственности $\langle \cdot, \cdot \rangle_{\tilde{H}^{-1/2}(\Gamma_p)}$, порожденное продолжением скалярного произведения в $L_2(\Gamma_p)$, обозначим через $\langle \cdot, \cdot \rangle$.

Образуем множество статически допустимых нормальных напряжений

$$V = \{p \in \tilde{H}^{-1/2}(\Gamma_p) : p \leq 0; \langle p, 1 \rangle = F_2; \langle p, x_1 - x_1^c \rangle = M_3\}.$$

Аналогично [7] можно показать, что искомые нормальные напряжения $q \in V$ удовлетворяют граничному вариационному неравенству

$$a(p - q, q) - b(p - q) \geq 0 \quad \forall p \in V, \quad (7)$$

где $a(p, q) = \langle p, Gq \rangle$ – непрерывная положительно определенная билинейная форма; $b(p) = \langle p, \Phi \rangle$ – непрерывная линейная форма. Вариационное неравенство (7) эквивалентно задаче минимизации граничного функционала: найти $q \in V$ такой, что

$$J(q) = \inf_{p \in V} \{J(p) = a(p, p) / 2 - b(p)\}. \quad (8)$$

Решение вариационного неравенства (7) и задачи минимизации (8) существует и единственно [4, 7].

Конечномерная аппроксимация задачи

Аппроксимация задачи минимизации (8) производилась с помощью гранично-элементного подхода. Выбор метода аппроксимации задачи (8) определяется, в первую очередь, возможностью построения эффективной с вычислительной точки зрения аппроксимации ОПС (5). Из (6) следует, что действие ОПС сводится к выполнению пары (прямого и обратного) преобразований Фурье и перемножению трансформант. Использование преобразования Фурье наиболее эффективно в случае периодических функций благодаря дискретности их спектра и, как следствие, переходе от непрерывного преобразования к дискретному [7]. Учитывая, что для упругой полуплоскости с произвольным ФГП передаточная функция может быть построена только численно, основная идея

используемого подхода состоит в аппроксимации искомых нормальных напряжений периодическими сеточными функциями и применении алгоритмов быстрого преобразования Фурье (БПФ). Для уменьшения возникающей при этом так называемой ошибки периодичности вводится расширенная вычислительная область $\Gamma_c \subset \Gamma_1$ такая, что $\Gamma_p \subset \Gamma_c$, $\text{diam } \Gamma_c = k \text{ diam } \Gamma_p$, $k \in \mathbb{N}, k > 1$, где k – коэффициент расширения вычислительной области [7].

Для решения полученной задачи квадратичного программирования использовались вычислительные алгоритмы на основе метода сопряженных градиентов [8, 9], допускающие случаи внецентренного нагружения штампа.

Численные результаты

Разработанный вычислительный алгоритм реализован на языке FORTRAN с применением программного пакета NVIDIA HPC SDK. Для выполнения БПФ использовалась библиотека cuFFT, позволяющая с помощью технологии CUDA производить вычисления на графических процессорах.

Получены численные решения задач о вдавливании в полуплоскость с ФГП гладкого жесткого штампа конечных размеров с РМР, состоящим из K микровыступов. Аналогично [10] форма основания штампа с РМР описывалась функцией

$$\Phi(x_1) = \Phi_1(x_1) + \Phi_2(\xi_1) / K, \quad (9)$$

где $\Phi_1(x_1)$ – выпуклая функция, определяющая макроформу штампа; $\Phi_2(\xi_1)$ – выпуклая функция, задающая форму микровыступов; $\xi_1 = \{Kx_1 / d\}$ – «быстрая» координата; d – размер области возможного контакта Γ_p , $\{\cdot\}$ – дробная часть числа. Для пары функций $\{\Phi_1, \Phi_2\}$ формула (9) определяет однопараметрическое семейство штампов, в качестве параметра которого выступает число микровыступов K . Штампы, принадлежащие к одному семейству, имеют одинаковую макроформу, а их микровыступы являются подобными.

Введем на множестве микровыступов сеточную координату $i = \overline{1, K}$ и обозначим через Γ_{pi} часть Γ_p , соответствующую микровыступу с координатой i . Аналогично [10] для каждого штампа введем следующие сеточные функции:

– контактных усилий $\mathbf{R} = [r_i]$

$$r_i = \int_{\Gamma_{pi}} p(x_1) dx_1;$$

– относительных величин площадей фактического контакта на микровыступах $\mathbf{S} = [s_i]$

$$s_i = K \int_{\Gamma_{pi}} [p(x_1) > 0]_a dx_1 / d;$$

– максимумов контактного давления на

микровыступах $\mathbf{P} = [p_i]$

$$p_i = \max_{\Gamma_{pi}} p(x);$$

– средних контактных давлений на микровыступах $\mathbf{Q} = [q_i]$

$$q_i = \int_{\Gamma_{pi}} p(x_1) dx_1 / \int_{\Gamma_{pi}} [p(x_1) > 0]_a dx_1;$$

– средних конечных зазоров на микровыступах $\mathbf{Z} = [z_i]$

$$z_i = K \int_{\Gamma_{pi}} (\Phi + \delta_2 + \phi_3(x_1 - x_1^c) - u_2) dx_1 / d,$$

где $p(x)$ – распределение контактного давления; $[\cdot]_a$ – скобка Айверсона (функция равная 1 для истинного аргумента и равная 0 в противном случае).

В [10] методом вычислительного эксперимента установлен ряд закономерностей контактного взаимодействия штампов с РМР и упругой полуплоскости без ФГП, на основе которых предложена методика приближенного расчета распределения нагрузок между элементами РМР, а также оценки максимального и среднего контактного давления, размеров площадок фактического контакта и средних конечных зазоров на микровыступах. В настоящей работе проведено аналогичное исследование для случая упругой полуплоскости при наличии ФГП. Проведенные вычислительные эксперименты подтвердили справедливость установленных в [10] закономерностей контактного взаимодействия жестких штампов с РМР и упругой полуплоскости и в случае наличия ФГП.

Заключение

Разработанный подход к решению плоских задач одностороннего дискретного контакта для упругой полуплоскости с ФГП может быть обобщен на случай пространственных задач для упругого полупространства с ФГП.

Исследования автора поддержаны Московским центром фундаментальной и прикладной математики МГУ имени М. В. Ломоносова по соглашению №075-15-2025-345.

1. Погребняк А. Д. и др. Структура и свойства нанокompозитных, гибридных и полимерных покрытий. М.: URSS, 2018. 344 с.
2. Горячева Г. И. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. 478 с.
3. Goryacheva I., Makhovskaya Yu. Discrete Contact Mechanics with Applications in Tribology. Amsterdam: Elsevier, 2022. 209 p.
4. Бобылев А. А. О положительной определенности оператора Пуанкаре-Стеклова для упругой полуплоскости // Вест. Моск. ун-та. Сер. 1. Матем. Механ. 2021. № 6. С. 34-40.
5. Бобылев А. А. Построение передаточной функции оператора Пуанкаре-Стеклова для упругой полуплоскости с покрытием // Дифференц. уравнения. 2024. Т. 60, № 9. С. 1225-1240.
6. Бобылев А. А. О вычислении передаточной функции оператора Пуанкаре-Стеклова для функционально-градиентной упругой полосы // Вест. Моск. ун-та. Матем.

- Механ. 2023. № 5. С. 52-60.
7. Бобылев А. А. Алгоритм решения задач дискретного контакта для упругой полосы // Прикл. математика и механика. 2022. Т. 86, № 3. С. 404-423.
 8. Бобылев А. А. Применение метода сопряженных градиентов к решению задач дискретного контакта для упругой полуплоскости // Изв. РАН. МТТ. 2022. № 2. С. 135-153.
 9. Бобылев А. А. Применение метода сопряженных градиентов к решению задач одностороннего дискретного контакта для упругого полупространства // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2024. Т. 64, № 11. С. 2164-2179.
 10. Бобылев А. А. О закономерностях контактного взаимодействия поверхностей с регулярным микрорельефом (плоская задача) // Изв. РАН. МТТ. 2025, № 3. С. 139-160.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПАР СКОЛЬЖЕНИЯ ОТКРЫТОГО КОСМОСА

Броновец М.А.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

Одной из первостепенных задач, стоящих перед создателями космической техники являются задачи создания пар скольжения, в особенности подшипников скольжения, работоспособных при высоких скоростях фрикционного взаимодействия с очень низкими коэффициентами трения. Ставится задача создания подшипников скольжения, работающих в отсутствие пластичных смазочных материалов с моментами сопротивления вращению, не превышающими аналогичные параметры подшипников качения.

Решение этой проблемы заключается, прежде всего, в исследовании и подборе материалов пар трения, которые в силу особенностей их состава и строения обеспечивают очень низкие коэффициенты трения.

Материалы и методы исследований

Модифицирование полимерных покрытий различными ультрадисперсными наполнителями является весьма перспективным способом создания твёрдосмазочных материалов (ТСМ) и покрытий.

В качестве наполнителя для политетрафторэтиленового (фторуглеродного) полимера рассматривалась возможность использования графита и дисульфида молибдена. В этих твёрдых смазках анизотропия свойств сочетается с хорошей адгезией к подложке.

В частности, графит и MoS_2 имеют гексагональную кристаллическую решётку, обеспечивающую большую анизотропию свойств в параллельном и перпендикулярном плотноупакованным слоям направлениях. Их кристаллы легко расслаиваются по плоскости базиса. Графит имеет малую химическую активность и термостабилен (температура начала интенсивного окисления $\approx 400^\circ\text{C}$). Вместе с тем графит отличается высокой адсорбционной способностью за счёт внедрения адсорбируемых веществ (пары воды, кислород, углеводороды и т.п.) в межплоскостные пространства. В результате увеличения расстояния между базисными атомными плоскостями резко снижается поверхностная энергия графита, что и обеспечивает его высокие антифрикционные свойства.

Для дисульфида молибдена также характерна гексагональная кристаллическая структура слоистого типа с весьма малой поверхностной энергией и высокими антифрикционными свойствами. Однако в отличие от графита адсорбция кислорода и паров воды дисульфидом молибдена приводит к снижению его антифрикционных свойств, вследствие образования химических связей между адсорбируемыми веществами и серой. В связи с этим в качестве наполнителя для покрытий целесообразно использование ультрадисперсного дисульфида молибдена.

Проблемой функционирования триботехнических узлов с твёрдыми смазочными материалами является сохранение ТСМ на поверхностях трения в процессе фрикционного взаимодействия в экстремальных условиях (вакуум,

высокие температуры, высокие давления).

Одним из антифрикционных твёрдосмазочных покрытий на основе углеродных волокон является ЭПАН. В нём используется мелкодисперсный порошок дисульфида молибдена - и связующие вещества: фенол, перекись, силиконовые смолы.

К числу подходящих покрытий контртела относятся покрытия, полученные методом микродугового оксидирования.

Покрытие, наносимое методом микродугового оксидирования, является слоем керамики, сформированной из поверхностного слоя конструкционного металла.

Процесс МДО представляет собой окисление слоёв анода в электролите при повышенных значениях формирующего напряжения и плотности тока [1]. Процесс применим не только к алюминию, но и к другим металлам вентильной группы — Ti, Zr, Mg, Ta, Be.

При МДО формируются высокотемпературные фазы в покрытии (корунд $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), идёт разложение компонентов электролита и их взаимодействие с оксидами металла основы. Толщина МДО-покрытия может достигать 300 мкм, оно обладает хорошей адгезией с металлом, твёрдость покрытия — 78–90 HRC, а износостойкость в 5–10 раз выше, чем у стали Ст.45

Результаты испытаний покрытия микродугового оксидирования (МДО) как контртела для композиционного материала на основе углерод-углеродного волокна ЭПАН при испытаниях по схеме кольцо-кольцо вращательного движения. (таблица 1) [2]

Таблица 1. Испытания твёрдосмазочного покрытия ЭПАН-3 при трении по МДО-покрытиям по схеме торцевого нагружения кольцо—кольцо вращательного движения в атмосфере воздуха

Сочетание материалов	$P_{уд.}, \text{ МПа} \cdot 10^2$	$V, \text{ м/с}$	f
ЭПАН-МДО	3,9	0,2	0,006
		1,0	0,006
		2,0	0,008
	7,8	0,2	0,003
		1,0	0,006
		2,0	0,003
	11,8	0,2	0,003
		1,0	0,004
		2,0	0,002

Износ образца из материала ЭПАН был минимальным, износ покрытия МДО не наблюдался.

Как видно из результатов испытаний коэффициент трения пары МДО—ЭПАН в большой степени зависит от давления на контакте. При трении по схеме «кольцо по кольцу» при малых давлениях в пределах $3,9 \times 10^2$ — $11,8 \times 10^2$ МПа коэффициент трения не превышает 0,008 и практически не зависит от скорости скольжения при её изменении в пределах 0,2—2,0 м/с.

При высокой чистоте обработки трущихся поверхностей удаётся получить чрезвычайно низкие коэффициенты трения, которые снижаются с увеличением удельного давления на контакте.

МДО-покрытия имеют очень высокую износостойкость, сопоставимую с износостойкостью материалов и покрытий, традиционно применяющихся для снижения износа: WC—Cu—Ni, боридных слоёв (FeB, Fe₂B), ионно-вакуумных покрытий.

Наибольшей износостойкостью и прочностью

обладают МДО-покрытия на дуралюминах (Д16, Д1, Д18, Д20 и т.п.). Нитевидные кристаллы корунда ($\square$ -Al₂O₃), закрученные в клубки, совместно с мелкокристаллической матрицей из $\square$ -Al₂O₃, практически лишены возможности деформационных смещений. В этом кроется одна из причин высокой износостойкости МДО-покрытий на сплаве Д16.

Сочетание материалов ЭПАН—МДО даёт чрезвычайно низкие значения коэффициентов трения и очень малые величины износов. Во всех рассмотренных случаях износ образца из материала ЭПАН был минимальным, износ покрытия МДО не наблюдался.

Результаты и их обсуждение

Особого внимания заслуживают результаты испытаний покрытия микродугового оксидирования (МДО) как контртела для композиционного материала на основе углерод-углеродного волокна ЭПАН. Полученные очень низкие коэффициенты трения при малых давлениях на контакте и высокая износостойкость этих сочетаний материалов в паре трения делают эти покрытия весьма перспективными для узлов трения, работающих в открытом космическом пространстве.

Покрытие ЭПАН может быть использовано для создания подшипников скольжения, а также может быть рекомендовано для изготовления сепараторов подшипников качения.

1. Malyshev V.N. Oil and Gas Steels Surface Hardening Investigation by Anodic Plasma Electrolytic Treatment // Chemical Engineering and Processing – Process Intensification. — Elsevier BV (Netherlands). — (179), 109—055. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.109055>
2. Броновец М.А. Покрытия триботехнического назначения для открытого космоса. Международный научный журнал «Трение и износ». 2023, том 44, № 6, С. 544-550

АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ ТРИБОМЕТРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

Буяновский И.А., Самусенко В.Д., Стрельникова С.С.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия; sofya.s.strelnikova@yandex.ru

Отмечен экономический потенциал развития районов Крайнего Севера. Рассмотрены климатические особенности региона, приводящие к снижению производительности и сокращению срока службы оборудования. Определены технические и методологические проблемы, связанные с проведением трибологических исследований при пониженных температурах.

Цель работы

Обосновать необходимость и рассмотреть особенности разработки специализированного оборудования, предназначенного для исследования трибологических свойств смазочных материалов в условиях низких температур, характерных для районов Крайнего Севера России.

Привлекательность районов Крайнего Севера

Несмотря на активное изучение и внедрение альтернативных источников энергии, мировые тенденции развития топливно-энергетического комплекса свидетельствуют о сохранении ведущей роли углеводородных энергоносителей в ближайшем будущем (в этом столетии). В связи с постепенным истощением месторождений традиционных нефтегазовосных бассейнов особый интерес представляет разработка трудноизвлекаемых запасов и разведка новых крупных месторождений. Одним из перспективных малоосвоенных регионов с высоким топливно-энергетическим потенциалом является Арктика. По оценкам различных международных организаций, в арктической зоне сосредоточено не менее 15% мировых запасов нефти и не менее 30% мировых запасов газа. При этом из них 41% нефтяных и 70% газовых арктических запасов приходится на Россию [1]. Также Арктика обеспечивает 20% ВВП России, 22% общероссийского экспорта, в ней добывается 90% никеля и кобальта, 60% меди, 96% платиноидов и других благородных и редкоземельных металлов (табл. 1) [2]. Помимо отмеченных металлов, Арктическая зона привлекательна добычей алмазов (Якутия) и угля (Воркута, месторождения высококачественного угля на Таймыре).

Таблица 1. Доля Арктики в мировых запасах и добыче
металлических руд [2]

Полезные ископаемые	Доля в мировых запасах (%)	Доля в глобальной добыче (%)
Никель	10,15	14,25
Кобальт	3,3	11
Цинк	3,8	4,64
Свинец	2,69	2,37
Вольфрам	0,44	4,03
Титан	10,52	4,84
Циркон	1,05	1,76
Золото	3,25	2,87
Серебро	3,72	4,19
Платина	18,93	15,33

Полезные ископаемые	Доля в мировых запасах (%)	Доля в глобальной добыче (%)
Палладий		41,24

Следует также отметить, что 30% государственной границы и 50% морской границы лежит на территории Арктики [3]. В дополнение, Арктика становится мощнейшим узлом международных транспортных коммуникаций. Утверждён план развития Северного морского пути (СМП) до 2035 года, который содержит 155 мероприятий, направленных на развитие грузовой базы, создание грузового и локального флота, транспортной инфраструктуры, управление и развитие судоходства, инфраструктуры безопасности в Арктической зоне РФ.

Проблемы эксплуатации техники в холодном климате

Все вышеупомянутые факты свидетельствуют об необходимости активного освоения районов Крайнего Севера, однако этому препятствуют экстремальные природно-климатические условия: длительный период низких температур, значительный дневной (до 20 °С) и годовой (от - 60 °С до +40 °С) перепад температур; сильные ветровые нагрузки; повышенная влажность воздуха в местах, прилегающих Тихому и Северному Ледовитому океанам (морская зона), что чревато обледенением и налипанием снега; высокая солнечная радиация в период полярного дня. Минимальные температуры зимой могут опускаться до -70 °С [4]. При этих условиях изделия (и соответственно смазочный материал) должны безотказно выполнять свои функции, поскольку отказ оборудования может привести к катастрофическим последствиям (включающим риск для жизни людей). Одной из основных причин проявления повышенных затрат при эксплуатации техники в условиях низких температур является изменение основных характеристик смазочных материалов [5]. Стандартные смазочные материалы теряют свою эффективность при низких температурах, становясь чрезмерно вязкими или даже твердыми, что приводит к увеличению усилий при пуске двигателей и механизмов, повышенному изнашиванию трущихся элементов и

возникновению риска отказа техники в критически важных ситуациях.

Под действием низких температур влага, содержащаяся в смазочных материалах, кристаллизуется, что вместе с изменением свойств самих материалов снижает их смазывающие свойства. Большое содержание влаги в воздухе (более 90%) приводит к обводнению масел, технических жидкостей и топлив, обусловленному конденсационными и абсорбционно десорбционными процессами, обводнению консистентных смазок с образованием эмульсии, росту плесени, коррозии металлов [6]. Вода дезактивирует противоизносные, противозадирные и противопенные присадки, снижает эффективность ингибиторов окисления [7]. Условия работы на шельфовых месторождениях и вблизи береговых линий усугубляются агрессивным влиянием морской воды.

Значимость влияния климатических факторов на работу машин и механизмов подчеркивают данные о распределении отказов (рис. 1). Количество отказов машин варьируются от месяца к месяцу и наибольшее их число приходится на зимний период.

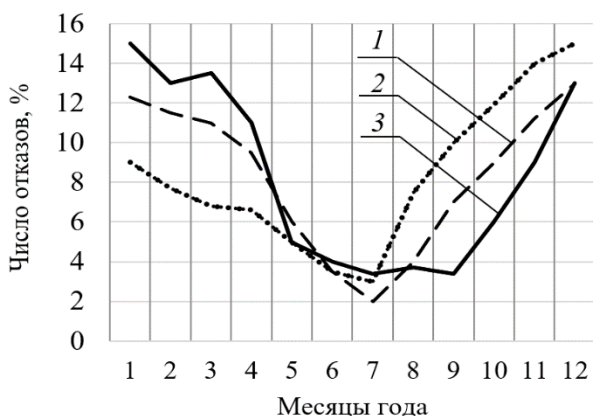


Рис. 1. Распределение отказов по месяцам:
1 – экскаваторы Э-10011 [8]; 2 – бульдозеры Т-100М [8];
3 – автомобили ЗИЛ-130 [9]

В зимних условиях севера и северо-востока России производительность различных видов техники при работе на открытом воздухе снижается более чем в 2 раза, а фактический срок службы сокращается в 2,5-3,5 раза [10], что приводит к ежегодным убыткам. Затраты на содержание техники, не рассчитанной на эксплуатацию в условиях Севера, обычно в 2-4 раза и более превышают затраты на ее содержание в условиях умеренного климата. Причина этого заключается в увеличении затрат на запасные части и unplanned ремонты [11].

Одной из основных причин отказов техники, наряду с хладноломкостью металлов и сварных соединений, является низкая надежность и долговечность узлов трения – подшипников, зубчатых передач, опор и муфт, поршней, гильз и цилиндров, уплотнений и сальников, деталей,

взаимодействующих с мерзлым грунтом и т.д. Обеспечение непрерывной работы техники и оборудования в условиях экстремально низких температур невозможно без применения эффективных специализированных низкотемпературных смазочных материалов. Для исследования трибологических свойств смазочных материалов, способных эффективно работать в специфических условиях Арктики, необходима разработка специальных методик и реализующих их трибометров.

Стандартные методы, используемые при испытаниях низкотемпературных смазочных материалов

Низкотемпературная вязкость и прокачиваемость моторных масел измеряются с помощью имитаторов холодного пуска и миниротационных вискозиметров согласно методам ASTM D5293 и ASTM D4684 соответственно. Их отечественными аналогами являются тесты, описанные в ГОСТ Р 52559-2006, ГОСТ 33111-2014 и ГОСТ 1929-87.

Пригодность трансмиссионных масел и гидравлических жидкостей для работы при низкой температуре окружающей среды проверяется с помощью метода ASTM D2983 с использованием ротационного вискозиметра.

Для пластичных смазок актуальны стандарты ASTM D1478 и ASTM D4693, которые описывают методы определения соответственно сдвигающего и установившегося крутящего момента при низких температурах для шариковых подшипников и подшипников ступиц.

Стандартные методы определения трибологические характеристики масел и пластических смазок описаны в ГОСТ 9490-75, однако в нем не упомянуты особенности испытаний при низких температурах.

Особенности проведения экспериментов при низких температурах

Проведение трибологических исследований при низких температурах сопряжено с техническими и методологическими трудностями для проведения достоверного эксперимента [12].

1. Сохранение чистоты поверхности образцов во время опыта. При проведении низкотемпературных исследований процесса трения на тщательно обработанных и подготовленных к испытаниям поверхностях образцов в процессе их охлаждения могут конденсироваться, вымерзнуть или адсорбироваться пары воды, смазки и других веществ, присутствующих в окружающей среде (при температуре воздуха 20 °C и относительной влажности 50% точка росы – примерно 9 °C). При появлении даже следов конденсата на трущихся поверхностях значение коэффициента трения резко меняется, так как процесс трения в чрезвычайной

степени зависит от чистоты поверхностей образцов. Одним из способов сохранения чистоты трущихся поверхностей может служить предварительная продувка прибора сухим газом, не конденсирующимся при температуре опыта. Еще один способ – проведение испытания внутри специально организованной камеры, внутри которой возможно контролировать параметры внешней среды (температуру, влажность, наличие агрессивных сред и т.д.).

2. Термостатирование образцов. Изучение влияния низких температур на процесс трения и износа делает необходимым поддержание постоянной температуры образцов, т.е. их термостатирование в течение всего опыта. Если это требование не выполняется, температура трущихся поверхностей может оказаться значительно выше начальной температуры из-за выделения теплоты при трении. Наиболее простым представляется проведение экспериментов при температурах, соответствующих температурам кипения или сублимации некоторых веществ, например, диоксид углерода переходит из твердого состояния в газообразное при температуре $-78,5^{\circ}\text{C}$. Не вызывает особых затруднений поддержание температуры образцов и при изменении коэффициента трения в опытах с очень малыми скоростями скольжения, например при скоростях поступательного движения 2-3 мм/с, вращательного – $0,1 \text{ рад/с}$ (1 мин^{-1}). Однако термостатирование образцов при высоких скоростях скольжения представляется более сложной задачей, поскольку тепловая нагрузка на систему охлаждения прибора в этом случае зависит от теплоты трения и изменяется в течение опыта.

3. Сохранение стабильности датчиков для измерения силы трения. В области низких температур тензодатчики и упругие элементы изменяют свои характеристики, в связи с чем необходима тарировка во всем диапазоне температур, при которых проводятся исследования. Еще одно решение – вывод сил из низкотемпературной зоны в стабильную окружающую среду. Однако в таком случае возникает вопрос об организации уплотнительной конструкции и применении опорных подшипников, которые неизбежно приводят к ошибкам измерения сил трения.

Заключение

Разработка специализированного трибометра для исследования смазочных материалов в условиях низких температур (до -80°C) является актуальной задачей ввиду активного освоения Арктической зоны и районов Крайнего Севера России, обладающих огромными ресурсными

возможностями, но одновременно предъявляющих жесткие требования к надежности и долговечности применяемого оборудования.

Стандартные методы испытаний смазочных материалов ориентированы преимущественно на оценку вязкостных характеристик и не обеспечивают всестороннюю проверку трибологических показателей в условиях низких температур. Это ограничивает возможности оценки качества смазочных материалов для условий Крайнего Севера.

Создание специализированного низкотемпературного трибометра позволит существенно улучшить качество проводимых испытаний, что в конечном счете снизит частоту отказов узлов трения, повысит эффективность и безопасность процессов в регионах с суровым климатом.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0023

1. Швец Н.Н., Береснева П.В. Нефтегазовые ресурсы Арктики: правовой статус, оценка запасов // Вестник МГИМО-Университета. 2014. №4(37). С.60-67.
2. Арктическое материаловедение: состояние и развитие / В.М. Бузник, Н.П. Бурковская, И.В. Зибарева, Н.П. Андреева, К.Г. Боголицын. – М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. 2021. 414 с.
3. Бузник В.М., Василевич Н.И. Материалы для освоения арктических территорий - вызовы и решения // Лаборатория и производство. 2020. № 1(11). С. 98-107.
4. Маряхин В.М., Часовский В.И. Северные города России: географические особенности и современные подходы к исследованию // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Естественные и медицинские науки. 2023. № 3. С. 24-39.
5. Корнеев С.В. и др. Особенности эксплуатации наземной мобильной техники в условиях низких температур//Трение и смазка в машинах и механизмах. 2009. № 11. С. 33-36.
6. Дорошенко Н.В. Обоснование выбора трансмиссионных масел при эксплуатации дорожных и строительных машин в условиях холодного климата. Дисс...к.т.н. Омск: СибАДИ. 2007. 218с.
7. Кожекин А.В., Лашхи В.Л., Виппер А.Б. Влияние воды на противоизносные и противозадирные свойства трансмиссионных масел // Химия и технология топлив и масел. 1978. №4. С. 18-20.
8. Бардышев О.А., Гаркави Н.Г., Тесленко Н.Г. Техническая эксплуатация строительных машин на Севере. – Ленинград: Стройиздат. 1981. 184 с.
9. Прогнозирование хладостойкости конструкций и работоспособности техники на Севере / В. Р. Кузьмин, А. М. Ишков. – М.: Машиностроение. 1996. 303 с
10. Черский И.Н. Арктическая трибология // Машины, материалы и конструкции в арктических условиях: Международный сов.-сканд. семинар. – Якутск: ЯНЦ СО АН СССР. 1991. С. 16—18.
11. Климат и надежность машин / П.И. Кох. – М.: Машиностроение. 1981. 175 с.
12. Трение, изнашивание и смазка. Справочник: В 2 кн. / Под ред. И.В. Крагельского и В.В. Алисина. – М.: Машиностроение, Кн.1. 1978. 400 с.

ТРИБОЛОГИЧЕСКАЯ ШКОЛА М.М. ХРУЩОВА

Буяновский И.А., Хрущов М.М., Самусенко В.Д.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия; buyan37@mail.ru

В докладе кратко рассмотрены достижения развитой в ИМАШ РАН авторитетной научной школы по трибологии, возглавляемой выдающимся отечественным трибологом проф. М.М. Хрущовым. Для представителей этой школы характерны высокий уровень экспериментальных исследований, направленность на создание эффективных методов повышения износостойкости машин и механизмов в различных областях народного хозяйства.

Введение

История науки показала, что создать полноценную научную школу, вносящую весомый вклад в науку, может только такой учёный, который способен генерировать поистине новые плодотворные идеи и смог создать и возглавить коллектив единомышленников. Именно таким учёным, создавшим первую в ИМАШ авторитетную научную школу в области трибологии и до конца жизни возглавлявший эту школу, представители которой до сих пор активно работают на благо российского машиностроения, был заслуженный деятель науки и техники РСФСР, лауреат Государственной премии СССР, один из основателей Института машиноведения РАН, профессор, доктор технических наук Михаил Михайлович Хрущов, без ссылок на работы которого в наше время не обходится практически ни одна современная обстоятельная работа в области трибологии. Для этой школы характерна нацеленность на решение задач, актуальных для развивающегося отечественного машиностроения, высокий уровень экспериментальных исследований, повышенное внимание к созданию эффективных методов и средств исследований и измерений применительно как к лабораторным исследованиям, так и к деталям реальных машин и механизмов. В докладе кратко изложены результаты основных исследований Михаила Михайловича и его учеников, которые оказали заметное влияние на развитие отечественной и мировой трибологии.



Рис. 1. Михаил Михайлович Хрущов (1890-1972)

М.М. Хрущов (рождение школы)

Михаил Михайлович Хрущов родился 30 декабря 1890 г. в семье известного инженера М.М. Хрущова (старшего), в будущем создателя первых отечественных автомобилей [1]. После окончания реального училища учится в Московском университете, а затем в Императорском техническом училище (ныне МГТУ им. Баумана),

После начала Первой мировой войны работает в г. Орле на машиностроительном заводе его отца, где приобретает незаменимый опыт инженера-машиностроителя и организатора производства. На этом заводе он работает до 1925 г., когда переезжает в Москву и поступает в Научный автотранспортный институт (НАМИ), где вскоре возглавляет технологический отдел. О его научных интересах в то время свидетельствуют опубликованные им в 1928 г. книга “Производство авиационных моторов”, в 1934 г. справочник “Материалы деталей автомобилей и тракторов”, в 1935 г. монография “Поршневые кольца” и ряд других. В 1938, когда на основании Решения Президиума АН СССР и общего собрания АН от 29.10.1938 было издано Распоряжение № 210 по Отделению технических наук АН СССР от 10.11.1938 г. о создании Института машиноведения, он активно участвует в его организации, являясь учёным секретарём Комиссии по машиноведению, разработавшей Проект Института, одним из важнейших направлений его деятельности стало изучение процессов трения и износа в машинах. К тому времени стало ясно, что без развития науки о трении и износе машин невозможно обеспечить требуемую долговечность и надёжность машин и механизмов, которые были необходимы для бурно развивающегося отечественного машиностроения. Уже в 1939 г. М.М. Хрущов выступает на 1-ой Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах [2] с двумя докладами «Пластичные антифрикционные материалы», и «Основные положения к методам испытания на изнашивание», то есть уже тогда он определил основные направления своих будущих исследований, принёсших ему впоследствии мировую известность.

В 1940 г. М.М. Хрущов переходит в ИМАШ, где организует Отдел трения и износа, а позднее - Лабораторию износостойкости материалов. В её состав вошли его ученики и единомышленники,

А.Д. Курицына, Р.М. Матвеевский, А.П. Семёнов, М.А. Бабичев, Е.С. Беркович и др.

Это были талантливые учёные и под руководством М.М.Хрущова они внесли заметный вклад в отечественную и мировую трибологию.

Основные направления исследований школы М.М. Хрущова

Научные интересы и деятельность М.М. Хрущова на этом посту были чрезвычайно многогранны; они включали практически все актуальные для развития отечественного машиностроения проблемы трения, износа и смазки машин – всё то, что потом стало называться трибологией. Значительную роль в развитии трибологии в нашей стране сыграл цикл его работ по разработке методологии трибологических испытаний. Прежде всего была проведена классификация методов испытаний на изнашивание. Было установлено, что основным требованием к лабораторным методам является обеспечение постоянства условий на поверхности трения на протяжении всего эксперимента и на всех участках поверхности трения. Другим основным требованием к методике испытаний на изнашивание является обеспечение повторяемости результатов при повторении опыта.

Именно исходя из этих соображений были разработаны методики трибологических испытаний применительно к исследованиям различных видов изнашивания разных материалов. Так, в результате обширных исследований, проведённых М.М. Хрущовым и М.А. Бабичевым были выявлены фундаментальные закономерности, описывающие износостойкость материалов как функции нагрузки, скорости скольжения, размера зерна абразива, соотношения твёрдостей абразивных частиц и изнашиваемого материала, его физико-механических свойств, химического состава, структуры и состояния. Это фундаментальное исследование, сыгравшее важную роль в понимании механизма абразивного износа, было описано в знаменитой книге авторов “Исследование изнашивания металлов” [2] (1960 г.), которую заслуженно называют “библией трибологии”, и в её продолжении “Абразивное изнашивание” (1970 г.). Этот цикл работ был отмечен премией Президиума АН СССР (1955 г.). Классические исследования М.М.Хрущова в области исследования абразивного изнашивания обобщены в посмертно изданной статье “Закономерности абразивного изнашивания” в 1975 г. [3] Настольной книгой для исследователей в области антифрикционных материалов для подшипников скольжения стала фундаментальная монография М.М. Хрущова “Исследование приработки подшипниковых сплавов и цапф” [4], которая посвящена рассмотрению возможных методов экспериментальной оценки одной из основных характеристик антифрикционного

материала – его прирабатываемости. Здесь же исследуется эффект влияния чистоты отделки цапф на изнашивание антифрикционного материала, здесь же высказывается интереснейшая идея, что критическая температура по Блоку и переходная температура по Тейбору – это одна и та же предельная температура работоспособности смазочных материалов в трибологическом контакте. Характерно поведение М.М. Хрущова: он даёт Р.М. Матвеевскому задание проверить эту гипотезу экспериментально, а когда его гипотеза подтверждается, руководит его кандидатской диссертацией, итогом которой является температурный метод оценки смазочной способности масел и прибор для его реализации, который до сих пор применяется в исследовательской практике для оценки температурной стойкости смазочных материалов. Под руководством М.М. Хрущова был проведён цикл работ по установлению требований к антифрикционным сплавам и разработаны методы и инструментальные средства для оценки трибологических характеристик этих сплавов и антифрикционных покрытий. В лаборатории М.М. Хрущова А.П. Семёновым и др. также разработан отечественный вариант металл-фторопластовой ленты, который обеспечивал низкое трение и незначительную интенсивность изнашивания при отсутствии смазочного материала или при недостаточной смазке, который нашёл широкое применение в различных отраслях народного хозяйства. А.П. Семёновым также разработана энергетическая теория схватывания, которая позволяет управлять этим явлением в условиях трения и в технологических процессах соединения металлов «сваркой трением» и другими способами твёрдофазной сварки.

Большое внимание уделял М.М. Хрущов разработке надёжных и точных методов измерения износа и аппаратуры для реализации этих методов. Так М.М. Хрущов и его сотрудники научно обосновали и реализовали для точного измерения малых износов метод вырезанных лунок [5], позволяющий проводить эти измерения непосредственно на изнашиваемых деталях цилиндропоршневой группы двигателей внутреннего сгорания (модель 965), на направляющих скольжения станин металлорежущих станков (модель 966), шеек коленчатых валов (модель 967) и на зубьях шестерен. Указанные приборы были изготовлены заводом “Калибр” и до сих пор успешно применяются в практике измерений износа деталей ответственных узлов трения. Для воспроизведения трибологического процесса в лабораторных условиях М.М. Хрущов создал гамму лабораторных установок, принципы функционирования которых остаются актуальными даже в настоящее время.

Важнейшим направлением исследований М.М. Хрущова и его школы явились работы в

области такой характеристики материалов, как их микротвёрдость – как вдавливанием, так и царапанием [1, 6]. М.М. Хрущов совместно с Е.С. Берковичем и А.И. Бруновым создал первый отечественный микротвердомер ПМТ-2, который с 1946 г. серийно выпускался заводом «Калибр». Через год М.М.Хрущов и другие создатели этого прибора были награждены Государственной (Сталинской) премией. Позднее начали выпускать модернизированный вариант этого прибора, получивший название ПМТ-3, которым были снабжены сотни исследовательских лабораторий СССР. Результаты дальнейших исследований микротвёрдости материалов М.М. Хрущовым и его сотрудниками позволили измерить микротвёрдость таких материалов, как лёд и алмаз, а исследования микротвёрдости минералов, позволили связать такую их характеристику, как «твёрдость по Моосу» с микротвёрдостью при внедрении алмазной пирамиды. На базе исследований, проведённых в лаборатории М.М. Хрущова были созданы два прибора для измерения микротвёрдости по глубине отпечатка: интерференционный глубиномер для измерения микротвёрдости по глубине отпечатка и прибор с автоматической регистрацией нагрузки и глубины внедрения, который позволяет исследовать кинетику формоизменения материала под нагрузкой и при её снятии. Применение таких приборов существенно расширило возможности метода и превращает испытание на микротвёрдость в метод микромеханических испытаний, позволяющий оценивать такие микрохарактеристики исследуемых материалов, как упругое восстановление и ползучесть. Первый из этих приборов, интерференционный глубиномер, был награждён золотой медалью ВДНХ по итогам выставки “250 лет Академии наук”(1975 г.), а второй УПМ-1 – золотой медалью на Лейпцигской ярмарке (1985 г.) – уже после смерти Михаила Михайловича. Этот прибор, по авторитетному мнению акад. И.Г. Горячевой, “явился по существу прототипами всех современных нанотвёрдомеров” [1].

Результаты своих многочисленных исследований М.М.Хрущов изложил более, чем в 250 научных публикаций, включая 17 монографий, брошюр и производственных изданий. Многие из этих работ вошли в золотой фонд технической литературы по трибологии.

Необходимо отметить, что на всём протяжении своей научной деятельности М.М. Хрущов постоянно вёл активную научно-общественную работу, организуя многочисленные научные конференции и совещания в области трибологии, редактируя труды этих конференций. Он организовал Общественный Научный семинар по трению и износу в машинах, который продолжал функционировать много лет и с 1975 г. носил имя своего основателя.

С 1962 по 1970 г. М.М. Хрущов был членом экспертного совета ВАК, а в конце жизни – зам.

Председателя ТК Международной организации по стандартизации (ISO TC 123), занимавшейся разработкой терминологии по трибологии. Под его руководством был разработан ряд отечественных стандартов в области трибологии. Он также был членом редколлегии многочисленных журналов, включая известный международный журнал “Wear”. Примеру своего учителя последовали его ученики: так А.П. Семёнов много лет был членом Экспертного совета ВАК, а Р.М. Матвеевский в 80-тых – 90 гг. активно участвовал в работе ISO TC 123 «Подшипники скольжения» и даже был председателем советской части ISO TC 123 «Подшипники скольжения». Кроме того, он тоже стал членом редколлегии журнала “Wear”, а после смерти М.М. Хрущова руководил Научным семинаром им. М.М. Хрущова до 2001 г.

После смерти М.М.Хрущова из “Лаборатории Износостойкости материалов” выделились две лаборатории: “Лаборатория исследования износа при высоких температурах”, которую возглавил А.П.Семёнов, и “Лаборатория исследования износа при граничной смазке”, которую возглавил Р.М. Матвеевский. Ученики М.М. Хрущова успешно продолжили исследования, которые начали при жизни своего великого учителя.

В заключение этого доклада, посвящённого научной школе М.М. Хрущова., хотелось бы упомянуть об отношении к нему научной общественности. Он пользовался колоссальным авторитетом, как в научной среде, так и среди инженеров самых разных специальностей. Один из авторов настоящего доклада поступил в аспирантуру Лаборатории износостойкости материалов именно потому, что столкнулся с тем поразительным пиететом, с которым относились к М.М. Хрущову инженеры-буровики. Несомненно, этому способствовал не только его репутация выдающегося учёного и организатора науки, но также его человеческие качества, его исключительная доброжелательность, готовность помочь молодым учёным, поразительное умение найти каждому научному работнику работу по его возможностям и в то же время по его интересам, что всегда привлекало к нему молодых трибологов. Под его руководством или при его консультации было защищено 10 докторских и 24 кандидатских диссертации. Перечислить трибологов со всех концов СССР, выступивших на заседаниях Научного семинара по трению и износу в машинах с сообщениями о своих исследованиях и получивших советы и рекомендации М.М. Хрущова едва ли возможно.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0023

1. Хрущов М.М. Трение, износ и микротвёрдость материалов: Избранные работы (к 120-летию со дня рождения) - М.: - КРАСАНД, 2012. – 512 с.

2. Хрущов М.М., Бабичев М.А. Исследование изнашивания металлов. – М.: Изд-во АН СССР. 1960.— 352 с.
3. Khrushchov M.M. Principles of abrasive wear.//Wear. 1974. Т. 28. № 1. – С. 69-88.
4. Хрущов М.М. исследование приработки подшипниковых сплавов и цапф. – М.-Л.: Изд.-во АН СССР.1946. 160 с.
5. Хрущов М.М., Беркович Е.С. Определение износа деталей машин методом искусственных баз. – М.: Изд-во АН СССР. – 1959. – 218 с.
6. Хрущов М.М., Беркович Е.С. Микротвёрдость, определяемая методом вдавливания. – М.-Л.: Изд-во АН СССР.1943 – 32 с.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ЭЛАСТОМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СКОЛЬЖЕНИИ

Веденеев М.С.¹, Шилов М.А.^{1,2}

E-mail: ¹ maksimvedeneev@mail.ru; ² mshilov@yandex.ru.

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», Иваново, Россия.

ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет», Киров, Россия

Представлена математическая модель, позволяющая прогнозировать величину износа в зависимости от внешних факторов (скорости скольжения, нормальной нагрузки), а также учитывающая влияние демпфирующих свойств термопластических полимерных материалов на фрикционные свойства пар трения.

Введение

В современной литературе опубликовано большое количество моделей процессов изнашивания, которые представляют собой зависимости интенсивности изнашивания от определяющих факторов процесса [1,2,3]. Инженеры-трибологи используют эти модели при проектировании узлов трения, прогнозировании их износа и оптимизации конструктивных, технологических и других характеристик. Закономерности износа могут быть использованы в практической работе, если известны алгоритмы определения их параметров. Именно количественные значения позволяют оценить влияние определяющих факторов (давление, температура, скорость) на триботехнические характеристики пары трения, которые устанавливаются только опытным путем по результатам испытаний. Такая последовательность действий позволяет приблизить математическую модель износа к реальным условиям работы узла трения.

Методы определения параметров моделей изнашивания разрабатываются на основе решения обратных задач изнашивания (т.е. когда зависимости для расчета параметров определяются по принятой математической форме закона изнашивания, геометрическим соотношениям (условиям непрерывности в контакте), условиям равновесия. Чем больше определяющих факторов в модели, тем сложнее ее решение [4].

В настоящее время существует проблема износа материалов пар трения, работающих в агрессивных средах. В качестве триботехнических материалов при изготовлении узлов трения используют коррозионностойкие стали, углеродистые стали с защитными покрытиями, полимеры, керамики, стекло, эластомеры и другие материалы, химически стойкие к действию агрессивных сред. Среди всего многообразия существующих материалов менее изученными, но наиболее перспективными являются материалы пары трения чугуна-термоэластопласт.

В связи с вышеописанным, цель работы заключается в разработке математической модели, позволяющей определить влияние структурных

особенностей термоэластопластичных материалов на величину интенсивности изнашивания при трении скольжения в паре с серым чугуном в условиях смазки.

Модель

В качестве схем испытаний выбирали те, в которых контактное давление изменяется за счет изменения площади контакта. Такое изменение позволяет получить результаты в некотором диапазоне давлений по результатам испытаний одного образца. Схемами для таких испытаний являются: «четырёх шариковая схема», «шарик-кольцо», «конус-кольцо», «цилиндры с перекрещенными осями», «цилиндр-плоскость», «шарик-плоскость» и другие. В нашем случае для испытаний принята схема, которая по геометрическим и технологическим особенностям наиболее соответствует схеме трибомумфты.

Модели износа, полученные по четырех шариковой схеме, следует использовать для оценки износостойкости соединений, в которых контакт осуществляется по линии или в точке (шестернях, кулачковых механизмах), т.е. с малыми размерами площади контакта. Для соединений, в которых размеры площадки контакта соизмеримы с размерами контактирующих тел [2] (подшипники скольжения, шарикоподшипники), следует применять другие схемы испытаний: «конус-кольцо», «шарик-кольцо», с помощью которых можно более адекватно описать реальный контакт.

В работе проводилось моделирование износа по схеме «сферический индентор-диск» при вращении диска. Для описания канавки износа, формируемой шариком по диску использована закономерность изнашивания в виде безразмерного комплекса определяющих факторов (контактное давление и скорость скольжения) [3,4]:

$$\frac{du_w}{ds} = f_{тр} C_w \left(\frac{p}{HB} \right)^n \left(\frac{v_{ск} R^*}{v} \right)^q \quad (1)$$

где u_w – глубина износа вращающегося термоэластопластичного полимерного диска; s – путь трения; $f_{тр} = f(\alpha, \Delta T)$ – коэффициент трения в

паре шар-диск (α – структурный параметр, учитывающий особенности строения термопластичного эластомерного материала, ΔT – диапазон температур, при которых износ термопластичного эластомерного материала линеен); p – нормальное контактное давление (по Герцу); HB – твердость более мягкого материала пары трения; $v_{ск}$ – скорость скольжения шарика по диску; R^* – приведенный радиус шарика и плоской части диска (равен радиусу самого шарика); v – кинематическая вязкость смазочного материала; C_w, n, q – параметры износостойкости.

Примем форму изношенной поверхности диска в виде кругового сектора с радиусом профиля a (рис.1).

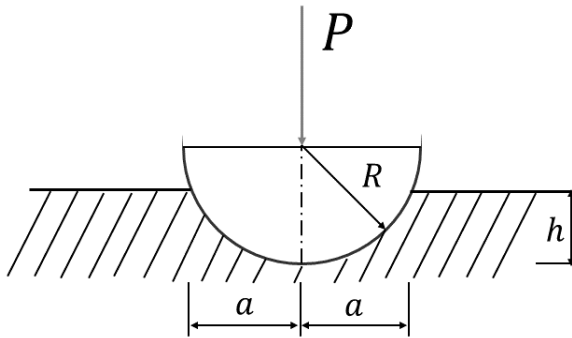


Рис.1 Схема контакта «шарик-плоскость»:
 P – нагрузка; a – полуширина контакта;
 R – радиус шарика

Будем также считать, что контактное давление под изнашиваемым шариком на неизнашиваемой поверхности распределено равномерно:

$$p = \frac{P}{\pi a^2} \quad (2)$$

В случае контакта шара с плоскостью диска максимальный износ определяется выражением:

$$u_w = \frac{a^2}{2R} \quad (3)$$

где R это радиус шара. Представим экспериментальную зависимость радиуса усеченной сферы в виде степенной аппроксимирующей функции:

$$a(s) = cs^\beta \quad (4)$$

где c и β – параметры аппроксимации, которые определяются по результатам испытаний на износ. Интегрируя уравнение износа (1) по пути трения, получаем интегральный вид модели износа шара:

$$u_w(s) = f_{тр} C_w \int_0^s \left(\frac{p(s)}{HB} \right)^n \left(\frac{v_{ск} R^*}{v} \right)^q ds \quad (5)$$

Подставив выражение для износа в левую часть полученной зависимости $u_w(s)$ справа – выражение для контактного давления (3), получим:

$$\frac{a^2(s)}{2R} = f_{тр} C_w \int_0^s \left(\frac{P}{(\pi a^2(s) HB)} \right)^n \left(\frac{v_{ск} R^*}{v} \right)^q ds \quad (6)$$

с учетом (4) после интегрирования (6) получим:

$$\frac{c^2 s^{2\beta}}{2R} = f_{тр} C_w \left(\frac{P}{(\pi c^2) HB} \right)^n \left(\frac{v_{ск} R^*}{v} \right)^q \frac{s^{1-2\beta n}}{1-2\beta n} \quad (7)$$

Из условия выполнимости уравнения (7) для всех значений s следует:

$$2\beta = 1 - 2\beta n, \quad (8)$$

где:

$$n = \frac{1 - 2\beta}{2\beta}. \quad (9)$$

Для определения параметра q необходимо проведение испытаний при двух значениях скорости скольжения $v_{ск1}$ и $v_{ск2}$, из которых получаем две группы экспериментальных данных с аппроксимирующими функциями:

$$\begin{aligned} a_1 &= c_1 s^\beta, \\ a_2 &= c_2 s^\beta \end{aligned} \quad (10)$$

Здесь рассматривается задача определения параметров износа по результатам испытаний образцов с изменяющейся в процессе изнашивания площадью контакта. Изменение зоны износа вызывает изменение значений контактных давлений. Выражение показателя степени n в уравнении (9) характеризует скорость изменения контактных давлений в процессе изнашивания и связано с показателем a экспериментальной зависимости (10), характеризующей скорость изменения площади контакта во время износа. Объединение n и β в принятой схеме износа (1) однозначно описывается соотношением (10). Поскольку в рассматриваемых соотношениях скорость скольжения $v_{ск}$ не зависит от пути трения s , то она не влияет на параметры n и β в процессе испытаний. В этом случае изменение скорости скольжения $v_{ск}$ влияет только на масштаб коэффициента C_w в выражении (1). Вышеизложенные рассуждения подтверждаются результатами испытаний. Подставив выражения (10) в (7), получим систему уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{c_1^2 \beta}{R} &= f_{тр} C_w \left(\frac{P}{c_1^2 \pi HB} \right)^n \left(\frac{v_{ск1} R^*}{v} \right)^q \\ \frac{c_2^2 \beta}{R} &= f_{тр} C_w \left(\frac{P}{c_2^2 \pi HB} \right)^n \left(\frac{v_{ск2} R^*}{v} \right)^q \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Разделив первое уравнение на второе, после преобразований получим:

$$(c_1/c_2)^{2n+2} = (v_{ск1}/v_{ск2}) \quad (12)$$

где:

$$q = (2n + 2) \frac{\lg \left(\frac{c_1}{c_2} \right)}{\lg \left(\frac{v_{ск1}}{v_{ск2}} \right)} \quad (13)$$

Для определения коэффициента C_w воспользуемся одним из уравнений (3.12):

$$C_w = \frac{\beta c_1^{2n+2}}{f_{тр} R} \left(\frac{\pi H B}{P} \right)^n \left(\frac{v}{v_{ск1} R} \right)^q \quad (14)$$

Таким образом, уравнения (9), (13) и (14) позволяют определить параметры рисунка изнашивания в принятом виде (1).

Анализ результатов моделирования

Проведем расчет параметров модели и построение функциональной зависимости глубины износа от скорости скольжения для изученной пары трения и индустриального масла И20-А. По данным фрикционных испытаний средняя величина динамического коэффициента трения при нагрузке 70 Н составила 0,04. Радиус шарика – 5 мм, твердость наиболее мягкого материала 441,45 МПа, удельное давление – 35 МПа, скорость скольжения $v_{ск1} = 10$ мм/с, $v_{ск2} = 15,4$ мм/с, кинематическая вязкость индустриального масла при 40 °С – 31,5 мм²/с. По данным профилометрии функция a имеет вид параболы, поэтому коэффициент $\beta = 2$. Подставив значение параметра β в (13) находим величину $n = -3/4$. Для нахождения остальных параметров воспользуемся экспериментальными данными: $a_1 = 1/3s^2$; $a_2 = 1/4s^2$. Используя эти параметры и начальные данные находим недостающие коэффициенты $q = -0,316$; $C_w = 0,36$.

Таким образом, итоговое уравнение для описания зависимости величины глубины износа можно получить, последовательно фиксируя сначала скорость скольжения, а затем нормальную нагрузку.

$$\begin{aligned} u_w(s) &= const \cdot (P)^{-\frac{3}{4}}, \\ u_w(s) &= const \cdot (v_{ск})^{-0,316} \end{aligned} \quad (15)$$

С целью верификации разработанной модели нами было проведено сравнение результатов моделирования и данных, полученных в эксперименте (рис. 2).

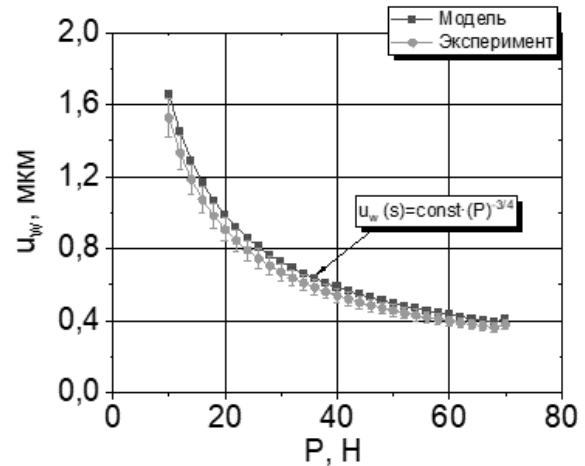


Рис. 2. Сравнение данных моделирования и эксперимента при фиксированной скорости 10 мм/с.

Заключение

В результате моделирования получены выражения, позволяющие описать глубину износа при трении пары шар-плоскость вращающегося диска. При сравнении результатов моделирования и эксперимента следует отметить, что разработанная математическая модель не противоречит экспериментальным данным в рамках погрешности при нагрузке от 20 Н. Погрешность составила 7,5 %.

Работа выполнена в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект №. FZZM-2023-0009, руководитель проф. Н.В. Усольцева)

1. Щерба, В.Я., Кириленко В.П., Прушак, В.Я., Зайцев А.Л. Триботехнические характеристики полимерных материалов и композитов на их основе при трении в водных средах, содержащих свободный абразив // Трение и износ. – 1996. – Т. 17. - № 4. – С. 559 – 563.
2. Halder, A.K., Singh S. and others. Vibration characteristics of thermoplastic composite. AIP Conf. Proc. 2011. – Vol. 1414. pp. 2011 – 2014.
3. Panin, S.V., Nguyen D.A., Komienko L.A., Buslovich D.G., Lerner M.I. Mechanical and tribological properties of thermoplastic polyetheretherketone based nanocomposites. AIP Conf. Proc. 2020. – Vol. 2285. pp. 040006.
4. Zheng, Z. Zhang X., Dong C., Bai X., Yuan C., Wu Y. Effect of molybdenum disulfide (MoS₂) particle size on tribological and vibration reduction properties of thermoplastic polyurethane. Tribology Transactions, 2024, vol. 67 (6), pp. 1208 – 1221.
5. Геккер, Ф.Р. Динамика машин, работающих без смазочных материалов в узлах трения. М.: Машиностроение, 1983. – 280 с.
6. Крагельский, И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
7. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; под общ. Ред. А.В. Чичинадзе. – М. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.; ил.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗГИБА СТАЛЬНОГО СТЕРЖНЯ ПОСЛЕ ТЕРМООБРАБОТКИ ДВИЖУЩИМСЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ИСТОЧНИКОМ

Веремейчик А.И.

Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь; vai_mrtm@bstu.by

В среде ANSYS Workbench проведено компьютерное моделирование испытаний стального стержня с зонами измененной структуры материала на изгиб. Исследовано напряженно-деформированное состояние стержня с одной и двумя зонами при варьировании модуля упругости и коэффициента Пуассона обработанной и промежуточной зон.

Проведено исследование поведения плоских образцов из коррозионностойкой стали 40Х13 после лазерно-плазменной обработки при испытаниях на растяжение и изгиб. Обработка проводилась с помощью волоконного иттербиевого лазера непрерывного действия ЛК-1000 со сканирующей системой. Дорожки шириной 4 мм наносились вдоль одной или с двух сторон образца с размерами $b \times h \times l = 20 \times 7 \times 200$ мм, число дорожек варьировалось от одной до шести. По результатам испытаний на изгиб установлено, что наличие лазерного воздействия приводит к уменьшению прогиба образца, достигнутого перед разрушением, и увеличению уровня воспринимаемой максимальной нагрузки. Результаты испытаний легированных и закаленных образцов показали снижение пластичности материала после лазерной обработки при одновременном увеличении максимальных воспринимаемых нагрузок, причем более существенное изменение свойств материала получено при лазерной закалке. Разрушение образцов имеет ярко выраженный хрупкий характер путем отрыва от действия продольных нормальных напряжений [1].

По результатам механических испытаний образцов из стали 40X13 после лазерно-плазменной обработки на изгиб установлено, что в сечениях образцов отчетливо просматриваются зоны измененной структуры материала – зона целевого воздействия и окружающая ее зона термического влияния, в которых ввиду локальности и объемной неравномерности нагрева имеют место значительные изменения фазового и структурного состояния металла (рис. 1) [2].

материала без учета изменения свойств материала этих зон не влияет на напряженно-деформированное состояние образца [2]. Данные о свойствах материала в этих областях ограничены, однозначных аналитических зависимостей между их механическими характеристиками не установлено, поэтому имеет место большая неопределенность в их значениях, что является существенным недостатком при прогнозировании поведения реального объекта в условиях эксплуатации. Проводимые отечественными и зарубежными учеными исследования в области свойств образцов после модифицирования поверхностного слоя локальным источником нагрева направлены в основном на установление характера структурных превращений и твердости материалов, а результаты изучения механических характеристик материала обработанной зоны, в частности, модулей упругости и коэффициентов Пуассона, представлены недостаточно. Соответственно не в полной мере представлены результаты исследований влияния возникающих различий этих показателей на напряженно-деформированное состояние (НДС) деталей машин. Влияние материала зон термообработки удобно характеризовать через коэффициенты концентрации напряжений. В предположении упругой работы материала проведено численное моделирование напряженно-деформированного состояния обработанных образцов (NASTRAN, ANSYS Workbench) при варьировании величинами модуля упругости, коэффициента Пуассона и предела текучести. В [3] представлены результаты такого исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) обработанных образцов при их растяжении для случаев, когда зона трансформированной структуры представляет собой прямоугольник, полукруг или сегмент круга. Установлено, что НДС образца зависит от размеров зон трансформированной структуры и направления изменения механических характеристик материала, что приводит к концентрации напряжений, для которой определены возможные границы изменения коэффициентов концентрации сравнительно со случаями нагружения материала исходной структуры. Проведено моделирование деформирования стержня при изгибе с размерами $b \times h \times l$ с зонами обработанного материала сечением в форме полукруга радиусом 0,4 мм, окруженного

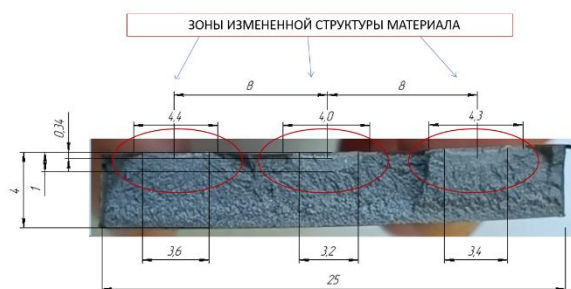


Рис. 1. Структура материала в сечении разрушения образца

Результаты моделирования в ANSYS Workbench показали, что наличие зон измененной структуры

промежуточной серповидной зоной термического влияния толщиной 0,2 мм (рис. 2), расположенными вдоль всей длины образца.

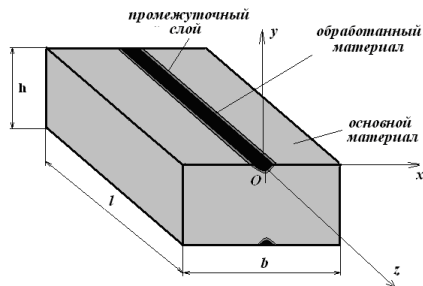


Рис. 2. Модель образца для испытаний

Модуль упругости основного материала («bas») принимался равным $E = E_{bas} = 200$ ГПа, коэффициент Пуассона $\mu = \mu_{bas} = 0,3$. Модули упругости промежуточного («int») и обработанного («pr») слоев и их коэффициенты Пуассона варьировались. Отношение модулей упругости и коэффициентов Пуассона обработанного материала к значениям для исходного материала изменялось в пределах $K_E = E_{pr}/E_{bas} = K_\mu = \mu_{pr}/\mu_{bas} = 0,6 \dots 1,5$. Рассматривалось НДС тела в установившемся тепловом режиме.

Модель испытаний образцов на изгиб соответствовала реальному эксперименту [1]. Образец располагался на 2-х цилиндрических валиках с расстоянием между центрами 170 мм, а посередине прикладывалась нагрузка (рис. 3).

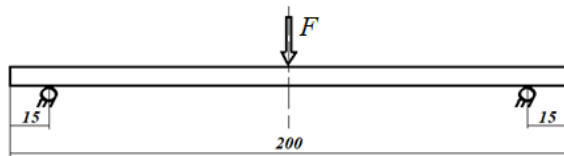


Рис. 3. Схема испытаний

С учетом симметрии рассматривалась половина образца. В компьютерной модели середина образца заземлялась с помощью команды Fixed Support, другому концу сообщалось вертикальное перемещение, равное 5 см. Использовалась билинейная диаграмма деформирования, приведенная на рис. 4.

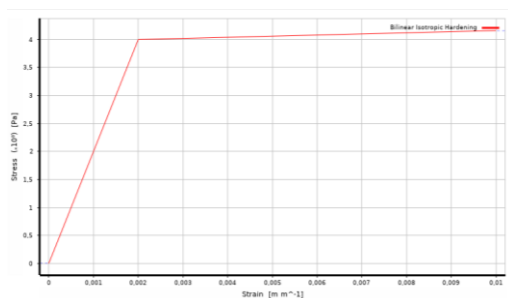


Рис. 4. Диаграмма деформирования исходного материала

Исследовано напряженно-деформированное состояние образцов из исходного материала и с зоной измененной структуры. На рис. 5–9 приведено распределение напряжений и деформаций на поверхности образца при $E_{bas} = 200$ ГПа, $E_{int} = 220$ ГПа, $E_{pr} = 240$ ГПа, $\mu_{bas} = \mu_{int} = \mu_{pr} = 0,3$.

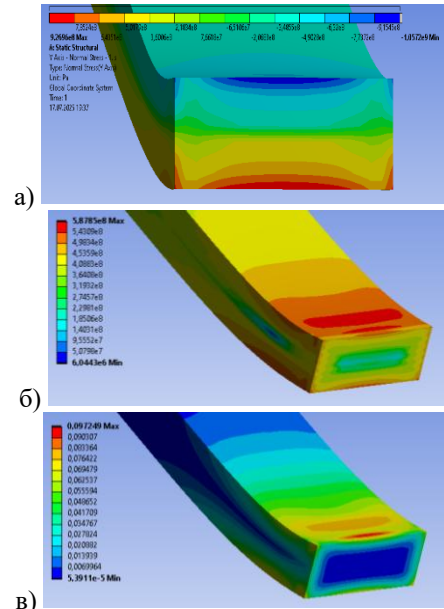


Рис. 5. Распределение нормальных напряжений (а), эквивалентных напряжений по Мизесу (б) и эквивалентных деформаций (в) для неробработанного образца

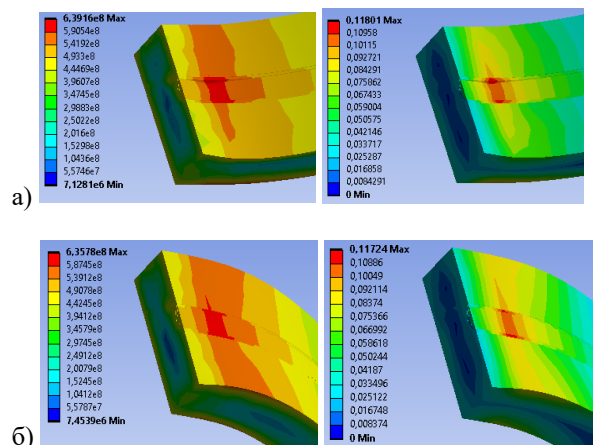
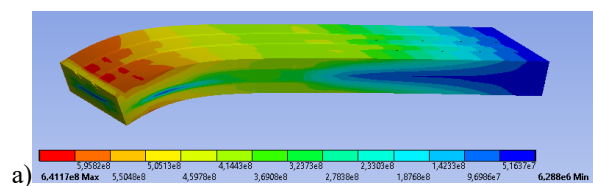


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу и эквивалентных деформаций для образца с дорожкой в сжатой (а) и растянутой (б) зонах, шаг сетки 1 мм



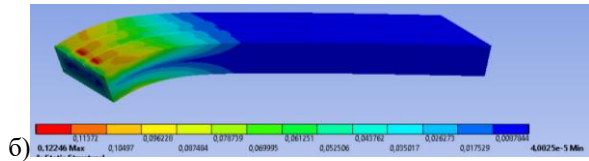


Рис. 7. Распределение эквивалентных напряжений по Мизесу (а) и эквивалентных деформаций (б) для образца с двумя дорожками в растянутой зоне

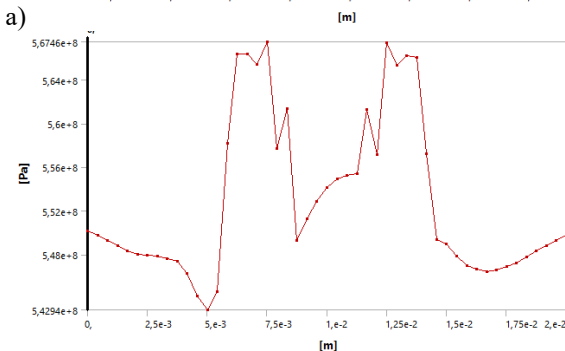
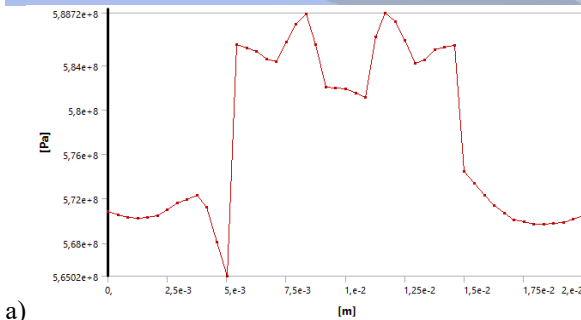
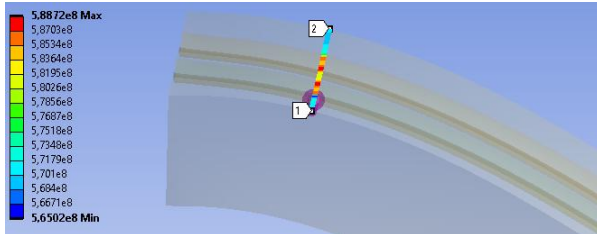


Рис. 8. Зависимость эквивалентных напряжений от ширины на поверхности (а) и глубине 0,5 мм для образца с двумя дорожками в растянутой зоне

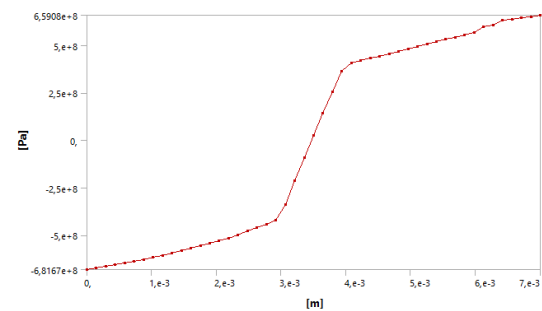
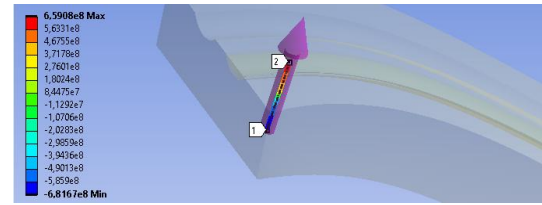


Рис. 9. Зависимость нормальных напряжений σ_y от высоты для образца с двумя дорожками в растянутой зоне

Результаты исследований показывают, что при даже незначительном изменении механических характеристик материала в зоне термообработки напряжения и деформации в стержне возрастают.

Работа выполнена в рамках задания 3.2.8 НИР № 1 «Исследование механических свойств элементов деталей машин после лазерно-плазменной обработки» ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии» (Республика Беларусь) (№ ГР 20212123, 2021–2025 г.).

1. Веремейчик, А. И. Влияние лазерной закалки и легирования на прочность образцов из стали 40X13 / А. И. Веремейчик, Б. Г. Холодарь // Перспективные материалы и технологии / под общ. ред. В. В. Рубаника. – Минск : ИВЦ Минфина, 2025. – Гл. 21. – С. 286–300.
2. Verameichyk, A. I. Experimental research and computer modeling of the stress-strain state of steel samples subjected to laser exposure / A. I. Verameichyk, B. G. Holodar // Proceedings of the VIII International symposium on tribo-fatigue, 11–16 august 2025, Harbin, China. – P. 260–270.
3. Веремейчик, А. И. Напряженно-деформированное состояние стальных образцов после термообработки движущимся источником нагрева / А. И. Веремейчик, М. В. Нерода, В. М. Хвисевич, Б. Г. Холодарь // Актуальные проблемы прочности / Андреев В.А. [и др.] ; под ред. В. В. Рубаника. – Минск: ИВЦ Минфина, 2024. – Гл. 18. – С. 382–397.

ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КАВИТАЦИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ УСЛОВИЙ СМАЗЫВАНИЯ ВОДОЙ ЖИДКОСТНЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

Воронин Н.А.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; voroninn@inbox.ru

Проведен анализ полученных в данной и предыдущих работах автора результатов экспериментальных модельных испытаний. Обосновывается перспективность применения кавитационно-волновой технологии смазывания жидкостных упорных подшипников скольжения.

Цель

В машиностроении и других отраслях промышленности широко используются жидкостные подшипники скольжения. В ряде случаев, для высокоскоростных опор скольжения используется вода, которая обеспечивает более интенсивный отвод тепла из зоны трения. В таких узлах часто возникает локальная (местная) кавитация. Кавитация, создавая области с субатмосферным давлением, приводит к эрозии поверхностей трения. Текстура на поверхностях трения приводит к образованию кавитационных областей, но обеспечивает при этом снижение сил трения и повышение несущей способности.

Газогидродинамические потоки жидких сред, созданные в результате кавитации, обладают рядом уникальных свойств, позволяющих их использовать для интенсификации ряда технологических процессов [1]. Это связано с тем, что волновые и колебательные движения многофазных жидких сред оказывают сильное влияние на их состав, состояние и дисперсность. Технологические процессы, основанные на кавитации, могут быть использованы для создания мощных дополнительных давлений, например, для многократного усиления статического давления в замкнутых объемах многофазных жидких сред, управлении движением жидкости и газов в ограниченном пространстве [1].

Современные исследования применения искусственно созданной (например, текстурированием поверхностей трения) кавитации в реальных объектах трения либо основаны на теоретических подходах, которые недостаточно компетентны для рассмотрения такого сложного процесса как кавитация, либо на экспериментальных исследованиях, которые определяют конечную эффективность процесса под действием совокупности факторов кавитации. В то время как для обеспечения максимальной эффективности процесса необходимо выявить и понять действие каждого фактора в отдельности, чтобы правильно подобрать режимы и условия воздействия для конкретного узла трения [2].

Данная работа является продолжением предыдущих работ автора [3, 4], которые были направлены на изучение свойств потоков воды, получаемых искусственно созданной кавитацией внутри узкого протяженного канала. Конкретным направлением данной работы является анализ

полученных в данной и предыдущих работах автора результатов исследования для обоснования перспективности применения кавитационно-волновой технологии в трибоузлах вообще и, в частности в жидкостных упорных подшипниках скольжения.

Материалы и методы

Исследование закономерностей изменения величины и характера распределения статического давления газогидродинамического потока жидкой среды, создаваемого искусственной гидродинамической кавитацией внутри узкого протяженного канала, проводилась на специальном модельном устройстве, которое навешивалось на испытательный стенд для оценки работоспособности насосных секций погружных лопастных насосов. Модельное устройство, имитировало гидродинамический канал упорного подшипника скольжения, заполненный смазочной жидкостью (водой) в начальный момент его работы.

Программа исследования предусматривала анализ изменения величины статического давления газогидродинамического потока и его распределения вдоль канала, вида газожидкостного потока, количество протекаемой жидкости, величину шума кавитации и температуры потока в канале в зависимости от входного давления воды, расхода балластной воды и объема вводимого в канал воздуха при постоянном значении гидродинамического давления на выходе из колбы. Проводилась валидация полученных параметров имитационной кавитационно-волновой технологии применительно к упорным жидкостным подшипникам скольжения.

Конструкция модельного устройства, приборная обвязка его в сочетании с конструктивными элементами штатного испытательного стенда, режимы испытаний и контролируемые в испытаниях свойства и параметры газожидкостного потока подробно рассмотрены в работе [3].

Анализ проводился для результатов испытаний, полученных для значения входного давления воды в кавитатор 13,4 атм. Значение входного давления в 13,4 атм. было принято, как оптимальное значение для данной конструкции канала модельного устройства. Оптимальность значения этого режима была обусловлена достижением в экспериментах приемлемых значений двух свойств

газожидкостного потока, и, на взгляд экспериментатора, достаточных для расширения набора входных режимных параметров и продолжения экспериментальных исследований.

Таковыми свойствами являлись однородность значения гидростатического давления по величине и однородность цвета и вида потока вдоль всей длины канала при минимально возможной для данного модельного устройства величине входного давления воды, подаваемой в кавитатор. Введение балластной воды и воздуха осуществлялось за счет эффекта

$$Q_{\text{БВ}} = S \cdot \sqrt{\frac{2(P_{\text{атм}} - P_{\text{канала}})}{\rho_{\text{воды}}}}$$

Вид (строение и свечение) кавитационного потока устройства фиксировались визуально и фотографированием. Шум стенда и кавитации в модельном устройстве оценивался оператором на слух и регистрировался в виде спектрограмм и оценивался в –дБ (относительное звуковое давление).

Матрица значений исходных и регистрируемых

Таблица 1. Исходные, регистрируемые и расчетные параметры

n, об/мин	p _{вх} , атм	p ₀ , атм	p ₁ , атм	p ₂ , атм	p ₃ , атм	p ₄ , атм	p ₅ , атм	p ₆ , атм	p ₇ , атм	p _{ср} , атм	Q _{вх} , м3/сутки	Q _{БВ} , м3/сутки	Q _{БВ} , мм. вод. столба	Q _{воздуха} , л/мин	Вводы воздуха
Длина канала L															
Позиции мановакууметров		L ₀ =0,05L	L ₀ =0,1L	L ₂ =0,23L	L ₃ =0,35L	L ₄ =0,48L	L ₅ =0,6L	L ₆ =0,73L	L ₇ =0,95L						
2000	1,0	0	-0,10	-0,05	-0,07	-0,04	-0,03	-0,03	-0,04	-0,04	10,3	0	0	0	-
5000	7,8	0	-0,45	-0,41	-0,28	-0,19	-0,16	-0,15	-0,15	-0,20	23,0	0	0	0	-
6500	13,4	0	-0,99	-0,89	-0,97	-0,98	-0,97	-0,96	-0,88	-0,74	28,2	0	0	0	-
подключаем балластную воду															
6500	13,4	0	-0,34	-0,40	-0,56	-0,54	-0,55	-0,52	-0,38	-0,39	28,2	19,0	150	0	-
подключаем воздух															
6500	13,4	0	-0,28	-0,52	-0,48	-0,48	-0,46	-0,44	-0,34	-0,33	28,2	19,8	185-189	2	L ₀
6500	13,4	0	-0,26	-0,50	-0,47	-0,45	-0,44	-0,41	-0,32	-0,32	28,2	20,0	199-204	4	L ₀
6500	13,4	0	-0,25	-0,48	-0,46	-0,44	-0,43	-0,39	-0,32	-0,31	28,2	20,1	198-215	6	L ₀
6500	13,4	0	-0,24	-0,44	-0,44	-0,44	-0,42	-0,37	-0,32	-0,30	28,2	20,3	197-215	8	L ₀
6500	13,4	0	-0,43	-0,48	-0,37	-0,35	-0,35	-0,32	-0,38	-0,30	28,2	20,3	182-185	2	L ₀ + L ₇
6500	13,4	0	-0,35	-0,40	-0,32	-0,30	-0,30	-0,28	-0,33	-0,25	28,2	20,9	193-203	4	L ₀ + L ₇
6500	13,4	0	-0,31	-0,38	-0,29	-0,26	-0,27	-0,24	-0,30	-0,23	28,2	21,3	200-210	6	L ₀ + L ₇
6500	13,4	0	-0,28	-0,36	-0,26	-0,23	-0,23	-0,22	-0,28	-0,21	28,2	21,5	196-212	8	L ₀ + L ₇
6500	13,4	0	-0,20	-0,31	-0,42	-0,36	-0,38	-0,33	-0,23	-0,25	28,2	21,0	210-230	15	L ₀
6500	13,4	0	-0,15	-0,23	-0,35	-0,27	-0,30	-0,25	-0,20	-0,19	28,2	21,7	180-210	20	L ₀
6500	13,4	0	-0,35	-0,25	-0,38	-0,35	-0,35	-0,25	-0,12	-0,23	28,2	21,3	220 - 250	20	L ₀ + L ₇

эжекции, в связи с наличием субатмосферного давления в канале модельного устройства. Обоснованием выбранного значения величины входного давления для данного модельного канала было проведено в работе автора [3] при проведении испытаний в диапазоне изменений входного давления воды от 1 атм. до 15 атм. без присутствия балластной воды и воздуха. Необходимость введения балластной воды в эксперимент было обусловлено необходимостью моделирования нахождения реального упорного подшипника в смазочной среде до начала работы перед пуском. Дальнейшие экспериментальные исследования проводились в присутствии балластной воды и воздуха. Балластная вода эжектировалась в канал модельного устройства через 7 вводов диаметром 5 мм, равномерно расположенных вдоль длины канала. Воздух эжектировался в канал через те же 7 вводов с возможностью регулирования объема ротаметром и местом ввода. В экспериментальном исследовании добавление воздуха проводилось при шести режимах расхода 2 л/мин, 4 л/мин, 6 л/мин, 8 л/мин, 15 л/мин и 20 л/мин. Для ряда режимов варьировалось количество мест ввода воздуха и их расположение в канале модельного устройства. Объем расхода воды оценивался расчетным путем по формуле:

параметров представлена в таблице.

Результаты и обсуждение

Уже на первой ступени режима (см. табл.), при входном давлении воды 1,0 атм. (2000 об/мин) испытаний отмечается появление звуковых колебаний, характеризующего возникновение кавитации в струе жидкости. Дальнейшее повышение входного давления приводит к появлению облака пузырьков (известное в литературе как пузырьковая кавитация) в виде удлиненного по форме факела. В начале это пузырьковое облако небольшой длины, но по мере увеличения входного давления длина облака увеличивается. Возрастает интенсивность шума кавитации. При входном давлении в районе 7,8 атм. (5000 об/мин) пузырьковое облако заполняет все сечение канала и достигает 1/3 длины канала.

На всей длине канала для всех ступеней режимов испытаний статическое давление ниже атмосферного и снижается с ростом значения входного давления. При дальнейшем повышении входного давления воды пузырьковое облако ускоренно увеличивается на всю длину канала. При этом громкость кавитационного шума повышается. При достижении входного давления 13,4 атм. (6500 об/мин) свечение пузырькового облака усиливается, становится более однородным. Значения статического давления по длине канала

выравниваются по величине (см. табл.).

Особое внимание заслуживает эффект скачкообразного понижения статического давления (разряжения) вдоль канала колбы с повышением входного давления (см. табл. – при 7,8 атм. и выше). Такое поведение может быть объяснено наличием стесненных условий распространения газопарожидкостного потока в канале модельного устройства. Щелевая конструкция канала модельного устройства приводит к перенасыщению образующихся в объеме активных пузырьков, своего рода реакторов с огромной энергией, которая выделяется при их взрывах и которые активируют более пассивные в энергетическом состоянии пузырьки воздуха и пара по пути движения газодинамического потока. При входном давлении 13,4 атм. отмечается максимальный во величине шум кавитации, свидетельствующий о высоком эрозионном воздействии газожидкостного потока и динамическом характере этого потока. Значение относительной интенсивности звуковых колебания кавитации соответствует - 13 дБ (см. табл.).

Исследование влияния присутствия балластной воды в канале модельного устройства показало, что газодинамический поток реализуется при значительно меньших значениях статического давления, оставаясь практически однородным вдоль всего канала. Значения статического давления в среднем составляет 50% от средних значений статического давления (см. табл.) без эжекции воды. Интенсивность и тональность шума кавитации при испытаниях в присутствии балластной жидкости, по мнению оператора, была несколько меньше, чем для режима без балластной воды жидкости. Вид газожидкостных потоков в канале колбы в присутствии балластной жидкости также отличается от вида потока в отсутствии балластной жидкости. Свечение канала более яркое и более однородное по длине канала. Использование балластной жидкости на сказывается на значении объема расхода прокачиваемой воды через модельное устройство (см. табл.).

Введение воздуха в канал модельного устройства существенно увеличивает в среднем значения статического давления вдоль канала колбы (см. табл.). Абсолютные значения статического давления зависит от величины расхода воздуха. Чем больше расход воздуха, тем ниже значения статического давления. Минимальное среднее значение статического давления установлено при расходе воздуха в 20 л/мин. Вид газожидкостных потоков в канале колбы в присутствии балластной жидкости и воздуха также отличается от вида потока в отсутствии воздуха. Сам столб представляет однородную светящуюся среду. Шум кавитации становится значительно ниже. Анализ спектрограмм звуковых колебаний указывает, что кавитационный шум имеет преимущественно отвечает низкочастотному диапазону колебаний. Изменение в интенсивности звуковых колебаний от кавитации

при введении воздуха достигает восьмикратного значения по сравнению с шумом кавитации в отсутствии балластной воды и воздуха.

Введение воздуха отмечается еще одной особенностью режима существования газожидкостного потока. Введение воздуха приводит к возникновению колебаний гидродинамического давления газожидкостного потока в канале модельного устройства. И чем большее количество воздуха подается в канал, тем сильнее колебания потока. Измерения показали, что частота колебаний соответствует 1 Гц. Величина расхода воздуха и место введения воздушного потока в канал колбы оказывают влияние на величину изменения гидродинамического давления газожидкостного потока, не изменяя при этом объем расхода воды, поступающей в канал модельного устройства (см. табл.). Кроме того, экспериментально показано, что газогидродинамический поток воды, созданный кавитационной технологией, эффективно решает обеспечение отвода тепла путем прокачки большого количества жидкости в протяженном канале, который имитирует гидродинамическую канавку упорного подшипника скольжения.

Приведенные в работе результаты экспериментальных исследований утверждать, что кавитационно-волновая технология перспективна для использования в триботехнике и, в частности, в упорных жидкостных подшипниках скольжения. В отличие от типовых упорных подшипников скольжения, проектируемых для работы в условия гидродинамической смазки для очень узкого диапазона скоростей скольжения, кавитационно-волновая технология смазывания расширяет диапазон скоростей от высокоскоростных до малооборотных.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Научноёмкие технологии создания машин будущего» Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Москва, Россия).

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0023

1. Р.Ф. Ганиев, Л.Е. Украинский. Нелинейная волновая механика и технология.-М.: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. – 712 с.
2. Голых Р.Н., Минаков В.Д. Разработка исследовательского стенда для изучения влияния ударно-волнового давления как независимого фактора ультразвукового кавитационного воздействия. Ползуновский вестник. 2024, № 1. С. 191–196
3. Воронин Н. А. Влияние эффекта эжектирования на параметры и вид газогидродинамического потока воды, создаваемого искусственной кавитацией в стесненных условиях. Механика Машин, Механизмов и Материалов. 2025, Т. 3(72). С. 63–73.
4. Воронин Н. А. Исследование характеристик гидрогазодинамического потока в модельной гидродинамической канавке упорного подшипника скольжения. Международный научно-исследовательский журнал. 2025, № 6 (156). – 11 с.

ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ К ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ БЛОКА НАГРУЖЕНИЯ

Гадолина И.В.¹, Ерпалов А.В.², Беневоленская Е.М.³

¹Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; gadolina@mail.ru

²Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

³ВНИКТИ, Коломна, Россия

Исследование режимов нагружения является важной задачей для принятия решения о расчетах или испытаниях: список режимов не должен быть ни слишком длинным, ни слишком коротким. Кластерный анализ, как один из инструментов машинного обучения, использовался в данной работе для разграничения похожих на первый взгляд режимов. Поскольку обобщенный блок нагружения создается для оценки долговечности, в кластерном анализе использовались те параметры, которые связаны с оценкой усталостных повреждений.

Цель

Разработать метод, который обеспечит автономное выделение режимов из списка, которые отличаются по повреждающему воздействию от других. Применен подход «частично с учителем» для верификации сделанных выводов. Метод опробован на записях эксплуатационного нагружения в деталях подвижного состава.

Введение

При расчете долговечности по критерию многоциклового разрушения используется блок нагружения [1], который является информативной и удобной для расчетов и испытаний характеристикой нагружения объекта в эксплуатации. Его длина l_0 выражается в тех же единицах измерения, что и долговечность. Для получения комплексной оценки надежности изделий за весь жизненный цикл необходим сбор и обработка значительного количества информации о надежности, полученной как в гарантийный, так и в постгарантийный период. Эта информация должна поступать из различных источников: эксплуатирующих организаций, обслуживающих депо и вагоноремонтных заводов, которые проводят капитальные ремонты [2]. Хотя в [2] подчеркивается, что при сборе данных о техническом состоянии изделий необходимо обеспечить регулярность, достоверность, своевременность и полноту информации, тем не менее в интеллектуальных системах РЖД по сбору и обработке данных по характеристикам нагружения в процессе жизненного цикла несущих систем подвижного состава, встречаются случаи отсутствия некоторых данных, касающихся информации об условиях испытаний. Существуют случаи, когда в записях отсутствует информация о скорости движения состава на конкретном участке. Для прояснения подобных ситуаций и предназначен предлагаемый в статье метод.

Материалы и методы. Обобщенный блок нагружения

При создании метода и для его верификации были использованы данные по тензометрированию напряжений в раме грузового вагона. Раньше

единственным доступным источником данных для получения информации о нагрузках, влияющих на долговечность, были подобные тензометрические испытания по измерению нагрузок. В настоящее время ситуация изменилась, благодаря появлению новых дополнительных источников данных: а именно, данных полевого мониторинга и географических данных для автотранспорта. Эти данные также могут быть использованы для расчета нагрузок и целевых показателей долговечности, связанных с потребителями и эксплуатацией [3].

Объект исследования – это случайные процессы нагружения, записанные при движении с разным скоростями. Пример записи напряжения S в раме при скорости движения $V=50$ км/час показан на Рис.1.

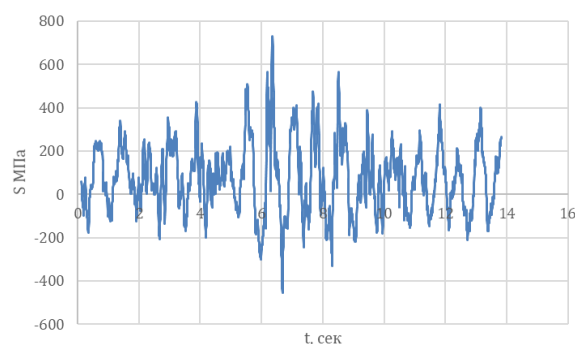


Рис. 1. Реализация случайного процесса нагружения в элементе несущей системы вагона при движении со скоростью $V=50$ км/час.

Для построения обобщенного блока составляется массив данных по результатам схематизации по имеющимся реализациям, аналогичным показанной на Рис.1. Вопросы согласования границ интервалов при суммировании был рассмотрен в [4]. В результате этих действий должен получиться обобщенный блок длиной l_0 с суммарным числом циклов v_0 [1], причем последняя величина в силу правил суммирования не обязательно будет представлять собой целую величину.

Кластерный анализ временной последовательности

Рассмотрим пример, когда необходимо дистанцировать записи по признаку различающихся нагрузок. Данная задача не так тривиальна, как может показаться на первый взгляд. Допустим, в распоряжении исследователей имеется большой массив записей нагруженности, на основании которого требуется составить обобщенный блок для последующих расчетов и испытаний. Блок нагружения является уменьшенным аналогом записи всех нагрузок, которые произойдут или могут произойти в процессе эксплуатации. В постоянном блоке нагружения нагрузки появляются с той же относительной частотой, что и в предполагаемой (наиболее вероятном) сценарии эксплуатации. Из сказанного ясно, что в блоке нагружения должны быть отражены по возможности все вероятные режимы, но с должной частотой. Число включенных режимов не должны быть слишком малым (чтобы обеспечить представительность) и не должно быть слишком большим (чтобы не чрезмерно усложнить задачу по сбору информации о нагруженности).

Теория

По определению кластеры – это объединение нескольких однородных элементов, которое может рассматриваться как самостоятельная единица, обладающая определёнными свойствами. При кластеризации временных последовательностей рассматривают ряд суб-реализаций, получаемых разбиением исходной последовательности на ряд отрезков (равной величины для простоты), вводя определяющие параметры, оцениваемые для каждой суб-реализации и с применением кластерного анализа объединяемых в группы.

Константы, определяющие параметры нагружения на участках (суб-реализациях) и выбранные для проведения кластерного анализа в данном исследовании: СКО – это среднее квадратическое отклонение процесса на суб-реализации, МПа; I – коэффициент нерегулярности, [5], S_{amax} – максимальная амплитуда блока, полученного по методу дождя [1], V – коэффициент полноты спектра, также полученный в результате схематизации случайного процесса по методу дождя и зависящий от коэффициента угла наклона кривой усталости m [6].

Исходная реализация была образована объединением нескольких записей, сделанных при различных скоростях движения. Параметры меняются при изменении скорости. На рисунке 1 приведена временная зависимость среднего квадратического отклонения от номера суб-реализации.



Рис. 1. Временная зависимость среднего квадратического отклонения. Суб-реализация №8 соответствует переходу на большую скорость.

На рисунке видно, что кривая поднимается при переходе к большей скорости движения (суб-реализация №8). Для обоснованного сужения был применен многофакторный кластерный анализ.

Эксплуатационный эксперимент

В таблице 1 приведены данные по тензометрированию на 4-х скоростях движения. В последствии, однако, были оставлены только два интервала скоростей, поскольку кластерный анализ показал, что различия между скоростями 50, 60 и 70 км/час несущественны.

Таблица 1. Параметры

sd	I	Samax	V	принадлежность
7.995	0.183	22.930	0.389	50 км/час
8.760	0.203	26.540	0.385	50 км/час
8.565	0.174	29.850	0.359	50 км/час
9.099	0.175	25.850	0.403	50 км/час
5.980	0.143	16.720	0.393	50 км/час
4.054	0.185	12.512	0.361	50 км/час
7.498	0.155	23.740	0.373	50 км/час
15.029	0.073	41.350	0.379	"80 км/час"
13.650	0.011	38.750	0.377	"80 км/час"
17.440	0.112	50.071	0.371	"80 км/час"
15.809	0.138	39.580	0.428	"80 км/час"
13.140	0.173	38.640	0.393	"80 км/час"
14.700	0.159	41.950	0.398	"80 км/час"
16.930	0.098	43.420	0.397	"80 км/час"
13.120	0.204	38.801	0.380	"80 км/час"
6.930	0.211	20.907	0.397	"60 км/час"
6.590	0.203	18.607	0.417	"60 км/час"
7.187	0.205	25.920	0.355	"60 км/час"
7.840	0.193	27.110	0.340	"60 км/час"
7.150	0.256	99.504	0.421	"60 км/час"
7.820	0.185	26.220	0.371	"60 км/час"
7.400	0.190	20.470	0.420	"70 км/час"
9.590	0.192	26.690	0.383	"70 км/час"
8.810	0.236	28.630	0.408	"70 км/час"
8.870	0.237	29.650	0.396	"70 км/час"
8.780	0.202	25.940	0.411	"70 км/час"
8.590	0.201	27.301	0.397	"70 км/час"
8.760	0.202	26.860	0.395	"70 км/час"
7.020	0.250	22.103	0.394	"70 км/час"
7.930	0.234	23.713	0.407	"70 км/час"
7.980	0.254	21.550	0.448	"70 км/час"
9.440	0.140	34.800	0.326	"70 км/час"
9.480	0.115	27.320	0.350	"70 км/час"

Результат кластерного анализа, выполненный

программой kmeans, вводящей в базовый комплект программы R [7,8], представлен в таблице 2.

Таблица 2. Результат кластерного анализа

Переменная	СКО, [MPa]	I	S_{max} [MPa]
1	7.421543	0.173914	22.59171
2	14.977250	0.120987	41.57025
Clustering vector: [1] 1 1 1 1 1 1 1 2 2 2 2 2 2 2 2			
Статистические данные	Внутри кластера		Сумма квадратов в кластере
	236.0666		123.3097
	Коэффициент детерминации D (между SS / общее SS) = 81.3 %		
Примечание: Коэффициент детерминации — это доля дисперсии зависимой переменной, объясняемая рассматриваемой моделью зависимости, то есть объясняющими переменными.			

Трехмерная визуализация

Хотя анализ производился в 4-х мерном пространстве, для наглядности на рисунке 2 показано представление трехмерной диаграммы. Точки с координатами СКО, I и $S_{\max}$ отчетливо группируются в два облака, соответствующим двум скоростям движения. Последующее включение в анализ скоростей 60 и 70 км/час не позволило диагностировать эти данные как отличающиеся кластеры.

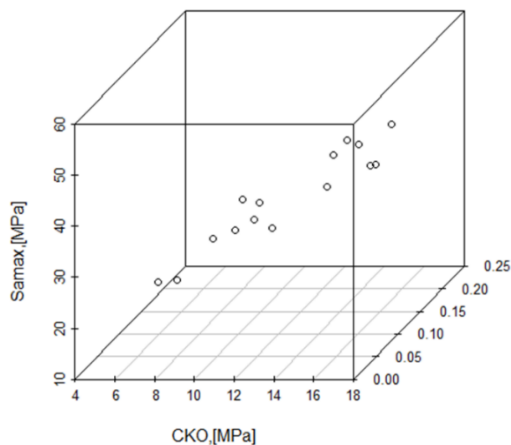


Рис. 2. Трехмерное представление двух кластеров, $S_{\max}$ — максимальная амплитуда в суб-реализации, СКО — среднее квадратическое отклонение, I — коэффициент нерегулярности.

Выводы

Разработан метод, позволяющий провести обоснованное обособление частных режимов нагружения для построения обобщенного блока нагружения, необходимого при оценке усталостной долговечности. Метод опробован на конкретном примере записей путевой машины. Имеющаяся априорная информация позволила подтвердить выводы, сделанные по результатам кластерного анализа, а именно:

Известно, что примерно в середине записи транспортное средство перешло на другие условия нагружения, а именно, движение со скоростью 50 км/час сменилось движением со скоростью 80 км/час. В более общем случае использования машинного обучения для решения задачи о выделении отдельных режимов кластерный анализ с анализом указанных в Табл.1 или дополненным набором параметров поможет решить задачу об оптимизации числа нагрузочных режимов для последующей расчетной или экспериментальной оценки долговечности.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-20268, <https://rscf.ru/project/25-29-20268/>

1. Кобаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М. Машиностроение. 1993. 364с.
2. Белоусова М.В., Булатов В.В. Сбор и обработка информации о надежности на предприятиях вагоностроения. Надежность. 2025;25(3):12-20. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-3-12-20>
3. Michael Burger, Klaus Dreßler, Michael Speckert Load assumption process for durability design using new data sources and data analytics, International Journal of Fatigue, Volume 145, 2021, 106116, ISSN 0142-1123, <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2020.106116>, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112320306484>)
4. Петрова, И. М. Создание обобщенного спектра нагружения при различных вариантах нагружения в эксплуатации / И. М. Петрова, И. В. Гадолина // Пром-Инжиниринг : Труды IV международной научно-технической конференции, Москва-Челябинск-Новочеркасск, 15–18 мая 2018 года. 2018. – С. 26-30. – EDN FCIGYB.
5. ГОСТ 25.101-83. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. М.: Стандартинформ, 2005. 25 с.
6. ГОСТ 25.507-85. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы испытания на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. 2005. 20с.
7. Hartigan, J. A. and Wong, M. A. (1979). Algorithm AS 136: A K-means clustering algorithm. Applied Statistics, 28, 100–108. doi:10.2307/2346830.
8. R Core Team (2025). *_R_: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ УПЛОТНЕНИЙ В АВИАЦИОННЫХ ГТД

Гаврилина Л.В.¹, Печейкина М.А.², Раков Д.Л.¹, Сухоруков Р.Ю.¹

¹Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; rdl@mail.ru

²Московский энергетический институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

Современная авиационная промышленность характеризуется возрастающими требованиями к увеличению эффективности, надёжности и экологичности газотурбинных двигателей (ГТД). И инновационные технологии и материалы для уплотнений играют критически важную роль, поскольку непосредственно влияют на ключевые параметры ГТД - удельный расход топлива, КПД и межремонтный ресурс. Повышение эффективности уплотнений проточной части компрессора и турбины является одним из основных направлений совершенствования характеристик ГТД. В работе рассматриваются актуальные вопросы, связанные с применением перспективных технологий и материалов для уплотнений.

Уплотнения в авиационных ГТД выполняют важную функцию предотвращения утечек рабочих сред – газов, масел и гидравлических жидкостей – в условиях экстремальных температур и давлений. По своему функциональному назначению они подразделяются на статические (для соединения неподвижных деталей) и динамические (для герметизации зазоров между вращающимися и неподвижными элементами). К специальным типам относятся межступенчатые и межваловые уплотнения, а также лабиринтные и сотовые уплотнения, широко применяемые в проточной части ГТД.

Эффективность этих устройств напрямую определяет совершенство и механические потери двигателя. Чем качественнее уплотнение перекрывает зазоры, тем меньше паразитных утечек горячего газа из турбины или воздуха из компрессора, что ведёт к росту давления в проточной части, повышению КПД и, как следствие, снижению удельного расхода топлива.

Исследования и поиск новых материалов и технологий является неотъемлемой частью программ по созданию двигателей нового поколения, таких как CFM RISE и Rolls-Royce UltraFan. Целевые показатели этих программ включают снижение расхода топлива на 20–25% и соответствующее сокращение выбросов CO₂, что невозможно без кардинального повышения эффективности всех элементов проточной части, включая уплотнения [1].

Так, программа RISE предполагает переход к открытой архитектуре вентилятора, что предъявляет новые требования к системам герметизации и защите от внешних воздействий. В двигателе UltraFan используется редукторный механизм, позволяющий вентилятору и турбокомпрессору работать на оптимальных скоростях, что также требует новых решений в области обеспечения динамических уплотнений между этими модулями [1].

Несмотря на очевидные преимущества, внедрение инновационных конструкций и технологий уплотнений сопряжено с рядом трудностей, а именно:

- Сложность производства, так как, к примеру изготовление крупногабаритных деталей, таких как титано-композитные лопасти вентилятора для UltraFan, требует высокой технической культуры.
- Новые материалы должны быть совместимы с традиционными металлическими компонентами ГТД с учетом коэффициентов теплового расширения и усталостной прочности.
- Необходимость междисциплинарного сотрудничества. Как отметил М.М. Бакрадзе из ВИАМ, разработка новых эффективных уплотнительных материалов может быть успешной только при тесном сотрудничестве научно-исследовательских институтов, заводов-производителей и поставщиков сырья.

Также можно отметить, что перспективные направления развития связаны с интеллектуализацией уплотнительных систем – интеграцией в них датчиков для мониторинга состояния в реальном времени, использованием возможностей цифрового моделирования и неразрушающих методов контроля для прогнозирования остаточного ресурса

Одним из ключевых направлений совершенствования газотурбинных двигателей является минимизация паразитных утечек воздуха и газов в элементах проточной части. Традиционные лабиринтные уплотнения, будучи бесконтактными, не в состоянии полностью исключить перетечки. Альтернативные технические решения (ТР) — щеточные уплотнения (Рис.1) — демонстрируют значительное превосходство в эффективности, обеспечивая до 90% снижения утечек по сравнению с лабиринтными. Активное внедрение этой технологии в ГТД открывает новые возможности для оптимизации рабочих процессов ГТД.

Конструктивно щеточное уплотнение состоит из тысяч тонких проволонок (бристалей), объединенных в плотный пакет и закрепленных между двумя металлическими пластинами (Рис.2).



Рис.1. Щеточное уплотнение

Рабочий принцип основан на способности этого пакета гибко адаптироваться к вращающейся поверхности вала, сохраняя минимальный, но контролируемый зазор в условиях высоких окружных скоростей и температурных деформаций. Именно эта гибкость позволяет минимизировать утечки, и в то же время избежать критического износа даже при 25000 об/мин.

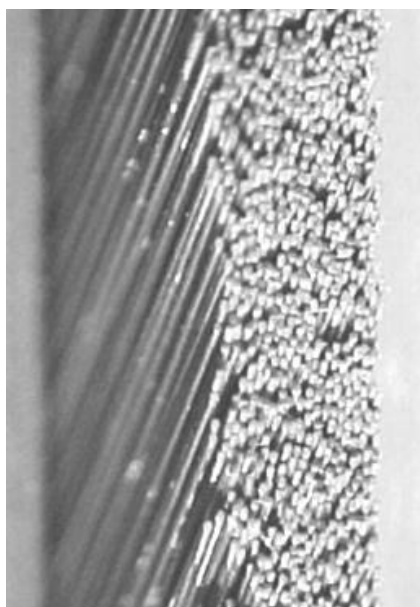


Рис.2. Бристили в щеточном уплотнении

Для обеспечения надежной работы в экстремальных условиях ГТД к материалам предъявляются строгие требования. В качестве материала бристлей широко применяется кобальт-никелевый сплав Haynes 25, характеризующийся прочностью, стойкостью к окислению и способностью сохранять свойства при высоких

температурах. Сплав содержит основу из кобальта, усиленную хромом, никелем и вольфрамом. Ингредиенты обеспечивают антикоррозионные свойства и способность выдерживать экстремальные температуры. Материал сохраняет свои механические свойства при температурах до 982°C, что делает его одним из лучших материалов для использования в условиях высоких температур. Российский сплав аналог – 48КХВН. Для специфических применений, где требуются непроводящие свойства, используются синтетические волокна, например, армированный кевлар. В настоящее время увеличивается число исследовательских работ, посвященных различным аспектам использования щеточных уплотнений [2-5].

Используются различные технологии изготовления уплотнений. Так фирма MTU использует при намотке две жилы из Haynes 25 (Рис.3) [6]. Затем производится отжиг, чтобы получить плотную упаковку проволоки. Последующий процесс отжига с низким напряжением гарантирует, что упаковка сохранит свою форму после снятия. Затем двойная полоска разрезается пополам и формируется лента, нужного диаметра. В завершении свариваются два конца ленты вместе.

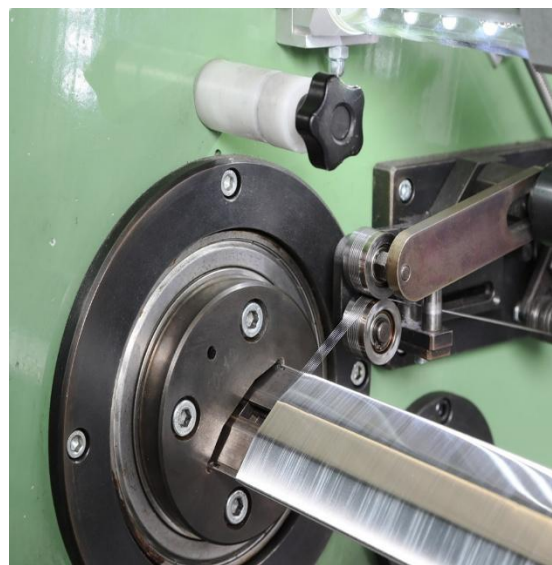


Рис.3. Технология изготовления щеточных уплотнений [6].

Конкурентом щеточных уплотнений в ГТД являются лабиринтные уплотнения. Сравнительный анализ их ключевых характеристик представлен в таблице 1. Как видно из таблицы, ключевое преимущество щеточных уплотнений – кардинальное снижение утечек. Это напрямую трансформируется в повышение эффективности двигателя. Для гражданской авиации это означает экономию керосина. По оценкам MTU, использование щеточных уплотнений позволяет существенно экономить в топливе, что выражается

в снижении удельного расхода топлива до 1%.

Таблица 1. Сравнительные характеристики щеточных и лабиринтных уплотнений

	Щеточные уплотнения	Лабиринтные уплотнения
Снижение утечек	До 90%	Базовый уровень
Экономия топлива	До 1%	Незначительная
Влияние на КПД	Существенное повышение	Ограниченное
Адаптивность к радиальным смещениям	Высокая	Отсутствует
Стойкость к износу	Высокая, при правильном подборе материалов	Определяется зазором

Для более полного сравнения применяется метод морфологического анализа [7], при помощи которого осуществляется декомпозиция рассматриваемой задачи с последующим синтезом и кластеризацией ТР [8-11]. Например, к решаемой задаче можно ввести такие атрибуты– материал, конструктивное исполнение, температурный режим, рабочее давление, способ крепления, ориентация и плотность пакета.

Использование инновационных уплотнений в ГТД представляет собой стратегически важное направление, непосредственно влияющее на топливную эффективность, экологичность и

надёжность современных и перспективных двигателей. Преодоление технологических барьеров, связанных с созданием и внедрением новых материалов, требует консолидированных усилий науки и промышленности.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0016

- Burdon R., Shorey T., Beyond the Horizon: Innovations in Aviation Engine Technology, January 27, 2025,
- <https://www.global-aero.com/beyond-the-horizon-innovations-in-aviation-engine-technology/> Global Aerospace
- Zhang Y, Li J., Li Z., Yan X. Effect of bristle pack position on the rotodynamic characteristics of brush-labyrinth seals at various operating conditions, Chinese Journal of Aeronautics, Volume 33, Issue 4, 2020, Pp. 1192-1205.
- Zhang Y. et al. Experimental and numerical investigations on leakage flow characteristics of two kinds of brush seals //Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air – American Society of Mechanical Engineers, 2018. – T. 51098. – С. V05BT15A026.
- Рублевский Ю.В., Прибора Т.И. Щеточные уплотнения как эффективное средство улучшения параметров авиационных ГТД. Вестник двигателестроения. 2013. № 1. С. 14-17.
- Ярошенко А.С., Серов М.М. Быстрозакаленные материалы на основе кобальта и их применение в составе щеточных уплотнений ГТД. Быстрозакаленные материалы и покрытия. Москва, 2021. С. 71-74.
- Rienth T. The art of the best brush seals. MTU Aeroreport. 2024 <https://aeroreport.de/en/innovation /the-art-of-the- best-brush-seals>.
- Zwicky F. Discovery, Invention, Research – Through the Morphological Approach. Toronto: The Macmillan Company, 1969.
- Rakov D.L., Sukhorukov R.Y., Pecheykina M.A. Choosing and evaluating fabrication processes by means of a computer-aided innovation support system based on the morphological approach. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2019. T. 48. № 2. С. 173-178.
- Rakov D.L. Strukturelle Synthese und Analyse von innovativen technischen Systemen. Unique and Exzellent Ingenieurausbildung im 21. Jahrhundert. 2000. С. 388-395.
- M. A. Pecheykina, D. L. Rakov, R. Yu. Sukhorukov. Structural Synthesis and the Search for New Technical Solutions in the Conceptual Design Phase. Journal of Machinery Manufacture and Reliability, 2020, Vol. 49, No. 8, pp. 61-68.
- Раков Д.Л. Анализ и оценка инновационности технических решений в морфологическом подходе в машиностроении. Проблемы машиностроения и автоматизации. 2024. № 2. С. 112-117.

ВЛИЯНИЕ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛОВ

Гайдар С.М.¹ Лапсарь О.М.²

[*techmash@rgau-msha.ru](mailto:techmash@rgau-msha.ru)

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)» 125319, Российская Федерация, г. Москва, Ленинградский проспект, 64.

² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

В данном исследовании для оценки защитной эффективности СОЖ использовался гравиметрический метод определения скорости коррозии металлов. Данный метод обладает рядом преимуществ, таких как простота реализации и высокая точность. Суть метода заключается в определении степени защиты различных составов путем сопоставления экспериментальных данных, полученных на образцах как обработанных исследуемыми составами, так и необработанных.

Введение

Гравиметрический метод имеет два основных варианта применения: определяют увеличение массы образца вследствие образования продуктов коррозии на его поверхности; определяют потерю массы после удаления образовавшихся продуктов коррозии. Первый вариант метода позволяет наблюдать за кинетикой процесса коррозии, так как прослеживается увеличение массы образцов. С другой стороны, метод применим только в тех случаях, если известен химический состав продуктов коррозии, который может быть установлен только специальными методами, такими как химический или рентгенофазовый анализ. Это является недостатком данного варианта представленного метода, так как значительно усложняет эксперимент. Поэтому такой вариант гравиметрического метода применяется в основном для исследования газовой коррозии, при которой невозможно образование пленки влаги на поверхности исследуемых деталей и образуется негидратированный оксид железа.

В случае применения второго варианта данного метода продукты коррозии удаляют специальными растворами, взаимодействующими не с основным металлом образца, а с продуктами коррозии.

Материалы и методы

В представленных исследованиях скорость коррозии определялась именно по второму варианту метода. Образцы металла для гравиметрических испытаний представляют собой плоские пластины размерами 50x50x3 мм, изготовленные из стали марки Ст3 и меди марки М1. Испытания медных образцов в исследуемых растворах проведены в связи с тем, что многие ПАВ при контакте с медью образуют водорастворимые соединения и могут стимулировать процесс коррозии меди и медных сплавов в водных растворах.

Для каждого состава взято по три образца, скорость коррозии высчитывалась как средняя арифметическая.

После проведения испытаний рассчитывается защитное действие состава Z.

Результаты и обсуждения

Результаты испытаний по определению скорости коррозии стальных образцов представлены в таблицах 1,2 и рисунках 1–3.

Таблица 1. Результаты испытаний по определению скорости коррозии образцов из стали марки Ст3.

Наименование образца	Скорость коррозии г/(м ² ·ч).	Защитное действие, %
Без СОЖ	0,0184	-
Образец-1	0,0172	6,5
Образец-2	0,0122	33,7
Образец-3	0,0102	44,6

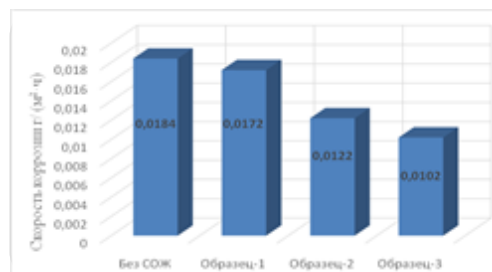


Рис.1. Скорость коррозии стальных образцов в исследуемых растворах

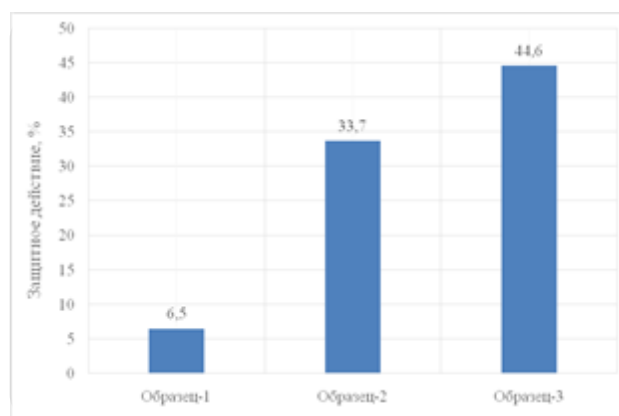


Рис.2. Защитное действие составов при обработке стальных образцов

Таблица 2. Результаты испытаний по определению скорости коррозии образцов из меди

Наименование образца	Скорость коррозии г/(м ² ·ч)	Защитное действие, %
Без СОЖ	0,0168	
Образец-1	0,0407	стимулирует коррозию
Образец-2	0,021	стимулирует коррозию
Образец-3	0	100

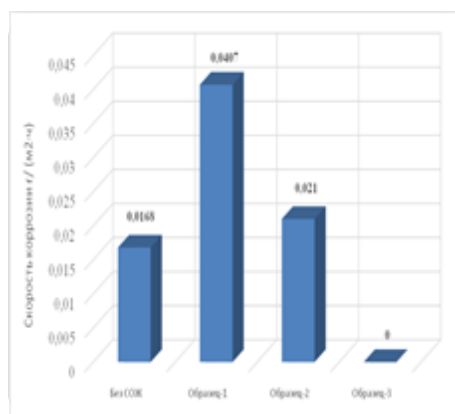


Рис 3. Скорость коррозии медных образцов в исследуемых растворах

Заключение

Из представленных данных видно, что все представленные растворы и обеспечивают защиту стали от коррозии, но образцы 1 и 2 стимулируют развитие коррозии при обработке медных сплавов. Это может быть связано с тем, что при диссоциации анионных и катионных ПАВ в водных растворах при взаимодействии с медью образуются легкорастворимые в воде соединения.

1. Methodology and results of comparative atmospheric tests of experimental conservation composition / A. E. Shlykov, E. B. Mironov, S. M. Gaidar [et al.] // Bio web of conferences: International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources" (FIES 2019), Kazan, 13–14 ноября 2019 года. – EDP Sciences: EDP Sciences, 2020. – P. 00258. – EDN JOQGRW.
2. Impact of operational factors on environmental safety of internal combustion engines / S. Gaidar, M. Karelina, A. Laguzin, H. D. Quang // Transportation Research Procedia: 14, Saint Petersburg, 21–24 октября 2020 года. – Saint Petersburg, 2020. – P. 136–144. – DOI 10.1016/j.trpro.2020.10.017. – EDN EDCQTK.
3. Использование наноматериалов в качестве присадок к маслам для уменьшения трения в трибосопряжениях / С. М. Гайдар, В. Н. Свечников, А. Ю. Усманов, М. И. Иванов // Техника и оборудование для села. – 2013. – № 1. – С. 35–37. – EDN PNHSZV.
4. Effect of quenching and tempering on structure and mechanical properties of a low-alloy 0.25C steel / E. Tkachev, S. Borisov, A. Belyakov [et al.] // Materials Science and Engineering: A. – 2023. – Vol. 868. – P. 144757. – DOI 10.1016/j.msea.2023.144757. – EDN QRGLMB.
5. Практикум по хранению и защите от коррозии сельскохозяйственной техники / А. Э. Северный, Е. А. Пучин, В. Е. Рязанов [и др.]. – Москва: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2009. – 160 с. – EDN YMLTGH.
6. Гайдар, С. М. Перспективы применения нанотехнологий в двигателестроении / С. М. Гайдар, А. Г. Чумаков // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 10(67). – С. 12–16. – EDN YMJSEN.
7. Гайдар, С. М. Инновационное техническое средство для нанесения защитной молекулярной пленки на поверхность машин / С. М. Гайдар, М. Ю. Карелина // Техника и оборудование для села. – 2015. – № 3. – С. 26–28. – EDN TLPVXZ.
8. Посулько, И. А. Влияние внутренних и внешних факторов на коррозионно-механическое изнашивание деталей топливной системы / И. А. Посулько, А. М. Пикина // Материалы международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 160-летию В.А. Михельсона, Москва, 09–11 июня 2020 года. Том Том 2. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2020. – С. 339–344. – EDN LJBOQC

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАЗРАБОТАННОГО ИНГИБИТОРА В УСЛОВИЯХ СВР

Гайдар С.М.¹ Лапсарь О.М.²

[*techmash@rgau-msha.ru](mailto:techmash@rgau-msha.ru)

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», Москва, Российская Федерация

² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

Проблема защиты техники от коррозии, старения и биоповреждений относится к числу наиболее актуальных практических задач. Практическая значимость этой проблемы является актуальной при использовании техники по назначению, так и при хранении.

Введение

Целью натурных испытаний является оценка антикоррозийной устойчивости защитных средств, нанесенных на поверхности испытываемых образцов при различных методах их хранения в условиях жаркого тропического климата.

Материалы и методы

+ Метод 1 ГОСТ 9.054-75

Сущность метода заключается в выдерживании консервационных материалов, нанесенных на металлические пластинки, в условиях повышенной относительной влажности воздуха и температуры с периодической влаги на образцах.

Образцы подвесили вертикально на штативах из нержавеющей стали и поставили в климатической камере Clime-Event C/1000/40/3.

Эксперимент проводили в 35 последовательных циклов, каждый цикл тестирования длился 24 часа. В течение первых 7 часов каждого цикла испытательную камеру нагревали при $40 \pm 2^\circ\text{C}$. Затем испытательную камеру охлаждали до комнатной температуры ($25 \pm 2^\circ\text{C}$) и выдерживали при этой температуре в течение следующих 17 часов, чтобы влага из резервуара конденсировалась на испытуемых образцах. Влажность в испытательной камере поддерживалась на уровне $98 \pm 2\%$.

После окончания периода испытаний (35 циклов) образец вынимали из испытательной камеры, промывали растворителем и сушили.

Для оценки защитной способности консервационных материалов по площади коррозионного поражения определяют процент площади коррозионных очагов от площади испытуемой пластинки. В качестве испытуемых образцов использовали: сталь Ст3, медь М1.

В качестве защитных средств использовали: консервационные масла (КМ), пленкообразующий ингибированный нефтяной состав (ПИНС), консистентные смазки на основе ингибиторов растительного и животного происхождения, водный раствора ингибитора коррозии и раствор фторсодержащего ПАВ.

Результаты и обсуждение

Результаты испытания приведены следующие:

- После 1 недели испытания: на поверхностях образцов признаков коррозии не выявлено.

- После 3 месяца испытания: на поверхностях образцов были наблюдаемы признаки коррозии относительно стали Ст3 и меди М1, нанесенными маслом, а для образцов, нанесённых смазкой, признаков коррозии не выявлено.

- После 8 месяцев испытания: образцы были сняты со стенов и в лаборатории промыты в бензине до полного удаления защитных покрытий. на поверхностях образцов были наблюдаемы коррозии относительно стали Ст3 и меди М1, нанесенными маслом. Для образцов, нанесённых смазкой: Стали Ст3 признаков коррозии не выявлено, меди М1 были следы коррозии.

Таблица 1. Результат осмотра образцов партии №1 после 8 месяцев испытания

Испытываемые образцы	Результат осмотра образцов (Площадь коррозии)
Сталь Ст3 с покрытием раствором Телаз А	100 %
Сталь Ст3 с покрытием маслом АВТОКОН	40-50%
Сталь Ст3 с покрытием смазкой Удар	0 %
Сталь Ст3 без покрытия (контроль)	100 %
Медь М1 с покрытием раствором Телаз А	60-70%
Медь М1 с покрытием маслом АЖК 16	20 – 30%
Медь М1 с покрытием смазкой Удар	Следы коррозии
Медь М1 без покрытия (контроль)	100 %

Заключение

Проведенные стендовые и натурные испытания по оценке возможности использования, полученного ПАВ в составе защитных материалов, показали высокую эффективность.

1. Коррозия и кинетика электродных процессов на стали с гидрофобным покрытием в хлоридной среде и с добавкой

- сероводорода/ В.И.Вигдорович, Л.Е.Цыганкова, А.М. Емельяненко и др.// [Коррозия: материалы, защита](#). 2020.№2. С. 21–26.
2. Гайдар, С.М. [Защита сельскохозяйственной техники от коррозии и износа с применением нанотехнологий](#) /Гайдар С.М.//диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Московский государственный агроинженерный университет. Москва, 2011
3. Патент на изобретение № 2787477 от 09.01.2023 г. Способ получения моно- и диэтаноламидов жирных кислот. Патентообладатель: ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева (RU) / Гайдар С.М., Коноплев В.Е., Лапсарь О.М., Балькова Т.И., Пикина А.М., Посулько И.А. Заявка № 2022109878 от 13.04.2022г.
4. Мансураева, Л.М. [Поверхностно-активные вещества: свойства и применение](#)/ Мансураева Л.М., Юсупова И.И., Булаев С.А.// [Вестник магистратуры](#). 2022. № 2-1 (125). С. 30-35.
5. Балькова Т.И. Исследование ингибирующего действия поверхностно-активных органических веществ (павов) методом поляризационных измерений // [Электromеталлургия](#). 2023.№8. С. 30–40.

СИНТЕЗ ПОВРЕХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ

Гайдар С.М.¹ Барчукова А.С.²

*techmash@rgau-msha.ru

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», Москва, Российская Федерация

² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

Проведены исследования физико-химических свойств полученного вещества для определения оптимального целевого использования в промышленности. Исследования с применением ИК-спектроскопии позволили провести анализ реакционной смеси в процессе синтеза при различных соотношениях реагентов и уточнить структурную формулу полученного химического соединения.

Введение

Широкое применение ПАВ обусловлено их способностью в низких концентрациях влиять на межфазные физико-химические процессы, модифицируя поверхности и придавая им новые свойства [3-4].

Одним из наиболее востребованных реагентов при производстве ПАВ являются олеохимические жирные кислоты. Производство олеохимических жирных кислот основано на гидролизе растительных масел или животных жиров. Гидролиз триглицеридов осуществляют в ректоре при температуре 250° – 260°С за счет подачи перегретого пара [1].

ПАВ являются амфифильными соединениями, состоящими из гидрофобной части и гидрофильной группы. В зависимости от природы гидрофильной группы ПАВ классифицируют как неионогенные, анионные, катионные и амфотерные.

Наибольшее распространение в технике получили неионогенные ПАВ.

Представителем такого класса ПАВ являются амиды жирных кислот, представляющие продукт конденсации жирных кислот с этаноламинами (моноэтаноламин – МЭА или диэтаноламин - ДЭА) при температуре 170 °С.

Материалы и методы

В качестве сырья для синтеза ПАВ использовали этаноламин, H_3BO_3 и триглицерид (соевое масло).

В реактор загружаются все три компонента и при перемешивании реакционная масса подвергается нагреву [5-7]. Добавляют 65 - 130 г (0,075–0,15 моля) соевого масла (СМ), 65 – 130 г (0,0619 -0,138 моля) ДЭА в колбе, снабженную термометром и холодильником. Нагревают смесь при перемешивании до 70°С, затем добавляют в колбу 6,5–19,5 г (0,105–0,315 моля) борной кислоты (БК). Смесь нагревается до 155°С, происходит реакция конденсации с отделением воды. Поднимают температуру реакционной смеси до 180-200°С, выдерживая ее при этой температуре до получения прозрачной однородной смеси. Продолжают удерживать при этой температуре течение 0,0–2,0 ч.

Результаты и обсуждения

Анализ результатов показывает, что в процессе синтеза наблюдается интенсивность полосы поглощения при 1619 см^{-1} , которая соответствует карбонильной группе третичных амидов в спектре продуктов реакции.

Одновременно наблюдается интенсивность поглощения сложноэфирных групп (1739 и 1074 см^{-1}) и образование аминоэфиров, находящихся в равновесии с амидами. Увеличение времени реакции при 180-200°С не влияет на это равновесие. Примечательно также, что интенсивность полосы поглощения гидроксильных групп (3274 и 1053 см^{-1} , валентные колебания О-Н и С-ОН соответственно) происходит снижение практически до 2,5 ч синтеза.

Анализ результатов показывает, что:

- Чем ниже анилиновая точка углеводородного растворителя, тем выше растворимость полученного ПАВ. Растворимость ПАВ уменьшается в порядке: ДТ> И-20А

- Чем больше время реакции, тем выше растворимость полученных ПАВ.

- При увеличении соотношения диэтаноламина к соевому маслу в исходной реакционной смеси снижаются растворимость полученных ПАВ в углеводородном растворителе;

- При увеличении соотношения борной кислоты к диэтаноламину в исходной реакционной смеси не оказывает существенного влияния на растворимость полученных ПАВ в углеводородном растворителе.

Заключение

Спектральный анализ позволил определить органические вещества в реакционной массе в зависимости от времени реакции и в готовом целевом продукте, а также уточнить структурную формулу продукта.

Полученные результаты показали обратную зависимость значения анилиновой точки от растворимости ПАВ в углеводородном растворителе.

1. Methodology and results of comparative atmospheric tests of experimental conservation composition / A. E. Shlykov, E. B.

- Mironov, S. M. Gaidar [et al.] // Bio web of conferences : International Scientific-Practical Conference "Agriculture and Food Security: Technology, Innovation, Markets, Human Resources" (FIES 2019), Kazan, 13–14 ноября 2019 года. – EDP Sciences: EDP Sciences, 2020. – P. 00258. – EDN JOQGRW.
2. Impact of operational factors on environmental safety of internal combustion engines / S. Gaidar, M. Karelina, A. Laguzin, H. D. Quang // Transportation Research Procedia : 14, Saint Petersburg, 21–24 октября 2020 года. – Saint Petersburg, 2020. – P. 136-144. – DOI 10.1016/j.trpro.2020.10.017. – EDN EDCQTK.
3. Использование наноматериалов в качестве присадок к маслам для уменьшения трения в трибосопряжениях / С. М. Гайдар, В. Н. Свечников, А. Ю. Усманов, М. И. Иванов // Техника и оборудование для села. – 2013. – № 1. – С. 35-37. – EDN PNHSZV.
4. Effect of quenching and tempering on structure and mechanical properties of a low-alloy 0.25C steel / E. Tkachev, S. Borisov, A. Belyakov [et al.] // Materials Science and Engineering: A. – 2023. – Vol. 868. – P. 144757. – DOI 10.1016/j.msea.2023.144757. – EDN QRGLMB.
5. Практикум по хранению и защите от коррозии сельскохозяйственной техники / А. Э. Северный, Е. А. Пучин, В. Е. Рязанов [и др.]. – Москва: Российский научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2009. – 160 с. – EDN YMLTGH.
6. Гайдар, С. М. Перспективы применения нанотехнологий в двигателестроении / С. М. Гайдар, А. Г. Чумаков // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 10(67). – С. 12-16. – EDN YMJSEN.
7. Гайдар, С. М. Инновационное техническое средство для нанесения защитной молекулярной пленки на поверхность машин / С. М. Гайдар, М. Ю. Карелина // Техника и оборудование для села. – 2015. – № 3. – С. 26-28. – EDN TLPVXZ.
8. Посуныко, И. А. Влияние внутренних и внешних факторов на коррозионно-механическое изнашивание деталей топливной системы / И. А. Посуныко, А. М. Пикина // Материалы международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 160-летию В.А. Михельсона, Москва, 09–11 июня 2020 года. Том 2. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2020. – С. 339-344. – EDN LJBOQC

ВОЛНОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ДИСПЕРСИЙ ХИТОЗАН-МОНТМОРИЛЛОНИТ

Ганиев С. Р.¹, Касилов В. П.¹, Кислогубова О. Н.¹, Бутикова О. А.¹, Кочкина Н. Е.^{1,2}

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

²Институт химии растворов им. Г.А. Крестова РАН, Иваново, Россия

В работе изучено влияние волновых резонансных воздействий на седиментационную устойчивость и реологические свойства дисперсий хитозан-монтмориллонит. Установлено, что волновая обработка приводит к повышению устойчивости данных систем к расслоению и существенно изменяет их вязкоупругие свойства и динамическую вязкость. Полученные результаты являются перспективной основой для совершенствования технологий создания эффективных гемостатических материалов.

Растущий спрос на высокоэффективные гемостатические материалы стимулирует активные исследования в области получения соответствующих композитов на основе природного биополимера хитозана и глинистых минералов, таких как монтмориллонит (ММТ). Ключевой проблемой при создании таких систем является флокулирующая способность хитозана по отношению к ММТ. Это явление приводит к быстрому расслоению дисперсии и образованию крупных агрегатов хитозан/ММТ. Подобное поведение значительно усложняет технологический процесс нанесения составов на текстильную основу, требуя продолжительного (до 12 часов) механического перемешивания для поддержания однородности аппрата [1].

В настоящей работе предложен альтернативный подход — использование волнового резонансного воздействия [2,3] для получения дисперсий на основе хитозана и ММТ, устойчивых к образованию крупных агрегатов. Для получения дисперсий на основе хитозана и ММТ в настоящей работе выполняли обработку смеси компонентов в воде в волновом аппарате при частоте 53,6 Гц в течение 15 минут. В качестве контрольных образцов использовались композиции хитозан/ММТ, приготовленные традиционным методом — механическим перемешиванием с помощью лабораторной лопастной мешалки ER 10. Оценивали седиментационную устойчивость и реологические свойства полученных образцов.

Волновая обработка позволяет получить однородную дисперсию, сохраняющую седиментационную устойчивость в течение 7 суток. Объемная доля дисперсной фазы в таком образце снизилась всего на 2%. В противоположность этому, контрольный образец расслоился уже через 30 минут, а через 7 суток объемная доля дисперсной фазы в нём достигла 42%.

Для выяснения причин столь значительного различия в седиментационной устойчивости изученных образцов были проведены реологические исследования дисперсий хитозан/ММТ (Рисунок). Установлено, что для контрольного образца, полученного классическим способом, модуль накопления G' превышает модуль потерь G'' во всём диапазоне частот, что

свидетельствует о наличии в структуре композита упругих элементов — крупных агрегатов хитозан/ММТ. В то же время дисперсия, сформированная с применением волновых резонансных воздействий, характеризуется наличием на частотной зависимости компонент комплексного модуля точки кроссовера ($G'=G''$) при частоте ~ 1 Гц и значительно более низкой динамической вязкостью, особенно в области малых скоростей сдвига. Эти данные указывают на то, что при волновом воздействии молекулы хитозана равномерно адсорбируются на поверхности частиц ММТ, формируя защитное покрытие и предотвращая образование межчастичных «мостиков», что превращает хитозан из флокулянта в стабилизатор дисперсии глинистого минерала.

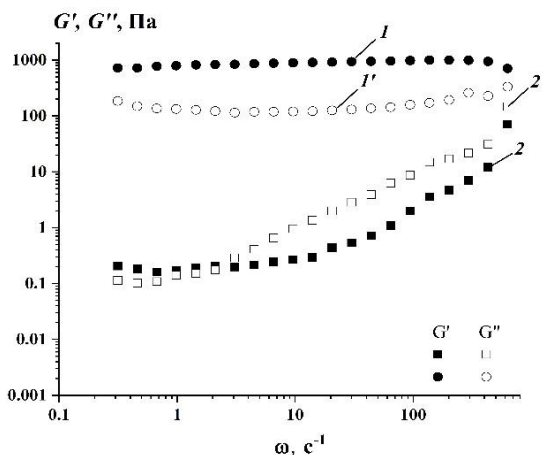


Рис. 1. Зависимости модуля накопления G' и модуля упругости G'' от частоты деформации ω для дисперсий хитозан/ММТ, полученных традиционным способом перемешивания (кривые 1, 1') и в условиях волновых резонансных воздействий (кривые 2, 2').

Таким образом, применение волновых резонансных воздействий открывает путь к созданию модернизированной технологии гемостатических материалов. Метод позволяет получить седиментационно-устойчивую дисперсию хитозан/ММТ со сниженной вязкостью, что оптимально для пропитки текстильного носителя.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной

темы, присвоенной учредителем (организацией)
FFGU-2024-0013

1. Yang Z, Ye T, Ma F, Zhao X, Yang L, Dou G, Gan H, Wu Z, Zhu X, Gu R, Meng Z. Preparation of chitosan/clay composites for safe and effective hemorrhage control, *molecules* // 2022. V. 27(8). pp. 2571.
2. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технология. Волновые и колебательные явления в основе высоких технологий. Изд. 2-е, доп. М.: Институт компьютерных исследований; Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2011. 780 с.
3. Ганиев Р.Ф., Ганиев С.Р., Касилов В.П., Пустовгар А.П. Волновые технологии в инновационном машиностроении. М.: Институт компьютерных исследований. 2014. 106 с.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ ПОЛИМЕРОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДОЛОГИИ РИСКОВ

Гиршфельд П.А.¹, Ромашова Е.Ю.¹, Горохов А.Д.¹

¹ Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; girshfeld@hotmail.com

В статье представлена методология оптимизации процесса экструзии полимеров EPDM, направленная на обеспечение стабильности процесса и соответствие качества экструдата установленным требованиям. В процессе проектирования продукта применяется DFMEA (Design Failure Mode and Effects Analysis) для выявления и устранения потенциальных отказов. Для проектирования процесса используется матрица QFD (Quality Function Deployment), метод, который помогает перевести требования потребителей в технические параметры процесса экструзии, обеспечивая точную настройку параметров. Эти связи между характеристиками продукта и параметрами процесса подтверждены через DOE (Design of Experiments), метод планирования экспериментов, который позволяет оптимизировать параметры процесса на основе статистических данных. Разработана адаптивная система управления, учитывающая свойства резиновой смеси и параметры экструзии, с интеграцией данных из систем машинного зрения и лазерной триангуляции для реального времени контроля качества.

Целью данной научной статьи является разработка и внедрение инновационной методологии оптимизации процесса экструзии полимеров EPDM, которая направлена на повышение стабильности технологического процесса и обеспечение высокого качества экструдата. В рамках исследования предлагается использование Индекса технологической устойчивости, который учитывает нелинейные зависимости между параметрами экструзии, а также применение матрицы QFD для точной настройки параметров процесса с учётом взаимосвязи между характеристиками продукта и процессом. Кроме того, в статье используется методология DFMEA для прогнозирования и предотвращения возможных отказов на этапах проектирования как продукта, так и процесса.

Особое внимание уделено разработке адаптивной системы управления, которая интегрирует данные современных средств контроля качества, таких как машинное зрение и лазерная триангуляция, что позволяет оперативно корректировать параметры экструзии и минимизировать риски отклонений от заданных характеристик.

Для науки данное исследование предлагает новый подход к проектированию и управлению процессом экструзии полимеров, который интегрирует несколько методов для повышения точности, стабильности и предсказуемости процесса. Для производства методология позволяет значительно повысить эффективность экструзионного процесса, снижая количество дефектов и повышая экономическую отдачу. Для потребителя это означает улучшение качества продукции, повышение её долговечности, прочности и стабильности, что соответствует современным требованиям к материалам и изделиям.

Проектирование продукта

Проектирование продукта включает выбор материалов и характеристик, которые обеспечат требуемое качество конечного изделия и

соответствие эксплуатационным требованиям. Все этапы проектирования полимерного продукта, особенно экструзии полимеров EPDM, основаны на методологии DFMEA (Design Failure Mode and Effects Analysis), что позволяет выявить и предотвратить потенциальные отказы на каждом этапе разработки.

Выбор материала

Потенциальный отказ: использование неподходящего материала может привести к снижению долговечности и функциональности изделия (например, потеря стойкости к озону или термическому старению).

Предпринятые действия: оценка материалов на основе их способности сохранять прочность и эластичность при воздействии внешних факторов, таких как озон и высокая температура. Применение DFMEA позволяет на ранних стадиях разработки выявить материалы с низкими показателями стойкости и исключить их из выбора.

Реологические свойства и вязкость по Муни

Потенциальный отказ: неправильная вязкость материала может вызвать проблемы с подачей через экструдер, приводя к дефектам в экструдате (например, недостаточная стабильность потока).

Предпринятые действия: установление допустимых значений вязкости по Муни, оптимизирующих экструзию. DFMEA помогает предсказать риски, связанные с нестабильной реологией, и корректировать состав смеси, обеспечивая нужную вязкость и предотвращая дефекты экструзии.

Приемлемые допуски для входного контроля материала

Потенциальный отказ: материал может потерять свои свойства из-за неправильно подобранных условий хранения или недостаточной стабилизации перед экструзией, что может привести к нарушению характеристик готовой продукции.

Предпринятые действия: внедрение термостатирования материала перед производством,

что позволяет стабилизировать его характеристики и минимизировать изменения в процессе экструзии. Также был разработан регламент отбора проб, чтобы учитывать деградацию свойств материала с течением времени. Применение DFMEA помогает выявить риски, связанные с деградацией материала, и корректировать технологические параметры в реальном времени.

Физико-химические свойства

Потенциальный отказ: нарушение физических и химических свойств материала, таких как прочность, эластичность или термостойкость, может привести к неисправности изделия на протяжении его эксплуатации.

Предпринятые действия: проведение анализа DFMEA для оценки рисков, связанных с изменениями в механических и термических характеристиках материала. Это позволяет оптимизировать состав смеси и параметры процесса экструзии для обеспечения нужной прочности и эластичности. Также учитывается влияние химических веществ, таких как масла или кислоты, которые могут нарушить структуру материала.

Подбор компонентов и добавок

Потенциальный отказ: неоптимальный выбор добавок (пластификаторов, стабилизаторов, наполнителей) может вызвать снижение механических характеристик материала или его нестабильность при экструзии.

Предпринятые действия: применение DFMEA для оценки взаимодействий компонентов смеси и их влияния на стабильность и механические характеристики изделия. Используются только те добавки, которые не вызывают нежелательных реакций или изменений в материале, что подтверждается анализом рисков на каждом этапе проектирования.

Проектирование процесса

Для проектирования процесса экструзии используется матрица QFD (Quality Function Deployment), которая помогает перевести требования потребителя и характеристики продукта в параметры технологического процесса. Этот инструмент отображает взаимосвязь между параметрами процесса и характеристиками конечного продукта, позволяя точно настроить технологические параметры экструзии.

Процесс проектирования начинается с анализа требуемых характеристик продукта, таких как прочность, эластичность и термостойкость, которые затем связываются с технологическими параметрами экструзии, такими как температура, давление и скорость подачи материала. Матрица QFD помогает систематизировать эти связи, обеспечивая прозрачность всех этапов разработки и оптимизации.

Кроме того, для подтверждения и уточнения этих взаимосвязей используется метод DOE (Design of Experiments). Он позволяет провести контролируемые эксперименты и проанализировать влияние различных параметров на качество конечного продукта. С помощью DOE можно точно установить, как изменение одного или нескольких параметров влияет на характеристики экструзионного процесса и стабильность продукции.

Пример 1: Оптимизация температуры экструзии.

В эксперименте, проведенном с полимером EPDM, была исследована зависимость прочности и эластичности материала от температуры экструзии. Используя матрицу QFD, было установлено, что температура экструзии критически влияет на эти характеристики. Эксперимент, проведенный в диапазоне температур от 230°C до 240°C, показал, что при температуре 235°C прочность материала была на 15% выше, чем при 230°C, и на 10% выше, чем при 240°C. Эти данные подтвердили оптимальность температуры 235°C, что было принято как стандарт для экструзии данного материала.

Пример 2: Настройка давления и скорости подачи.

Для исследования взаимосвязи между давлением и скоростью подачи материала был проведен эксперимент, в котором изменялись эти параметры в диапазоне от 0,8 до 1,2 МПа для давления и от 4 до 6 м/мин для скорости подачи. Результаты эксперимента показали, что при давлении 1,0 МПа и скорости подачи 5 м/мин процесс экструзии был наиболее стабильным, а вероятность дефектов минимальной. Эти параметры обеспечили оптимальное сочетание однородности экструдата и минимизации брака.

Пример 3: Влияние наполнителей на процесс экструзии.

В этом эксперименте была исследована зависимость вязкости материала от концентрации углеродной сажи, добавляемой в смесь EPDM. Эксперименты проводились с различными концентрациями сажи от 20% до 30%. Результаты показали, что при концентрации 25% вязкость смеси была оптимальной для экструзии, а экструзия происходила стабильно при заданных температурных и давленческих режимах. При концентрации выше 25% вязкость увеличивалась, что приводило к трудностям в экструзии и повышению вероятности дефектов.

Пример 4: Оптимизация времени вулканизации.

Эксперимент по оптимизации времени вулканизации показал, что для смеси EPDM при температуре 180°C оптимальное время вулканизации составляет 10 минут. В этом случае прочность материала достигала максимальных значений, а эластичность оставалась на необходимом уровне. Уменьшение времени вулканизации до 8 минут или увеличение до 12

минут приводило к ухудшению характеристик материала, что подтвердило важность точного контроля времени вулканизации для обеспечения стабильности качества продукции.

Эти примеры представляют собой лишь небольшую часть множества экспериментов, проводимых в рамках оптимизации экструзионного процесса. Весь технологический процесс включает более 100 различных параметров, и взаимосвязи между ними являются нелинейными и комплексными. Таким образом, применение матрицы QFD в сочетании с методами DOE позволяет точно настраивать параметры и учитывать все критические факторы для обеспечения стабильности процесса и качества продукции.

Адаптивное управление технологическими параметрами

В рамках исследования была разработана система адаптивного управления технологическими параметрами, направленная на обеспечение стабильности процесса экструзии полимеров, особенно в производстве EPDM. Эта система учитывает свойства резиновой смеси, такие как вязкость, термореологическое поведение и реакцию на изменения температуры и давления, а также стабильность параметров экструзии, включая скорость подачи, давление, температуру и скорость вращения шнека.

Особенностью системы является её способность принимать во внимание нелинейные зависимости между параметрами экструзии. Эти зависимости могут быть сложными и изменяться в зависимости от характеристик сырья, режима работы оборудования и внешних факторов, таких как колебания температуры или вариации в составе резиновой смеси. Например, изменение вязкости материала при повышении температуры может нелинейно повлиять на скорость экструзии и качество экструдата.

Система адаптивного управления использует алгоритмы, которые динамически регулируют параметры экструзии в реальном времени, чтобы поддерживать оптимальные условия для стабильного производства. Эти алгоритмы принимают в расчет текущие отклонения от норм, а также предсказывают дальнейшие изменения, обеспечивая корректировку параметров до того, как они выйдут за допустимые пределы.

Кроме того, система обеспечивает:

Автоматическую настройку технологических параметров на основе анализа данных о текущем состоянии процесса.

Предсказание изменений в экструзионном процессе на основе исторических данных и текущих измерений.

Исключение отклонений от оптимальных значений параметров, что способствует стабильности качества продукции и снижению вероятности возникновения дефектов.

Таким образом, данная система позволяет не только поддерживать стабильность экструзионного процесса, но и активно корректировать параметры в реальном времени, что значительно улучшает качество экструдата, повышает его однородность и уменьшает количество технологических дефектов.

Заключение

Предложенная методология проектирования процесса экструзии полимеров EPDM позволяет существенно повысить стабильность экструзионного процесса и качество продукции. Внедрение инструментов DFMEA, QFD и адаптивного управления технологическими параметрами обеспечивает точную настройку параметров, минимизирует риски отклонений и предотвращает возможные дефекты на ранних стадиях.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0024

1. Математическое моделирование технологических процессов: курс лекций / В.Б. Пономарев, А.Б. Лошкарев. Екатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2006. 129 с.
2. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная, технологическая и техносферная безопасность / Под общ. ред. Н.А. Махутова. Москва: Знание, 2018. 1016 с.
3. Панов А.Н., Ерофеев М.Н., Ромашова Е.Ю. Риск-ориентированное проектирование процессов ремонта, восстановления и модернизации объектов машиностроения/ Ремонт. Восстановление. Модернизация. М., 2024 г., №10, с. 21-34.
4. Панов А.Н., Ромашова Е.Ю. Автоматизация риск-ориентированного проектирования техники // Международная конференция «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения»: сборник тезисов докладов конференции, посвященной 85-летию Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН – 2023. – С.225

УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕССОВ ЭКСТРУЗИИ ПОЛИМЕРОВ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ПРИЕМЛЕМЫХ РИСКОВ НЕСООТВЕТСТВИЙ

Гиршфельд П.А.¹, Ромашова Е.Ю.¹, Горохов А.Д.¹

¹ Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; girshfeld@hotmail.com

В статье рассмотрен метод управления параметрами экструзии полимеров, направленный на снижение несоответствий и повышение качества продукта. Используются методы реологического моделирования, логистической регрессии и анализа поверхностей отклика. Результаты работы будут полезны для повышения стабильности технологических процессов в производстве изделий из полимеров.

Цель исследования — обоснование метода управления параметрами экструзии полимерных материалов для повышения стабильности технологического процесса и достижения приемлемых рисков [4-6] несоответствий качества продукции путем снижения отклонений параметров экструзии от установленных норм.

Для получения оптимальных результатов и снижения дефектов в процессе экструзии используется корректировка параметров.

Экструзия полимеров требует прецизионного контроля параметров, включая такие показатели, как температура, давление и скорость подачи материала.

Предложенный метод включает:

1. Прогнозирование вероятности дефектов на каждом этапе экструзии.

2. Пошаговую корректировку технологических параметров с целью сокращения отклонений.

3. Определение оптимальных значений параметров, обеспечивающих стабильное качество продукции.

Научная ценность исследования заключается в разработке нового подхода к управлению процессами экструзии полимеров с применением риск-ориентированного подхода, направленного на повышение точности прогнозирования и улучшение качества управления технологическими параметрами. Это позволяет эффективно минимизировать риски дефектов и отклонений, внося значительный вклад в развитие методов контроля и оптимизации технологических процессов.

Для производства исследование предлагает методы, способствующие снижению дефектов, повышению стабильности процессов и сокращению затрат.

Для потребителей результаты исследования обеспечивают улучшение эксплуатационных характеристик изделий, повышая их надежность и долговечность.

Материалы

В качестве материала для экструзии использовался EPDM (этилен-пропилен-диеновый мономер), который широко используется в производстве резинотехнических изделий, таких как уплотнители и прокладки для мобильных машин.

Для анализа параметров экструзии были выбраны следующие ключевые параметры:

- Температура (T): от 180°C до 250°C.
- Давление (P): от 0.5 МПа до 1.5 МПа.
- Скорость подачи материала (V): от 1 до 5 м/мин.

Реологическое моделирование

Для анализа влияния температуры и сдвиговой скорости на вязкость полимера используется модель Оствальда - де Виля [8]:

$$\eta = K \cdot (\dot{\gamma})^{n-1}, \quad (1)$$

где (η) - вязкость; ($\dot{\gamma}$) - скорость сдвига; (K) - коэффициент консистенции; (n) - индекс течения.

Моделирование реологических свойств позволяет прогнозировать поведение материала при различных режимах экструзии и определить оптимальные параметры для обеспечения стабильности процесса.

Прогнозирование рисков

Для прогнозирования вероятности дефектов в процессе экструзии использовалась **логистическая регрессия**:

$$P = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 P + \beta_3 V)}}, \quad (2)$$

где (P) - вероятность дефекта; (T) - температура; (P) - давление; (V) - скорость подачи.

Коэффициенты ($\beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 P + \beta_3 V$) определяются на основе данных, полученных в ходе экспериментов.

Поверхности отклика и анализ чувствительности

Для визуализации зависимости вероятности дефекта от параметров экструзии использовался метод поверхностей отклика (RSM) [7]. Это позволяет строить 3D-графики, отражающие оптимальные значения параметров экструзии, минимизирующие риск дефектов.

Результаты и их обсуждение

Влияние температуры и давления на процесс экструзии

В ходе экспериментов было установлено, что температура и давление являются ключевыми параметрами, влияющими на реологические

характеристики материала и стабильность процесса экструзии.

Визуализация зависимости вязкости от температуры при различных значениях сдвиговой скорости показала, что с увеличением температуры вязкость материала значительно снижается, что улучшает процесс экструзии, но при этом увеличивает вероятность дефектов при слишком высоких температурах.

График зависимости вязкости от температуры показал, что для оптимального качества продукции температура должна быть в пределах 230°C - 240°C, при этом вязкость материала не должна превышать 3000 Па·с. Эти значения обеспечивают стабильность процесса и минимизируют риски дефектов.

Прогнозирование дефектов с использованием логистической регрессии

Модели логистической регрессии для предсказания вероятности дефекта на основе температуры, давления и скорости подачи показали высокую точность прогноза. Коэффициент детерминации [5] (R^2 (R-квадрат) = 0.85) указывает на сильную зависимость между параметрами экструзии и вероятностью дефекта.

При установленных значениях температуры 235°C, давления 1 МПа и скорости подачи 3 м/мин вероятность дефекта составила около 4%, что является приемлемым для данного этапа экструзии.

Поверхности отклика и оптимизация параметров

Метод поверхностей отклика позволил визуализировать оптимальные комбинации температуры, давления и скорости подачи для минимизации вероятности дефектов.

Графики показали, что максимальная зона стабильности процесса экструзии находится в области температур от 230°C до 240°C и давления от 0.8 до 1.2 МПа.

С увеличением температуры процесс становится более чувствительным к колебаниям давления, что подтверждает необходимость точной настройки всех параметров на каждом этапе экструзии.

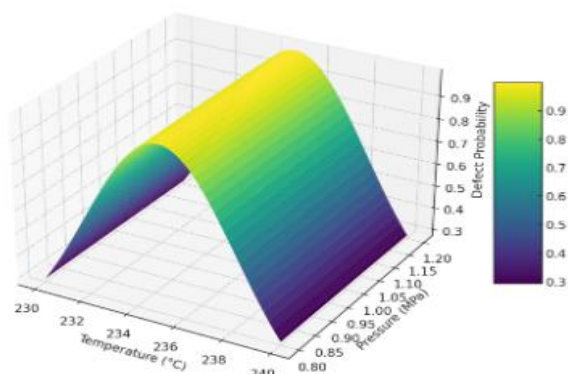


Рис. 1. График процесса экструзии

Корректировка параметров

Систематическое уточнение параметров на каждом шаге позволило достигнуть оптимальных значений для минимизации дефектов. На первом шаге были установлены начальные параметры, затем на основе анализа промежуточных результатов параметры экструзии корректировались. В результате на последнем шаге удалось снизить вероятность дефекта до 2%, что является удовлетворительным результатом для экструзии полимеров.

Заключение

Применение предложенного метода управления параметрами экструзии полимеров показало свою эффективность в повышении стабильности технологического процесса и улучшении качества продукции. Использование риск-ориентированного подхода позволило существенно снизить вероятность дефектов и повысить точность прогнозирования технологических параметров.

Результаты исследования могут быть использованы для цифровизации процессов экструзии и внедрения адаптивных методов управления, что обеспечит стабильность процессов и повышение качества продукции. Прогнозирование рисков на каждом этапе производства способствует поддержанию оптимальных параметров и предотвращению дефектов.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на развитие методов машинного обучения для улучшения прогноза дефектов, а также на интеграцию предложенного подхода в системы управления производственными процессами. Важной целью является поиск путей для создания цифровых моделей процессов экструзии, что позволит повысить эффективность и устойчивость производства, а также обеспечить более высокую степень автоматизации и контроля.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0024

1. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная, технологическая и техносферная безопасность / Под общ. ред. Н.А. Махутова. Москва: Знание, 2018. 1016 с.
2. Панов А.Н., Ерофеев М.Н., Ромашова Е.Ю. Риск-ориентированное проектирование процессов ремонта, восстановления и модернизации объектов машиностроения/ Ремонт. Восстановление. Модернизация. М., 2024 г., №10, с. 21-34.
3. Панов А.Н., Ромашова Е.Ю. Автоматизация риск-ориентированного проектирования техники // Международная конференция «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения»: сборник тезисов докладов конференции, посвященной 85-летию Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН – 2023. – С.225.
4. Experimental and Numerical Study of Rubber Flow in the Extrusion Die of a Weather Strip / Article in Journal of Chemical

- Engineering of Japan 2019. 867–876 с.
5. Магнус Я.Р., Катышев П.К., Пересецкий А.А. Эконометрика. Начальный курс: Учебник; 8-е изд., испр. М., 2007. с. 47; 10, с. 75; 8, с. 62; 7, с. 66-68.
6. Яковенко К. С., Волков В. Я., Прокопец В. С. "Метод геометрического анализа моделей многофакторных процессов" Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии, по. 3 (25), 2012, pp. 87-91.
7. Конопацкий Е. В. Геометрическое моделирование и оптимизация многофакторных процессов и явлений методом многомерной интерполяции [Текст] / Е. В. Конопацкий // Труды Международной научной конференции по физико-технической информатике СРТ2018, 28 – 31 мая 2018 – Москва-Протвино, 2018 – С. 274-278.
8. Шульман З.П. Конвективный теплообмен и перенос реологически сложных жидкостей. – М.: Энергия, 1975. – 352 с

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА НА ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА МАШИН

Гиршфельд П.А.¹, Ромашова Е.Ю., Складнова М.С.

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; girshfeld@hotmail.com

Статья посвящена современным подходам к обеспечению качества на этапах проектирования и производства алюминия, с акцентом на использование инновационных технологий, таких как цифровизация, интеллектуальное управление процессами и прогнозирование рисков. Рассматриваются ключевые этапы производства алюминия, включая производство глинозема, электролиз, литье и обработку, а также методы минимизации дефектов и оптимизации процессов. Особое внимание уделено внедрению цифровых двойников и интеллектуальных систем управления, которые позволяют повысить стабильность качества, улучшить производственную эффективность и снизить экологическое воздействие. В статье подчеркивается важность системного подхода в управлении качеством, направленного на управление зарождением дефектов в металле, снижение вариаций и улучшение надежности продукции, а также адаптацию к условиям изменяющегося производственного процесса.

Целью работы является исследование современных методов обеспечения качества на этапах проектирования и производства машин, с акцентом на использование алюминия как ключевого материала. Рассматриваются методы контроля качества на всех этапах — от выбора сплава и проектирования компонентов до их производства, с учетом влияния алюминия на итоговое качество продукции. Особое внимание уделено применению цифровых технологий, интеллектуальных систем управления и прогнозированию рисков для управления зарождением дефектов в металле, что напрямую влияет на долговечность, надежность и функциональность машины.

Материалы

1. Производственные этапы.

Производство глинозема: Основой для алюминия является глинозем, который получают из бокситов. Процесс выщелачивания и обжига должен быть строго контролируемым для предотвращения загрязнений и повышения чистоты сырья.

Электролиз: В процессе электролиза из глинозема получают алюминий. Контроль температуры, состава электролита и плотности тока на этом этапе критичен для стабильности процесса и качества получаемого металла.

Литье и охлаждение: Литье алюминия требует точного контроля температуры и скорости охлаждения для предотвращения дефектов, таких как пористость и трещины.

2. Технологии и оборудование.

Цифровые двойники позволяют моделировать процессы плавки и охлаждения, прогнозируя возможные дефекты и оптимизируя параметры.

Интеллектуальные системы управления регулируют ключевые параметры (температура, давление) на основе данных с сенсоров, что минимизирует отклонения и улучшает качество.

3. Методы контроля и обеспечения качества.

Спектроскопия и микроструктурный анализ позволяют точно контролировать состав алюминия и выявлять внутренние дефекты.

Прогнозирование рисков с помощью FMEA и FTA позволяет заранее выявить и минимизировать потенциальные дефекты на всех этапах.

Методы

В статье рассматриваются методы обеспечения качества на этапах проектирования и производства алюминия с акцентом на инновационные подходы, такие как цифровизация и интеллектуальное управление процессами. Применяемые методы включают:

Риск ориентированное управление процессами: Использование метода FMEA (анализ отказов и их последствий) для выявления потенциальных дефектов на всех этапах производства. Этот метод позволяет предсказать возможные риски и заранее принять меры для их устранения, снижая последствия дефектов на стадии проектирования, плавки, литья и обработки.

Цифровые двойники: Применение цифровых двойников для моделирования производственных процессов в реальном времени. Это позволяет прогнозировать дефекты, такие как пористость или трещины в алюминии, и оптимизировать параметры процесса для повышения качества продукции.

Интеллектуальные системы управления: Внедрение интеллектуальных систем, использующих машинное обучение для автоматической регулировки производственных параметров, таких как температура и давление, на основе данных с сенсоров. Эти системы позволяют повысить стабильность качества и снизить вариации в процессе производства.

FTA (анализ дерева отказов): Применение FTA для анализа причинно-следственных связей, которые могут привести к дефектам в процессе производства, и оптимизации процесса для предотвращения их возникновения. Этот метод помогает выявить слабые места в технологических процессах и предложить решения для их устранения.

Методы контроля чистоты металла:

PODFA (Pneumatic Optical Detection of Fine Impurities): Этот метод позволяет обнаруживать и контролировать микроскопические примеси и включения в алюминии с помощью оптической

детекции частиц. Он способствует точному контролю чистоты металла и предотвращает попадание вредных частиц в производственный процесс.

Эти методы контроля и управления качеством играют важную роль в поддержании стабильности производства, повышении прочностных характеристик и долговечности алюминиевых компонентов, а также обеспечении высокой эффективности производственных процессов.

Для обеспечения качества и повышения эффективности производственных процессов в машиностроении применяются методы, ориентированные на инновационные подходы в управлении качеством, включающие интеграцию технологий, прогнозирование рисков и адаптивное управление процессами.

Для того чтобы полностью понять, как различные методы обеспечивают качество на этапах проектирования и производства алюминия, рассмотрим конкретные примеры из практики и факты, основанные на исследованиях и внедрении технологий на ведущих алюминиевых предприятиях.

Пример применения цифровых двойников в производстве алюминия

Одним из ярких примеров внедрения цифровых двойников является использование этой технологии для моделирования процесса плавки и литья алюминия. Например, на Алюминиевом заводе Швеции в рамках перехода на более экологичное и эффективное производство внедрена система цифровых двойников, которая моделирует процесс плавки и охлаждения алюминия в реальном времени. Это позволяет прогнозировать отклонения, такие как пористость или неоднородности структуры материала, и оперативно корректировать параметры процесса, такие как температура и скорость охлаждения.

Цифровая модель предсказывает поведение металла на всех этапах, начиная от расплава и заканчивая охлаждением. Это помогает снизить процент дефектных изделий, так как при каждом изменении условий система в реальном времени регулирует параметры и предупреждает о возможных отклонениях, что снижает вероятность брака и повышает стабильность качества продукции.

По данным исследования, внедрение цифровых двойников на алюминиевом заводе позволило снизить процент дефектных слитков на 15%, улучшив общую эффективность производства на 10%.

Применение методики FMEA для анализа рисков в производстве алюминия

Методика FMEA активно используется для прогнозирования рисков дефектов в производственных процессах. Например, на алюминиевом заводе в России был проведен анализ методом FMEA для оценки рисков, связанных с плавкой и литьем алюминия. Результаты анализа

показали, что наибольшие риски связаны с неправильной температурой плавки, что может привести к образованию пористости и ухудшению прочностных характеристик алюминиевых сплавов.

Для минимизации этого риска на заводе был внедрен автоматический контроль температуры плавки, с использованием интеллектуальной системы управления. Эта система регулирует подачу энергии и контролирует равномерность температуры в процессе плавки, снижая вариативность и сокращая дефекты.

Применение FMEA в сочетании с автоматизированным контролем температуры плавки позволило снизить уровень дефектных слитков на 20% за первый год внедрения системы.

Пример использования PODFA для контроля чистоты алюминия

Метод PODFA (Pneumatic Optical Detection of Fine Impurities) применяется для контроля чистоты металла и предотвращения попадания микроскопических примесей, которые могут существенно снизить прочностные характеристики алюминия. Например, в заводе по производству алюминия в Германии этот метод используется для анализа чистоты металла на стадии литья. Применение PODFA позволяет быстро и точно детектировать загрязнения и включения в расплавленном алюминии, предотвращая попадание этих частиц в готовые изделия.

Внедрение метода PODFA на стадии литья позволило снизить количество внутренних дефектов в слитках алюминия на 12% и повысить прочность конечных изделий.

Пример применения интеллектуальных систем управления

На заводах по производству алюминия в Китае активно внедряются интеллектуальные системы управления, основанные на машинном обучении для оптимизации процесса электролиза. Эти системы анализируют данные с сенсоров, контролируют содержание кислорода в электролите и регулируют подачу энергии в электролизеры в реальном времени. Это позволяет поддерживать стабильность процесса, снижая риски дефектов в конечном продукте.

Внедрение интеллектуальных систем управления на электролизных установках снизило энергоемкость производства на 8%, одновременно увеличив стабильность и качество продукции.

Пример использования FTA для улучшения качества литья

FTA (анализ дерева отказов) используется для анализа причин дефектов, таких как трещины, пористость или несоответствие размеров в процессе литья. На одном из крупных алюминиевых заводов в России метод FTA был использован для анализа причин дефектов в литейных формах. Результаты показали, что наибольшие риски дефектов связаны с

нестабильной подачей расплава и неправильно настроенной системой охлаждения.

Внедрение FTA позволило точно выявить слабые места в технологическом процессе, таких как изменения в температуре охлаждения и неправильное распределение расплава, что позволило оптимизировать систему охлаждения и улучшить качество литья.

После внедрения рекомендаций, полученных в результате FTA, количество дефектных изделий снизилось на 18%, а производственная эффективность возросла на 13%.

Заключение

Примеры применения различных методов обеспечения качества, таких как цифровые двойники, FMEA, PODFA и FTA, демонстрируют, как инновационные подходы позволяют повысить качество алюминиевых компонентов на всех этапах их производства. Внедрение этих методов приводит к значительному снижению дефектности, повышению производственной эффективности и улучшению стабильности качества. Эти примеры подтверждают важность системного подхода в управлении качеством, который позволяет минимизировать риски, улучшать характеристики материала и повышать надежность конечных изделий.

Управление зарождением дефектов в металле имеет ключевое значение для достижения стабильности качества, что, в свою очередь, влияет на долговечность и надежность машин, произведенных с использованием этого материала. Внедрение этих технологий способствует улучшению

производственной эффективности и снижению рисков, обеспечивая высокое качество конечной продукции.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0024

1. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная, технологическая и техносферная безопасность / Под общ. ред. Н.А. Махутова. Москва: Знание, 2018. 1016 с.
2. Панов А.Н., Ерофеев М.Н., Ромашова Е.Ю. Риск-ориентированное проектирование процессов ремонта, восстановления и модернизации объектов машиностроения/ Ремонт. Восстановление. Модернизация. М., 2024 г., №10, с. 21-34.
3. Панов А.Н., Ромашова Е.Ю. Автоматизация риск-ориентированного проектирования техники // Международная конференция «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения»: сборник тезисов докладов конференции, посвященной 85-летию Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН – 2023. – С.225.
4. Ю.М.Лахтин. Металловедение и термическая обработка металлов// Москва, «Металлургия», 1984.
5. Бородкина В.В., Рыжкова О.В., Улас Ю.В. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АЛЮМИНИЕВОГО ПРОИЗВОДСТВА В РОССИИ // Фундаментальные исследования. 2018. № 12-1. С. 72-77
6. Кушебина А.К. АНАЛИЗ СВОЙСТВ АЛЮМИНИЯ В НАНО- И МИКРОСТРУКТУРАХ // Международный студенческий научный вестник. 2015. № 6.
7. Баженова, Н. Н. Исследование проблем обработки алюминия / Н. Н. Баженова. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2017. — № 7 (141). — С. 38-40.

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ НА ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ РАЗМОЛЬНЫХ ТЕЛ В ПЛАНЕТАРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Горохов Е.В., Рябкова В.В., Бабин Д.М., Аборкин А.В.

Владимирский Государственный Университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича
Столетовых (ВлГУ), Владимир, Россия, aborkin@vlsu.ru

Разработана и численно реализована модель движения размольных тел в планетарной мельнице. С помощью модели проведены серии численных экспериментов с варьированием формы внутренней полости рабочей камеры. Получены расчетные оценки влияния формы внутренней полости рабочей камеры на кинематику движения размольных тел. Показано, что в зависимости от формы внутренней полости происходит изменение типа движения размольных тел в рабочей камере при механической обработке.

Обработка в планетарных мельницах нашла широкое применение для решения различных технологических задач, состоящих, например, в механическом легировании/активации, синтезе композиционных порошковых смесей и переработке стружечных отходов и т.д. [1-3]. В связи с этим, актуальными и научно значимыми являются исследования, направленные на повышение эффективности обработки, состоящие в изучении влияния конструктивных особенностей оборудования и условий высокоэнергетической обработки на динамику контактного взаимодействия размольных тел, определяющих энергосиловые параметры процесса механической обработки, а также установление взаимосвязи энергосиловых параметров с гранулометрическим составом, размером структурных составляющих получаемых порошков.

Повышение энергонапряженности процесса обработки может быть достигнуто, например, увеличением скорости обработки. Другим вариантом увеличения энергонапряженности процесса, не требующим увеличения скорости обработки, является изменение формы полости рабочей камеры. Например, при многогранной форме полости рабочей камеры, характер движения размольных тел изменится. Наличие многогранной формы рабочей полости приведет к тому, что размольные тела будут отделяться от стенки и выбрасываться в свободное пространство рабочей камеры, осуществляя свободный «полет» до момента столкновения с другим размольным телом или стенкой. Реализация такого режима движения позволит повысить интенсивность столкновений, а, следовательно, и эффективность высокоэнергетического размола. Численное определение величины энергонапряженности и получение данных о влиянии геометрической формы полости рабочей камеры и размольных тел на механику процесса, возможно на основе математического моделирования движения размольных тел методом дискретных элементов [4-8].

Особую актуальность это приобретает при использовании для синтеза нанокристаллических и композиционных порошков стружечных отходов металлообрабатывающего производства, что, с

одной стороны, в значительной мере позволяет снизить себестоимость получаемых из них порошков, с другой – требует повышения энергонапряженности процесса в связи с увеличением энергосиловых параметров, необходимых для их диспергирования и наноструктурирования.

Данная работа направлена на моделирование процесса высокоэнергетической механической обработки в планетарной мельнице с целью изучения влияния формы рабочей камеры на характер движения размольных тел.

Моделирование процесса проводили с использованием метода дискретных элементов. При этом динамика поступательного и вращательного движения размольных тел в рабочей камере планетарной мельницы описывается с помощью пошагового алгоритма с постоянным обновлением положения тел и стенок. Для каждого i -го размольного тела решалась система из двух уравнений поступательного и вращательного движения. При расчете сил взаимодействия между размольными телами и их моментов в настоящей работе применялась теория Г. Герца, дополненная теорией сдвига Р. Миндлина (модель Герца-Миндлина). Характер взаимодействия не может считаться абсолютно упругим, поэтому для учета потерь энергии при столкновении размольных тел, кроме силы контакта, вводится дополнительная диссипативная сила. Расчет столкновения размольных тел со стенкой рабочей камеры выполняется по аналогичной модели, однако, поскольку радиус рабочей камеры существенно превышает радиус каждого из тел, кривизна поверхности стенки не учитывается. Параметрами модели являются физико-механические характеристики материала размольных тел и рабочей камеры, а также коэффициенты, характеризующие их контактное взаимодействие. К последним относятся коэффициенты реституции, статического трения и трения качения. Данные коэффициенты были определены ранее [9].

Геометрия модельной системы соответствовала планетарной мельнице Активатор-2S, нашедшей широкое применение для механического легирования/активации порошковых смесей. Для сокращения затрат времени и вычислительных

ресурсов расчеты выполняли в квазидвухмерной постановке задачи. Были выполнены серии численных экспериментов с варьированием формы внутренней полости рабочей камеры. Рассмотрены формы внутренней полости рабочей камеры в виде окружности и n -гранников ($n=4, 5, 6, 12, 24$).

На рис. 1 представлены результаты численного моделирования процесса высокоэнергетической механической обработки с различной формой рабочей камеры в виде мгновенных изображений положений размольных тел. Линиями указаны типовые траектории движения размольных тел.

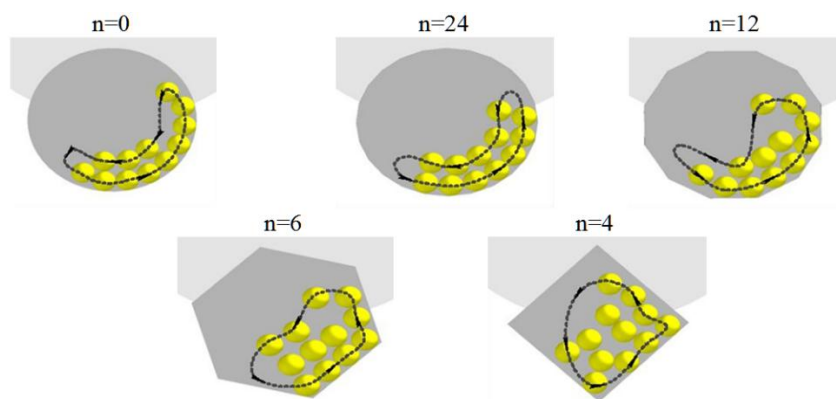


Рис.1 Влияние формы рабочей камеры на характер движения размольных тел в планетарной мельнице

Сравнительный анализ результатов моделирования показывает, что при форме внутренней полости рабочей камеры в виде окружности ($n=0$), происходит циклическое перекачивание размольных тел с первого на второй ряд. Если рабочая камера имеет форму внутренней полости в виде n -гранника ($n=24$), то характер движения размольных тел не претерпевает серьезного изменения. По-прежнему, как и в случае формы внутренней полости рабочей камеры в виде окружности, реализуется режим движения тел, при котором обработка материала может происходить как истиранием между стенкой рабочей камеры и размольными телами, так и соударениями размольных тел при перекачивании. Дальнейшее снижение n до 12 ведет к увеличению доли размольных тел, которые свободно меняют свое положение относительно центра рабочей камеры. При этом можно наблюдать трехрядное перекачивание, которое реализуется путем одновременного забрасывания на второй ряд двух и более размольных тел. В результате чего и происходит формирование третьего ряда. Все это способствует росту интенсивности столкновений, что должно положительно сказаться на эффективности обработки шихты. В случае $n=6$ отмеченные тенденции усиливаются и доля размольных тел, которые свободно меняют свое положение относительно центра рабочей камеры, увеличивается. При $n=4$ можно видеть, что для размольных тел в большей степени реализуется режим свободного полета, при котором некоторые размольные тела отделяются от стенки и выбрасываются в свободное пространство рабочей камеры, осуществляя свободный полет до момента

столкновения с другим размольным телом или стенкой рабочей камеры.

Таким образом, форма внутренней полости в значительной степени влияет на кинематику движения размольных тел в рабочей камере при механической обработке в планетарной мельнице.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-00770, <https://rscf.ru/project/25-29-00770/>.

1. Suryanarayana C. Mechanical alloying: a critical review // *Materials Research Letters*. 2022. V.10. P.619–647.
2. Rogachev A.S., Mukasyan A.S. Combustion of Heterogeneous Nanostructural Systems (Review) // *Combustion, Explosion, and Shock Waves*. 2010/ V.46(3). P.243–266.
3. Wei L.K., Abd Rahim S.Z., Al Bakri Abdullah M.M., Yin, A.T.M., Ghazali M.F., Omar M.F., Nemeş O., Sandu A.V., Vizureanu P., Abdellah A.E.-h. Producing Metal Powder from Machining Chips Using Ball Milling Process: A Review // *Materials*. 2023. V.16. P. 4635.
4. Burmeister C., Titscher L., Breitung-Faes S., Kwade A. Dry grinding in planetary ball mills: Evaluation of a stressing model // *Advanced Powder Technology*. 2018. V.29. P.191–201.
5. Santhanam P.R., Dreizin E.L. Predicting conditions for scaled-up manufacturing of materials prepared by ball milling // *Powder Technology*. 2012. V.221. P.403–411.
6. Rosenkranz S., Breitung-Faes S., Kwade A. Experimental investigations and modelling of the ball motion in planetary ball mills // *Powder Technology*. 2011. V.212. P.224–230.
7. Kozawa T., Fukuyama K., Kushimoto K., Ishihara S., Kano J., Kondo A., Naito M. Effect of ball collision direction on a wet mechanochemical reaction // *Scientific Reports*. 2021. V.11. P.210.
8. Aborkin A.V., Elkin A.I., Ryabkova V.V., Bugayov A.P., Alymov, M.I. Numerical analysis of the effect of friction on the motion and collision forces of grinding bodies in a planetary mill // *Metallurgist*. 2025. V.69(1). P. 147–157.
9. Aborkin A.V., Elkin A.I., Ryabkova V.V., Bugayov A.P., Bobozhanov A.R., Alymov M.I. Influence of gear ratio on the energy-force conditions of grinding body collisions in a planetary mill // *Izvestiya Vuzov Poroshkovaya Metallurgiya I Funktsionalnye Pokrytiya*. 2025. V. 19(1). P.5–14.

КЛАССИЧЕСКИЕ РЕГРЕССИИ И АНСАМБЛИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Горохов А.Д.¹, Угурчиев А.М.¹, Складнова М.С.¹

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; newandre1955@gmail.com

В докладе рассматриваются методы прогнозирования свойств материалов с использованием классических регрессионных моделей и ансамблевых алгоритмов машинного обучения. Проведено сравнение их точности, интерпретируемости и устойчивости к шуму при ограниченных данных. Показано, что регрессии обеспечивают простоту и физическую интерпретацию, а ансамбли — высокую точность при сложных нелинейных зависимостях. Отмечена перспектива интеграции физически-информированных моделей для повышения надежности прогнозов.

Прогнозирование свойств материалов (механических, тепловых, технологических и т. д.) является ключевой задачей материаловедения и машиностроения, которая приобретает всё большую актуальность в условиях цифровизации и развития информатики материалов. С развитием цифровых технологий и машинного обучения появилась возможность строить модели, которые по данным экспериментов и симуляций прогнозируют прочность, твердость, теплопроводность материалов и другие характеристики [1]. В частности, методы машинного обучения доказали свою эффективность в микроструктурном инжиниринге и надежно предсказывали фундаментальные термомеханические и физические свойства сплавов. С помощью этих методов удаётся создавать суррогатные модели свойств, которые позволяют резко сократить время и ресурсы на испытания новых сплавов или режимов обработки. Однако глубокие нейронные сети (ДНС) требуют больших объёмов данных и часто работают как «чёрные ящики», что затрудняет их применение при ограниченном наборе данных и необходимости интерпретации результатов. Например, исследования отмечают, что обучение глубоких моделей занимает много времени, а полученные регрессионные модели трудно интерпретировать [2]. Именно поэтому в инженерной практике, где часто присутствует ограниченность экспериментальных данных и строгое требование к интерпретируемости результатов, предпочтение часто отдают классическим регрессионным моделям и ансамблевым методам. Линейные и полиномиальные регрессии дают простые аналитические зависимости, понятные инженерам, в то время как ансамблевые деревья обеспечивают баланс между точностью и объяснимостью, понижая дисперсию прогноза и улавливая сложные нелинейные эффекты [3].

Классические регрессионные модели включают линейную регрессию, полиномиальную регрессию, а также преобразования типа логарифмической или экспоненциальной регрессии. Линейная регрессия проста и обеспечивает высокую интерпретируемость (коэффициенты сразу связываются с физикой задачи), но пригодна лишь при приблизительно линейных зависимостях. Для

более сложных тенденций используют полиномиальную регрессию: например, при анализе зависимости прочности сплава от содержания легирующих элементов и размера зерна при некоторой температуре полином второй степени может уловить искривления тенденции. Логарифмические и экспоненциальные модели применяются, когда поведение подчинено степенным или экспоненциальным законам (например, затухающие кривые охлаждения или законам роста зерен). При малых наборах данных и понимании физической модели выбор регрессии оправдан: такие модели легко оцениваются и дают явную формулу зависимости.

Регуляризация улучшает свойства линейной регрессии. Лассо-регрессия (LASSO) добавляет L1-штраф и может занулять коэффициенты нерелевантных признаков, тем самым уменьшая сложность модели и предотвращая переобучение. Это особенно полезно, когда число экспериментальных параметров велико, но часть из них мало влияет на свойства. Ridge-регрессия вводит L2-штраф и равномерно снижает величины всех коэффициентов, что повышает устойчивость к шуму и улучшает поведение при мультиколлинеарности [3-4]. Оба метода помогают стабилизировать оценку в условиях коррелированных факторов (например, в химическом составе сплава часто содержатся взаимозависимые элементы).

Достоинства классических регрессий – простота и наглядность: физику зависимости можно анализировать напрямую. Они не требуют больших вычислительных мощностей и хорошо работают на малых наборах данных. Однако у них есть ограничения. Если связь между технологическим параметром (скорость наплавки, температура, время выдержки) и свойством материала (предел прочности, твёрдость, теплопроводность) сильно нелинейна или сложная, простая регрессия может давать большие ошибки. Полиномиальные модели легко переобучаются при повышении степени и чувствительны к выбросам. Кроме того, классические регрессии часто не учитывают взаимные корреляции признаков, что может искажать интерпретацию физического смысла коэффициентов. Например, в условиях аддитивных технологий (3D-печать металлов) и закалочных

режимов во многих исследованиях оказалось, что линейные модели дают слабую точность в силу сложной микроархитектуры наплавленного металла [5-6].

Типичные примеры применения классических регрессий – моделирование зависимости прочности или твёрдости сталей и алюминиевых сплавов от состава и режима термообработки. Так, в работе [6] по алюминиевым сплавам показывали, что полиномиальная регрессия хорошо выявляет взаимосвязь между прочностью, составом сплава и размером зерна, что позволяет получить аналитическую формулу «напрямую» из данных. Линейные зависимости, близкие к закону Холла–Пэтча (силовое усиление при уменьшении зерна), нередко описываются прямо в квадратуре или другой функциональной форме. Регрессии с регуляризацией применяются также для оценки влияния выбросов и шумов: например, при анализе экспериментальных серий испытаний на растяжение было показано, что LASSO-регрессия зануляет малозначимые факторы, упрощая модель [3].

Ансамблевые методы строят предсказание на основе совокупности моделей (деревьев решений) вместо одной. К ним относятся бэггинг (Bagging), бустинг (Boosting) и стэкинг (Stacking). Наиболее популярны Random Forest (ансамбль из случайных деревьев) и бустинговые алгоритмы (Gradient Boosting, XGBoost, LightGBM, CatBoost). Random Forest разбивает данные на случайные подвыборки и обучает множество решающих деревьев с выборкой признаков – это снижает разброс ошибок и хорошо работает на данных с разными масштабами признаков. Gradient Boosting строит деревья последовательно, исправляя ошибки предыдущих, что даёт высокую точность на сложных зависимостях. XGBoost, LightGBM и CatBoost – современные реализации бустинга, оптимизированные по скорости и качеству. CatBoost особенно эффективен при наличии категориальных признаков (например, марки стали). Стэкинг объединяет разные типы моделей (например, линейную регрессию + бустинг), обучая метамодель на их предсказаниях [7].

Преимущество ансамблей перед одиночными моделями – высокое качество предсказания для сложных и шумных данных. Ансамблевые деревья отлично улавливают нелинейности и взаимодействия факторов, которые классическая регрессия не способна смоделировать. Кроме того, агрегация по деревьям снижает чувствительность к выбросам и шуму. Так, в исследовании по аддитивному производству [8] было показано, что Random Forest и Gradient Boosting дали наивысшую точность прогнозов механических свойств, тогда как линейные модели (Ridge, LASSO) серьёзно «спотыкались» на нелинейностях и выбросах. Random Forest особенно устойчива к разным масштабам параметров и шуму, что важно при

экспериментальных данных с погрешностями.

Ансамбли применяются в задачах машинной металлургии с большими и разнородными данными: прогноз микроструктуры после термообработки, распределения остаточных напряжений, износостойкости и усталостной долговечности сплавов, оптимизацию режимов фрезерования или сварки. Например, модели на основе RF/XGBoost используют для предсказания состава фаз после закалки или спекания, а бустинги – для оценки динамических характеристик и свойств поверхности. Опыт показывает, что ансамбли, как правило, превосходят классические регрессии на типичных инженерных наборах данных как по точности, так и по устойчивости. При этом ими можно получать важность признаков: даже если модель как «чёрный ящик», алгоритмы позволяют оценить релевантность факторов (feature importance, SHAP), что частично возмещает потерю прозрачности. Недостаток ансамблей – возросшие вычислительные затраты и сложность настройки гиперпараметров (количество деревьев, глубина, скорость обучения). Кроме того, интерпретируемость моделей снижается: сложно дать физическую трактовку весам множества деревьев, хотя различные методы (древовидные графы, важность признаков) помогают разобраться хотя бы частично [9].

Сравнение классических регрессий и ансамблей по ключевым критериям иллюстрирует сводная таблица ниже (Таблица 1). Одним из главных преимуществ классических моделей является интерпретируемость: линейные регрессии имеют непосредственно физически интерпретируемые коэффициенты. Ансамбли же менее прозрачны: тяжело вывести «простой закон» из сотен деревьев, хотя современные методы (SHAP) позволяют оценить важность признаков. Что касается точности, ансамбли обычно превосходят одиночные регрессии благодаря учёту сложных зависимостей. Влияние вычислительной сложности обратно: классические модели требуют минимальных ресурсов, тогда как бустинговые ансамбли (особенно LightGBM/CatBoost с сотнями деревьев) обходятся дороже по времени обучения. Ансамбли демонстрируют лучшую устойчивость к шуму и выбросам (бэггинг снижает дисперсию прогноза), тогда как простые регрессии могут сильно реагировать на «выбросные» данные. Наконец, ансамбли обычно требуют умеренно большего объёма данных для стабильного обучения, тогда как линейные регрессии могут работать даже на очень малых выборках (нескольких десятков образцов).

На основании этого анализа можно сформулировать рекомендации. Классические регрессии целесообразно применять в тех случаях, когда важна отчётливая физическая интерпретация зависимости и связи между параметрами, а сами зависимости относительно просты. Они удобны для

анализа влияния отдельных параметров на свойства (например, в целях управления технологическим процессом по физической модели). Ансамбли лучше подходят для решения сложных, сильно нелинейных и трудно формализуемых задач, где критична максимальная точность прогноза. При ограниченности данных и желании учесть физическую информацию можно использовать гибридные подходы: например, расширять регрессию дополнительными признаками из физики материала, строить стекинг, где в качестве базовых регрессоров используются классические модели и ансамбли, или сочетать ML с физическими моделями. В перспективе развивается

направление «физически-информированного машинного обучения» (Physics-Informed ML), где данные ML-инструментов объединяются с известными уравнениями или потенциалами. Так, в [10] предложили ансамблевый подход для предсказания энергетических и упругих свойств аллотропов углерода, демонстрируя, что он обеспечивает более высокую точность, чем классические молекулярно-динамические потенциалы. А физически-информированные нейронные сети (PINN) комбинируют физические параметры с обучением нейросетей, улучшая предсказуемость структур вне обучающей выборки.

Таблица 1. Сравнение регрессионных методов.

Метод	Интерпретируемость	Точность	Сложность вычислений	Устойчивость к шуму	Объём данных
Линейная регрессия	Очень высокая (прямой вклад факторов)	Низкая (не улавливает нелинейность)	Низкая	Низкая (чувствительна к выбросам)	Очень низкий
Полиномиальная регрессия	Средняя (коэффициенты сложнее)	Средняя	Низкая	Низкая	Низкий
Ridge/LASSO	Средняя (есть регуляризация)	Средняя	Низкая	Средняя (уменьшает переобучение)	Низкий
Ансамбли (RF, бустинг)	Низкая (сложные модели)	Очень высокая	Средняя/Высокая	Высокая (за счёт бэггинга/бустинга)	Средний
Стекинг/Гибриды	Низкая	Очень высокая	Высокая	Высокая	Средний

Классические регрессионные модели и ансамбли занимают важное место в материаловедении и машиностроении. Регрессии выгодны своей простотой и интерпретируемостью при анализе линейных или полиномиальных зависимостей, тогда как ансамбли обеспечивают высокую точность при моделировании сложных структурно-свойственных связей. Обе группы методов дополняют друг друга: выбор конкретного метода следует основывать на требуемой интерпретируемости, объёме доступных данных и сложности рассматриваемого процесса. Перспективным направлением является интеграция ансамблей и классических регрессий с физическими моделями и знанием о материале (физически-информированное обучение). В итоге эффективное применение машинного обучения в инженерии требует взвешенного подхода к выбору модели: комбинируя статистические методы с физической базой, можно добиться надёжных предсказаний даже при ограниченных данных и обеспечить понимание поведения материалов. Дальнейшие исследования должны быть направлены на развитие методов машинного обучения для улучшения прогноза дефектов, а также на интеграцию предложенного подхода в системы управления производственными процессами. Важной целью является поиск путей

для создания цифровых моделей процессов экструзии, что позволит повысить эффективность и устойчивость производства, а также обеспечить более высокую степень автоматизации и контроля.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0024

1. Small data machine learning in materials science / P. Xu, X. Ji, M. Li [et al.] // npj Comput. Mater. - 2023. - Vol. 9. - Article No. 42.
2. Materials informatics for mechanical deformation: a review of applications and challenges / K. Frydrych, K. Karimi, M. Pecelerowicz, R. Alvarez, F.J. Domínguez-Gutiérrez, F. Rovaris, S. Papanikolaou // Materials. - 2021. - Vol. 14, No. 19. - Article 5764.
3. Interpretable ensemble learning for materials property prediction with classical interatomic potentials / X. Jiang, H. Sun, K. Choudhary, H. Zhuang, Q. Nian [et al.] // npj Comput. Mater. - 2025. - Vol. 11. - Article 319.
4. The mastery of details in the workflow of materials machine learning / Y. Ma, P. Xu, M. Li [et al.] // npj Comput. Mater. - 2024. - Vol. 10. - Article 141.
5. Machine learning prediction of mechanical properties in metal additive manufacturing / P. Akbari, A. Azizi, M. Amidpour [et al.] // Additive Manufacturing. - 2024. - Vol. 91. - Article 104320.
6. Emerging materials intelligence ecosystems propelled by machine learning / R. Batra, L. Song, R. Ramprasad // Nature Rev. Mater. - 2021. - Vol. 6. - P. 655-678.
7. Ensemble machine learning models for predicting strength of concrete with foundry sand and coal bottom ash as fine

- aggregate replacements / S. Paruthi, R. Verma, N. Sharma, A.H. Khan, M.A. Hasan // *Sci. Rep.* - 2025. - Vol. 15. - Article 38331.
8. Predicting the tensile properties of automotive steels at intermediate strain rates via interpretable ensemble machine learning / H. Wang, F. Lv, Z. Zhan, H. Zhao, J. Li, K. Yang // *World Electr. Veh. J.* - 2025. - Vol. 16, No. 3. - Article 123.
9. Ensembles of graph and physics-informed machine learning for scientific modeling in materials science: a review / D.D.K. Wayo, M. Kagias, A. Antoniadis, A. Mitsos // *Arch. Comput. Methods Eng.* - 2025.
10. Predicting the tensile properties of carbon FRCM using a LASSO model / M. Rodríguez-Marcos, P. Villanueva-Llaurado, J. Fernández-Gómez, J. Abellán-García, A. Sisa-Camargo // *Fibers.* - 2024. - Vol. 12, No. 12. - Article 109.

СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ АКСИАЛЬНО-ПОРШНЕВОГО НАСОСА

Горюнов Я. А., Лешаков И. А., Роцин М. Н.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; roschin50@yandex.ru

В данной работе приведена конструкция испытательного стенда аксиально-поршневого гидронасоса серии 310.12-03, созданного для изучения влияния параметров работы насоса на износостойкость пар трения различных материалов и повышение ресурса работы насоса. Установлено, что износ распределителя насоса влияет на его длительность работы и поддержание рабочего давления в гидравлической цепи.

Цель

В рамках работы изучалось, как различные параметры работы насоса влияют на износ пары трения, с целью увеличения срока службы аксиально-поршневого гидронасоса.

Введение

Аксиально-поршневые насосы применяются в большом количестве агрегатов. Они используются для подачи жидкости под высоким давлением в сложных гидравлических системах [1]. Особое место аксиально-поршневые насосы нашли в авиации [2] в качестве компонента гидравлической системы самолета. Также проводятся исследования стендов, где насос является частью гидромеханических редукторов автоматических коробок передач тихоходных транспортных средств [3, 4].

Испытательная гидравлическая установка предназначена для испытания распределителя аксиально поршневого гидронасоса серии 310.12-03. Установка создана для проведения гидравлических испытаний распределителя насоса из различных материалов, с целью увеличения износостойкости пары трения и повышения ресурса работы насоса. Испытательный стенд создан для изучения влияния параметров работы насоса: оборотов вала насоса, давления и расхода рабочей жидкости, расходуемой мощности, на износостойкость и время работы распределителя. Износ распределителя насоса влияет на его длительность работы и поддержание рабочего давления в гидравлической цепи.

Материалы и методы

На рис. 1 приведен общий вид испытательной установки. Для привода аксиально поршневого гидронасоса 2 серии 310.12-03 использовался асинхронный двигатель 1 мощностью 1,7 кВт, 930 об/мин, скорость вращения которого регулировалась теристорным преобразователем частоты 6. Регулировка частоты вращения двигателя осуществлялась с использованием преобразователя частоты INNOVERT ISD mini PLUS ISD222M43E 2,2кВт 380В. Для создания необходимого давления в гидравлической системе применялся игольчатый вентиль 3. Контроль давления в нагнетающей магистрали осуществлялся манометром 4 (ОБМ 1-160, ГОСТ 8625-69). В гидравлической системе был предусмотрен бак 5 с гидравлической жидкостью АМг-10. Гидравлическая жидкость из бака в насос

поступала самотеком с небольшим перепадом давления.



Рис. 1. Испытательная установка: 1 – двигатель, 2 – насос, 3 – вентиль, 4 – манометр, 5 – бак, 6 – теристорный преобразователь частоты.

На рис. 2 приведена блок-схема гидравлической установки.

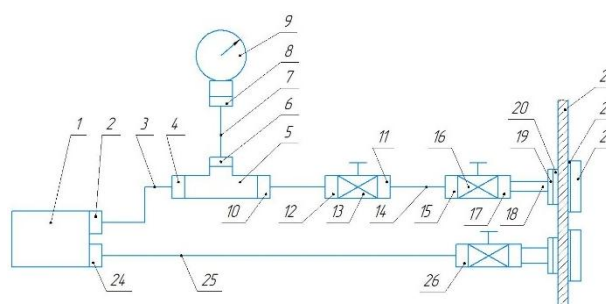


Рис. 2. Блок-схема гидравлической установки: 1 – насос, 3, 7, 14, 25 – шланги, 5 – тройник, 9 – манометр, 13 – игольчатый вентиль, 16 – запорный вентиль, 2, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 26 – штуцера, контргайки, прокладки гидравлической цепи, 23 – стенка бака.

На рис. 3 представлена электрическая блок-схема гидравлической установки.

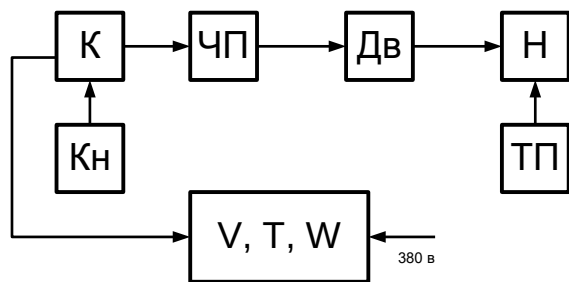


Рис. 3. Блок-схема электрическая испытательной установки: К – электромагнитный контактор ПМЕ 232-У2, Кн – кнопка пуск/стоп, ЧП – частотный преобразователь, Дв – асинхронный двигатель, Н – насос, ТП – измеритель температуры, V, I, W – измерительный комплекс К50, AC50-300V 100A.

При испытании проводились замеры тока, напряжения, мощности на измерительном комплексе К50 и AC50-300V 100A при заданных параметрах двигателя и давления нагнетания.

Заключение

Создан испытательный стенд для исследования

работы аксиально-поршневого насоса с регулируемой частотой вращения электродвигателя. В зависимости от расходуемой мощности двигателем косвенно определяли потери на трение в аксиально поршневом насосе.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0023.

1. Patrosz P., Influence of Properties of Hydraulic Fluid on Pressure Peaks in Axial Piston Pumps' Chambers // Energies. V. 14. P. 3764.
2. Petrovic R., Banaszek A., Andjelkovic M., Qananah H. R., Alnagasa K. A., Experimental Tests of the Piston Axial Pump with Constant Pressure and Variable Flow // Designs. V. 8(1). P. 5.
3. Patrosz P., Bak M., Zaluski P., Sliwinski P., Karpenko M., Methodology of Experimental Research on Efficiency of Hydro-Mechanical Automatic Gearbox // TRANSBALTICA XIII: Transportation Science and Technology. P. 393—403.
4. Lyashenko M. V., Klementiev E. V., Sokolov-Dobrev N. S., Multifunctional Test Stand for Researching of Main Operational Characteristics of the Automotive Transmission // Procedia Engineering. V. 150. P. 1233—1238.

СПОСОБ УМЕНЬШЕНИЯ БОКОВОГО ИЗНОСА ПРИ ИСПЫТАНИИ ПОКРЫТИЙ НА АБРАЗИВНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ

Денисов О.В. *, Малышев В.Н.

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия; *denisov8428@gmail.com

Проблема испытаний на абразивное изнашивание монолитных (сплошных) материалов и тонких защитных покрытий заключается в преждевременном износе последних и следующим за этим износом подложки. На преждевременный износ покрытия значительно влияет неравномерность изнашивания (боковой износ), — быстрее изнашивается та сторона, которая раньше атакуется абразивом. Была разработана машина трения, сообщающая образцу определённую частоту вращения для минимизации бокового износа. Испытания МДО-покрытий показали состоятельность нового способа.

Введение

В условиях роста промышленного производства одной из ключевых проблем, оказывающих влияние на экономические показатели, остаются потери, вызванные абразивным износом рабочих поверхностей оборудования. Издержки, связанные с износом деталей и узлов машин, оцениваются до 4% валового национального продукта у промышленно развитых стран [1]. Это говорит о потребности в поиске решений, направленных на повышение износостойкости.

В последние десятилетия набирают популярность защитные покрытия — результативные решения по повышению износостойкости.

Несмотря на большое разнообразие схем изнашивания [2], однозначной методики для испытания покрытий не существует. Близкой методикой для испытаний на абразивное изнашивание о закреплённый абразив можно считать ГОСТ 17367–71 [3], тем не менее возможность испытания именно покрытий не оговаривается. При испытании покрытий по этой методике, зачастую, образуется боковой износ, как показано на рис. 1. Вместе с покрытием начинает изнашиваться подложка, хотя покрытие может быть изношено не полностью.

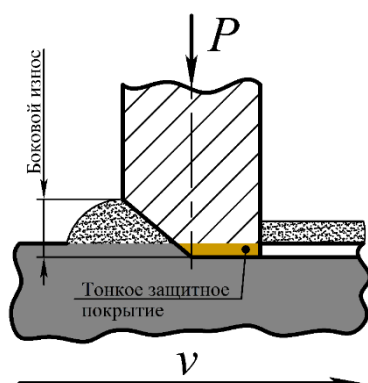


Рис. 1. «Завал», вызванный боковым износом на испытываемом образце

Одним из способов минимизации бокового износа является уменьшение диаметра испытываемого образца, что воплощено в машине трения Хрущева М.М. и Бабичева М.А. Х4-Б, где диаметр образца составлял 2 мм [4]. Эта методика

лежит в основе ГОСТ 17367–71 [3]. При малом диаметре образца существенный боковой износ не реализуется. Однако, растёт риск выкрашивания покрытия по кромке из-за краевого эффекта.

Тарасовым В.В. и соавторами [5, 6] применялась машина трения на базе фрезерного станка. Тем самым обеспечивалась жёсткость, точность позиционирования и возможность сообщать испытываемому образцу вращение вокруг его оси. Но данный способ не нашёл применений из-за технических ограничений.

Цель работы состоит в представлении положительных практических результатов испытаний тонких покрытий на разработанной авторской машине трения.

Материалы и методы

Испытания проводили со следующими материалами:

Марка	Состав	Твёрдость
Алюминиевые сплавы		
Д16	Al-осн.; 4,13 % Cu; 0,52 % Mn	90,5 ± 5,7 HV3
АМг5	Al-осн.; 5,5 % Mg; 0,68 % Mn; 0,28 % Si	-
Стали		
06Х18Н9Т	Fe-осн.; 0,06 % C; 17,24 % Cr; 8,87 % Ni; 0,42% Ti; 0,83% Mn	291,3 ± 12,0 HV3
Х12МФ	Fe-осн.; 1,49 % C; 12,25% Cr; 0,41% Mo; 0,16% V; 0,41%Mn	369,7 ± 14,7 HV3

Химический состав металлов оценивался с помощью вакуумного искрового оптико-эмиссионного анализатора СХР-980. Твёрдость измерялась с помощью твердомера Виккерса DuraScan 20.

Для микродугового оксидирования (МДО) сплавов Д16 и АМг5 использовался электролит на водной основе с добавлением гидроксида калия (КОН) и жидкого стекла (ЖСТ). Толщина покрытия

определялась с помощью микроскопа.

Для испытаний на изнашивание использовалась разработанная авторами машина трения [7], в качестве абразива использовалась шлифовальная лента ГОСТ 12439—79 [8] с электрокорундом зернистостью Р100 по ГОСТ Р 52381—2005 [9] (зерновой состав 125—212 мкм, средняя величина 143 мкм) для каждой марки сплава.

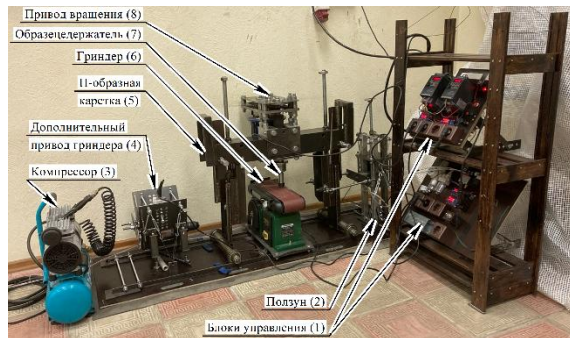


Рис. 2. Авторская машина трения

Для каждого образца применялась новая лента. Время разгона и торможения привода скольжения и вращения были зафиксированы и составляли 2 секунды, благодаря регуляторам частоты переменного тока. Схема машины трения с запатентованной системой позиционирования [7] представлена на рис. 2. Линейная скорость ленты задавалась гриндером (6) или дополнительным приводом (4) через блоки управления (1), которые также управляли приводом вращения (8) и частотой вращения образца в образцедержателе (7). Поперечная подача (поперёк ленты) обеспечивалась пневмопоршнем в ползуне (2), который перемещал П-образную каретку (5) с образцом по рельсам. Компрессор (3) использовался для обдува зоны износа, охлаждения образца и питания пневмоцилиндра.

Образцы представляли собой цилиндры диаметром 10 мм и длиной 15 мм с шероховатостью изнашиваемой поверхности не хуже $R_a 1,25$. Образцы закреплялись в цанговом зажиме ER20.

Результаты и их обсуждение

Для выбора частоты вращения образца можно использовать два подхода: 1) путь трения абразива вдоль диаметра образца должен быть не менее пути трения окружности образца [10], как показано в формуле (1); 2) за время прохождения абразива вдоль диаметра образца, образец должен совершить не менее одного оборота, как показано в формуле (2).

$$k_1 = \frac{S}{F} = \frac{\pi d}{vt}, \quad (1)$$

$$k_2 = \frac{t}{t_r} = \frac{dn}{v}, \quad (2)$$

где k_1 и k_2 – критерии интенсивности изнашивания по первому и второму подходу, соответственно. Очевидно, что $\pi k_1 = k_2$; где S – путь трения по

окружности, м; F – путь трения вдоль диаметра образца, м; d – диаметр образца, м; v – линейная скорость абразива, м/с; t – время пробега абразива вдоль диаметра образца, с; t_r – время одного оборота образца, с; n – частота вращения образца.

По результатам испытаний была построена зависимость величины бокового износа от кинематического числа k_2 (коэффициента интенсивности испытаний), как показано на рис. 3.

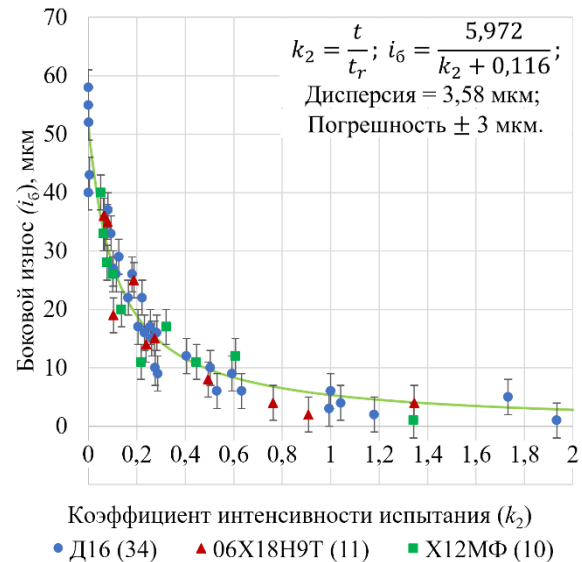


Рис. 3. Зависимость бокового износа от k_2 у образцов без покрытий. В скобках показано количество опытов

Величина бокового износа определялась с помощью рычажного микрометра по формуле (3).

$$i_6 = \max(H_j - K_j) - \min(H_j - K_j) - i_{60} \quad (3)$$

где i_6 – боковой износ, мкм; H – начальная длина образца (до испытания), мкм; K – конечная длина образца (после испытания), мкм; i_{60} – начальная неровность образца, $i_{60} = [\max(H) - \min(H)]$, мкм, $j \in [1; 8]$ – номер замеряемой позиции на краю образца.

Испытания позволяют предположить, что величина бокового износа зависит именно от кинематического критерия k_2 , кроме случаев испытания материала с высокой износостойкостью, когда боковой износ не успевает развиваться.

С целью практического подтверждения работоспособности способа, были испытаны образцы покрытий, перечисленные в табл. 1.

Таблица 1. Образцы покрытий

№ образца	Металл основы	Состав электролита	Толщина, мкм
1	Д16	2 г/л КОН + 3 г/л ЖСТ	≈110
2	АМг5	2 г/л КОН + 9 г/л ЖСТ	≈105
3	Д16	2 г/л КОН + 6 г/л ЖСТ	≈ 110

Примечание. КОН — гидроксид калия; ЖСТ — жидкое стекло.

Покрyтия были полученные методом микродугового оксидирования (МДО) в течение 45 минут при плотности тока 15 А/дм². Графики износа МДО-покрyтий показаны на рис. 4, путь трения (L , м) рассчитывался по формуле (4).

$$L = (\omega r + v) \cdot t_{\text{и}}, \quad (4)$$

где ω – угловая скорость вращения образца, мин⁻¹,
 r – радиус образца, м; $t_{\text{и}}$ – время испытания, с.

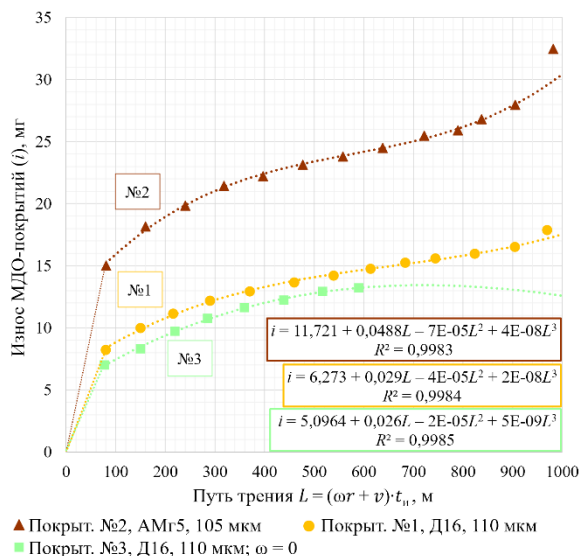


Рис. 4. Износ МДО-покрyтий. $t_{\text{и}} = 10,5$ с; $P = 0,37$ МПа; $n = 5650$ об/мин; $v = 0,38$ м/с; $k_2 = 2,46$; абразивная лента Al_2O_3 ; P100. Погрешность $\pm 0,2$ мкм

Фрактографии изношенных поверхностей МДО-покрyтий показаны на рис. 5.

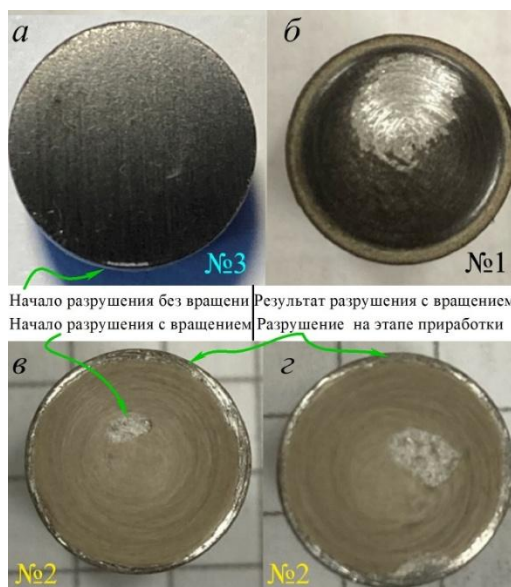


Рис. 5. Фотографии изношенных поверхностей покрyтий: а — испытание без вращения; б — изношенное покрyтие; в — начало выкрашивания; г — развитие выкрашивания

Известно, что линейная зависимость износа от нагрузки (или пути трения [11]) сохраняется, пока абразив не разрушается сдавливанием [12], и пока не происходит выкрашивание образца. Этим можно объяснить выгибы полиномов графиков износа. Значительный износ за первое испытание связан с выкрашиванием кромок, что указывает на затруднительность использования малых диаметров образцов. Кроме того, это потребует ещё более высоких частот вращения.

Заключение

С помощью авторской машины трения [7] и методики [10] получена гиперболическая зависимость бокового износа от кинематического критерия k_2 , связывающего линейную и окружную скорости испытуемого образца. Следует отметить, что график износа образца №3 (см. рис. 4) без вращения имеет другой вид, а покрyтие разрушается за меньший путь трения. Вращение образца позволяет сместить зону разрушения покрyтия ближе к центру и качественно оценить износостойкость покрyтия.

- Swain, B., Bhuyan, S., Behera, R., Sanjeeb Mohapatra, S., Behera, A. Wear: A Serious Problem in Industry // IntechOpen. doi: 10.5772/intechopen.94211.
- Куксенова Л.И., Лаптева В.Т., Колмаков А.Г., Рыбакова Л.М. Методы испытания на трение и износ: справ. изд. М.: Интернет Инжиниринг. 2001. 152 с.
- ГОСТ 17367–71. Металлы. Методы испытания на абразивное изнашивание о закрепленные абразивные частицы. М.: Издательство стандартов. 1971. 7 с.
- Хрущев М. М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. М.: Наука, 1970. 219 с.
- Тарасов В.В., Трифонов И.С. Развитие метода изнашивания материалов по закреплённому абразиву // Химическая физика и мезоскопия. 2015. Т. 17, № 1. С. 143—149.
- Патент РФ на изобретение № 2601502 МПК G01N 3/56. Способ испытания материала на абразивное изнашивание [Текст] / В. В. Тарасов, И. С. Трифонов, Ю. В. Пузанов, А. Г. Бажин; заявитель – РФ. – № 2014144837/28; заявл. 05.11.2014; опубл. 27.05.2016. – 5 с.
- Патент РФ на изобретение № 2846378 С1 МПК G01N 3/56. Машина трения для испытания на абразивное изнашивание материалов и образцов [Текст] /В. Н. Малышев, О. В. Денисов; заявитель – ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа». – заявл. 14.02.2025; опубл. 04.09.2025.
- ГОСТ 12439–79. Ленты шлифовальные бесконечные и бобины шлифовальные. Размеры. М.: ИПК издательство стандартов. 1979. 4 с.
- ГОСТ Р 52381–2005. Материалы абразивные. Зернистость и зерновой состав шлифовальных порошков. Контроль зернового состава. М.: Стандартиформ. 2005. 15 с.
- Патент РФ на изобретение № 2844959 С1 МПК G01N 3/56. Способ испытания материалов на абразивное изнашивание [Текст] /В. Н. Малышев, О. В. Денисов; заявитель – ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа». – заявл. 13.11.2024; опубл. 11.08.2025.
- Хрущев М.М., Хрущев М.М. Трение, износ и микротвердость материалов: избранные работы: (к 120-летию со дня рождения). М.: URSS, 2011. 510 с.
- Шейнман, Е. Л. Абразивный износ. Обзор американской печати // Трение и износ. 2005. Т. 26, № 1. С. 100—111.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФАКТИЧЕСКОЙ ПЛОЩАДИ КОНТАКТНОГО СОЕДИНЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПОКОЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ ШЛИФОВАНИЕМ

Дербуш Д.А.¹, Шалыгин М.Г.^{2*}

*denderbush@yandex.ru

*migshalygin@yandex.ru

¹ФКУ войсковая часть 15644, г. Знаменск, Россия;

²ФГБОУ ВО «БГТУ», г. Брянск, Россия.

Представлен анализ параметров шероховатости контактных электрических соединителей и показаны возникающие проблемы при нанесении покрытий и пути их решений, с учетом введения изменений в существующий технологический процесс гальванического никелирования с помощью электролиза, используя при этом электрохимическое шлифование поверхности представляющее собой обратный процесс, гальванического осаждения металлов, для увеличения площади фактического контакта между съемными электрическими соединителями, повышения электропроводимости и увеличения коэффициента трения покоя.

Введение

Электрические соединители имеют важное значение в обеспечении надежности и эффективности электрических и электронных систем, применяемых в таких отраслях, как автомобилестроение, авиация, телекоммуникации и бытовая электроника [1]. Разъемные соединители позволяют быстро подключать и отключать электрические цепи, что делает их крайне важными в ситуациях, требующих частой замены или обслуживания оборудования. Никелирование используется в качестве защитно-декоративного покрытия для компонентов, эксплуатирующихся в легких и средних условиях, и находит применение в различных секторах, включая автомобильную промышленность, аэрокосмическую отрасль, электронику и производство контактных электрических соединений [2]. Современные технологии никелирования значительно увеличивают срок службы электрических соединителей, работающих с низкими токами, благодаря созданию защитного слоя, который обеспечивает защиту от неблагоприятного воздействия окружающей среды. Тем не менее, ряд аспектов производства разъемных электрических соединителей, таких как шероховатость поверхности, площадь контактного соединения и коэффициент трения покоя, остаются недостаточно исследованными [3]. Эти факторы могут приводить к сбоям в работе разъемных электрических соединителей при воздействии вибраций, что, в свою очередь, мешает достижению заявленного производителем срока службы. Процесс гальванического никелирования осуществляется путем осаждения никеля на основу с использованием электролиза [4].

Основные трудности, связанные с увеличением контактной площади разъемных электрических соединителей, заключаются в необходимости проведения зачистки или шлифовки поверхностного слоя перед нанесением покрытия. Однако для компактных разъемных электрических соединителей такие операции представляют собой

значительные сложности, что делает шлифовку контактов практически невозможной. Следует отметить, что при гальваническом нанесении покрытия образованный слой точно воспроизводит рельеф подложки, что приводит к снижению фактической площади контакта между вилкой и розеткой по сравнению с номинальной. Это, в свою очередь, приводит к увеличению электрического сопротивления и снижению проводимости [5]. По этим причинам возникают проблемы в эксплуатации разъемных электрических соединителей, образование питтинга при частом соединении и разъединении вилки, вызванного механической деформацией и воздействия агрессивной окружающей среды; кроме того, наносимый поверхностный слой не способствует улучшению поверхности заготовки [6].

Материалы и методы исследований

Анализ топографии поверхности разъемного прямоугольного электрического соединителя был проведен на сканирующем зондовом микроскопе «ФемтоСкан» после каждого этапа обработки разъемного электрического соединителя.

Соединители РШ2Н-1-17 электрические низкочастотные прямоугольные малогабаритные для объёмного монтажа. Предназначены для работы в электрических цепях постоянного, переменного (частотой до 3 МГц) и импульсного тока напряжением до 400 В. Применяются для соединения и разъединения электрических цепей в узлах и блоках электронной аппаратуры общего и специального назначения. Соединители состоят из двух частей: РГ1Н-1 (розетка) и РШ2Н-1 (вилка). Розетки РГ1Н-1 выпускаются без кожуха. Вилки РШ2Н-1 выпускаются в металлическом литом, металлическом штампованно-литом или пластмассовом кожухе.

Результаты и обсуждение

Электрохимическое шлифование является процессом, противоположным гальваническому осаждению металлов: обрабатываемая деталь

выступает в роли анода и помещается в электролитическую ванну, где при определённых условиях (плотность тока, температура и время погружения) происходит удаление металла. Анодное растворение применяется в таких операциях, как очистка металлической поверхности, удаление заусенцев и грата, а также заострение и шлифование [7].

Данный процесс дает возможность определить основные критерии качества поверхностного слоя, включая макро- и микрогеометрию, наклеп, микроструктуру и остаточные напряжения. Эксплуатационные характеристики деталей машин и механизмов, такие как усталостная прочность, отражательные свойства, теплоизлучение и теплопоглощение, а также обтекаемость жидкостями и газами и коррозионная стойкость, напрямую зависят от этих критериев.

При внесении изменений в технологический процесс никелирования предлагается проводить частичное электрохимическое шлифование поверхности с повторным нанесением никелирования на данную поверхность.

На рис. 1 изображение поверхности покрытия разъемного электрического соединителя, полученного на СЗМ «ФемтоСкан». Поверхность после нанесения гальванического покрытия производства завода – изготовителя очевидно имеет большое отклонение от «гладкости».

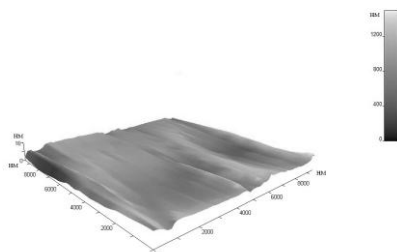


Рис. 1. Поверхность разъемного электрического соединителя

Профилограмма поверхности, представленная на рис. 3. соединителя с завода – изготовителя, где видны углубления и выступы с большим изменением шага по высоте.

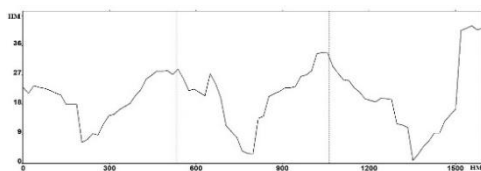


Рис. 2. Профилограмма шероховатости поверхности разъемного электрического соединителя.

При исследовании параметров шероховатости разъемных электрических соединителей возникает необходимость в увеличении контактной площади поверхности и «выглаживании» слоя контакта. Для достижения этой цели необходимо изменить технологию гальванического нанесения покрытия,

используемую заводом-изготовителем. Внедрение технологии электрохимического шлифования для нанесения гальванического покрытия позволит получить покрытие электрических соединителей с увеличенной площадью фактического контакта. Это, в свою очередь, повысит коэффициент трения покоя и, как следствие, увеличит ресурс эксплуатации разъемных электрических соединителей.

Использование технологии никелирования поверхности с электрохимическим шлифованием, и повторным нанесением слоя никеля необходимо для увеличения площади контакта поверхности, коэффициента трения покоя и обладает следующими достоинствами:

- поверхность покажет меньшее число трещин;
- меньшее число глубоких царапин и вмятин на поверхности изделия;
- увеличит электрическую проводимость;
- улучшит поверхностное соединение разъемных электрических соединителей;
- снизит возникающее при соединении контактов электрическое сопротивление;
- повысит качество поверхностного слоя контакта.

Заключение

Таким образом, за счет увеличения площади фактического контакта между электрическими соединителями увеличится коэффициент трения покоя в данном сопряжении, что приведет к увеличению ресурса работы разъемных электрических соединителей. Полученная поверхность покажет минимальное число трещин, глубоких царапин и вмятин на поверхности изделия, что в свою очередь увеличит электрическую проводимость, поверхностное соединение контактных электрических соединителей, снизит возникающее при соединении контактов электрическое сопротивление, и повысит качество полученного поверхностного слоя контакта.

1. Дербуш Д. А., Шалыгин М. Г., Евтух Е. С. Обзор технологий улучшения эксплуатационных показателей контактных электрических соединителей // Транспортное машиностроение. 2024. № 10 (34). С. 4–11. DOI 10.30987/2782-5957-2024-10-4-11. EDN FBNTTI.
2. Алафьева М. А., Сосновская Н. Г., Корчевин Н. А. Реагенты – блескообразователи для получения блестящих никелевых покрытий / // Современные технологии и научно – технический прогресс. 2022. № 9. С. 3 – 4. EDN ITWIQX.
3. Титова И. В., Панин В. И., Котенко А. А., Мочалов Д. Ю. Характеристика основных видов покрытия // Инновационные технологии и технические средства для АПК : материалы международной научно – практической конференции молодых ученых и специалистов, посвященной 110 – летию ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Воронеж, 10 – 11 ноября 2022 года. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2022. С. 391 – 396. EDN RTCWVN.
4. Звягинцева А. В., Кравцова Ю. Г. Влияние режимов электролиза на микротвердость никелевых покрытий, полученных в сульфатных электролитах никелирования // Современная электротехнология в промышленности центра России: : Труды VII региональной научно –

- технической конференции, Тула, 02 июня 2004 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2004. С. 50 – 55. EDN MAERJJ.
5. Фролов А. В., Киреев С. Ю. Реверсивный гальваностатический режим осаждения никелевых покрытий из ацетатно – хлоридного электролита // Успехи в химии и химической технологии. 2021. Т. 35, № 5(240). С. 57 – 59. EDN RNKPWA.
6. Дербуш Д. А., Шалыгин М. Г. Методика нанесения гальванических покрытий электрических контактов с использованием электрического шлифования поверхности // Трибология – машиностроению : Труды XV Международной научно – технической конференции, Москва, 12–13 ноября 2024 года. – Москва: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2024. С. 69 – 71. EDN FFWGCF.
7. Суслов А. Г., Дербуш Д. А., Шалыгин М. Г. Электрохимическое шлифование гальванизированных электрических соединителей для увеличения коэффициента трения покоя в соединении // Научные технологии в машиностроении. 2025. № 4 (166). С. 40–48. DOI 10.30987/2223-4608-2025-4-40-48. EDN SBVEBV

ТРЕХМЕРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА

Дмитриев А.Н., Бурова Ю.Е., Цымбалист М.М., Витькина Г.Ю.

Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН (Россия, Екатеринбург)

Приведена разработка трехмерной математической модели доменного процесса, которая позволяет визуализировать пространственное распределение температур, скоростей и степени восстановления с помощью скриптов на Python. Данные для визуализации получены путем интерполяции результатов расчетов, выполненных с использованием двумерной модели, на регулярную сетку. В результате визуализации на экране монитора можно увидеть пространственное распределение основных параметров работы доменной печи (газодинамика, теплообмен, восстановление), что позволяет улучшить понимание ее функционирования и оптимизировать процесс управления.

Важным этапом в производстве стали является доменная плавка, которая характеризуется сложными физико-химическими, тепловыми, газодинамическими и восстановительными процессами. Большинство двумерных моделей [1-2] позволяет оценить влияние основных параметров, например, характеристики дутья или шихтовых материалов, что позволяет провести быстрый анализ и корректировку технологии плавки. Однако двумерные модели не могут оценить процессы во всем объеме доменной печи, что приводит к неточностям.

Трехмерная модель доменного процесса позволяет учесть параметры (температуры газа, температуры шихты, скорости газа, концентрационного потенциала газа, степени восстановления) в трехмерном представлении, что повышает точность оценки и анализа и позволяет оптимизировать расход кокса, дутья и шихтовых материалов, что позволит снизить себестоимость чугуна.

Целью работы является разработка трехмерной математической модели доменного процесса на основе двумерной математической модели IMMDP [3] для улучшения точности моделирования и учета реальных геометрических параметров печи.

Двумерная модель доменной печи IMMDP представляет печь как осесимметричный объект, т.е. все интенсивные параметры (температура, скорость течения газа, восстановительный потенциал, степень восстановления) считались функциями только высоты H и радиальной координаты R [4]. Для дальнейшего развития модели требуется учет зависимости и от азимутальной координаты.

Трехмерная модель доменной печи создается как наложение решений N_f двумерных задач, где каждая из них соответствует своей фурме и рассчитывается с индивидуальными параметрами.

Исходные данные рассчитываются на нерегулярной сетке (вдоль линий тока), что неудобно для стандартных средств визуализации, требующих регулярной сетки.

Для перехода на регулярную сетку разработана программа, алгоритм которой использует взвешенную интерполяцию, где значение в узле регулярной сетки вычисляется как среднее от ближайших точек нерегулярной сетки с поправками, учитывающими расстояние.

Окончательная 3D-визуализация (построение изоповерхностей) выполняется с помощью скриптов на Python (библиотеки Matplotlib, Pandas, NumPy), которые позволяют интерактивно изучать модель.

Моделирование демонстрирует, как варьирование расхода природного газа на отдельных фурмах влияет на внутренние процессы в доменной печи:

Фурма №5 при 50 м³/т чугуна создает локальную зону с пониженной температурой и слабой конвекцией газового потока при низком расходе газа. Это приводит к неполному восстановлению сырья и может являться очагом нарушения хода печи.

Фурма №10 при 100 м³/т чугуна (стандартном расходе газа) выступает эталоном стабильной работы. Обеспечивает равномерное распределение параметров, поддерживая оптимальный температурный режим и высокую степень восстановления в своей зоне влияния.

Фурма №15 при 150 м³/т чугуна формирует область повышенного давления и температуры при высоком расходе газа. Интенсификация газового потока в этом сегменте приводит к смещению рабочих зон и создает риск ускоренного износа футеровки печи.

Основные преимущества разработанной модели:

- Выявление пространственных аномалий является главным достоинством трехмерной визуализации, что позволяет быстро идентифицировать области с аномальными значениями параметров — как повышенными, так и пониженными. Это дает возможность локализовать зоны неравномерного восстановления сырья, перегрева или "охлажденных" участков (рис.1).

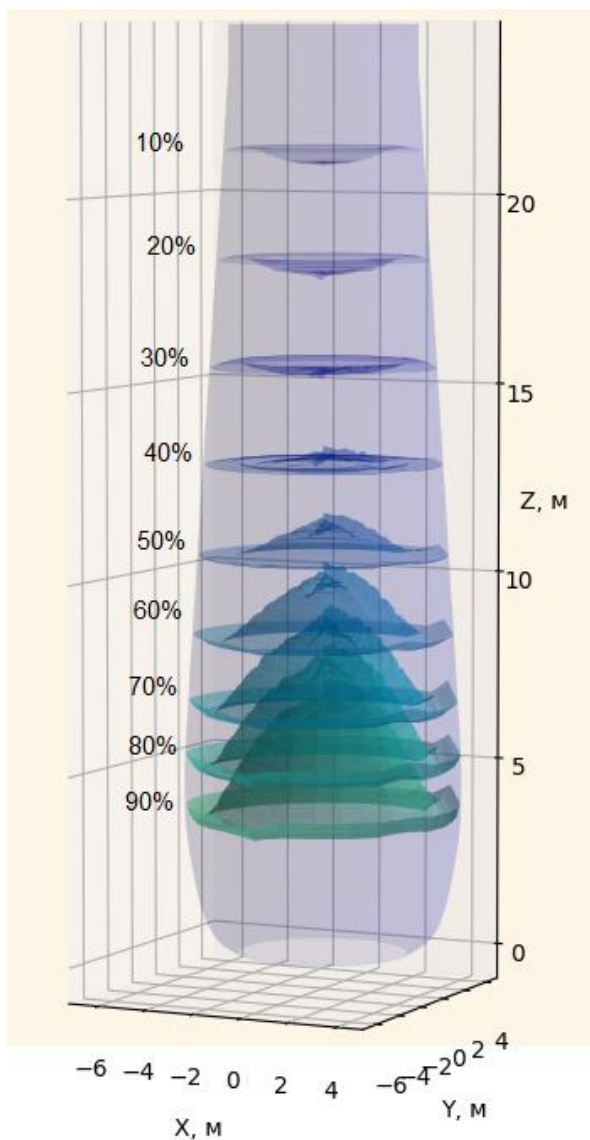


Рис. 1. Вид изоповерхности для одного из параметров степени восстановления

- Одновременно с изоповерхностями был разработан дополнительный скрипт для детального анализа в разрезе каждой фурмы. Этот инструмент

позволяет строить двумерные контурные графики с градиентной цветовой заливкой для любого сочетания параметров и плоскостей. Такое представление данных (рис.2) дает точное количественное понимание распределения параметров в вертикальном сечении, дополняя общую объемную картину.

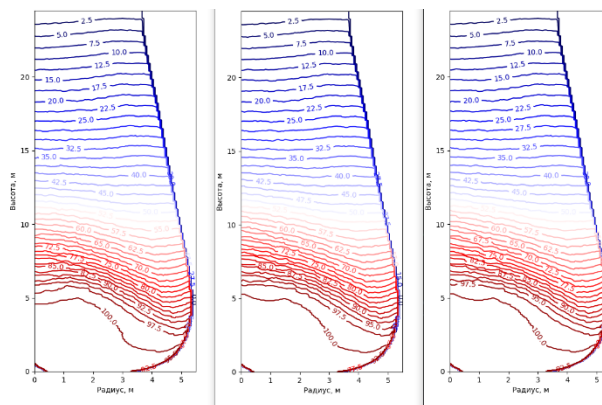


Рис. 2. Распределение степени восстановления железа по вертикальному сечению печи с расходом природного газа через фурму 50 м³/т чугуна (слева), 100 м³/т чугуна (в центре) и 150 м³/т чугуна (справа)

Трехмерное моделирование повышает точность описания процессов в доменной печи, что позволяет оптимизировать технологические параметры. Модель продолжает совершенствоваться для повышения точности расчетов.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИМЕТ УрО РАН.

1. Kuang S., Li Z., Yu A. Review on modeling and simulation of blast furnace //Steel research international. – 2018. – Т. 89. – №. 1. – С. 1700071.
2. Bi X., Torssell K., Wijk O. Simulation of the blast furnace process by a mathematical model //ISIJ international. – 1992. – Т. 32. – №. 4. – С. 470-480.
3. Дмитриев А. Н. и др. Программа для ЭВМ: IMMDP (Institute of Metallurgy Model of Domna Process).
4. Дмитриев А.Н. Математическое моделирование двумерных процессов в доменной печи // Вычислительные методы и программирование. – 2004. – Т. 5. – №. 1. – С. 252-267.

АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНОСТИ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ СКОРОСТНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ И НАГРУЖЕНИИ (ЧАСТЬ 1: СКОРОСТНОЕ НАГРУЖЕНИЕ)

Думанский А.М., Алимов М.А.

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; aldumans@yandex.ru

Исследованы нелинейные диаграммы деформирования в слоях однонаправленного углепластика при одноосном растяжении с двумя скоростями нагружения под разными углами к направлению армирования. С помощью нелинейного определяющего соотношения Работнова для каждого случая получены кривые мгновенного деформирования и зависимости между напряжениями и деформациями внутрислойного сдвига и в направлении, перпендикулярном армированию.

Значительное количество исследовательских работ по композиционным материалам с полимерной матрицей посвящено изучению их механических свойств и прочности при квазистатическом нагружении. Однако в условиях эксплуатации элементы конструкций из таких композитов, главным образом, подвергаются переменным во времени, динамическим и ударным нагрузкам. В этом случае неизбежно проявляются временные эффекты, обусловленные реономными свойствами полимерной матрицы. Ниже приводится подход, позволяющий учесть влияние скорости нагружения при расчете напряжений и деформаций в слоях однонаправленного углепластика в условиях одноосного растяжения.

Для определения напряжений и деформаций в осях ортотропии слоя (1, 2) воспользуемся формулами, справедливыми как в линейной, так и нелинейной областях деформирования [1]. Напряжения в однонаправленном слое определяются по формулам

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \sigma_x \cos^2 \theta \\ \sigma_2 &= \sigma_x \sin^2 \theta \\ \tau_{12} &= -\sigma_x \sin \theta \cos \theta,\end{aligned}\quad (1)$$

где σ_x – растягивающее напряжение, приложенное к образцу.

Формулы для деформаций были получены на предположении, что зависимость между напряжением и деформацией в направлении вдоль волокна остается линейной на протяжении всего процесса деформирования вплоть до разрушения [1]

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= (S_{11} \cos^2 \theta + S_{12} \sin^2 \theta) \sigma_x \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_x + \varepsilon_y - \varepsilon_1 \\ \gamma_{12} &= \varepsilon_y \operatorname{tg} \theta - \varepsilon_x \operatorname{ctg} \theta + 2\varepsilon_1 \operatorname{ctg} 2\theta,\end{aligned}\quad (2)$$

где ε_x и ε_y – деформации в направлениях вдоль и перпендикулярно оси нагружения образца, соответственно; θ – угол между осью нагружения образца и направлением армирования; $S_{11} = \frac{1}{E_1}$ и $S_{12} = -\frac{\nu_{12}}{E_1}$ – модули податливости; E_1 – модуль упругости слоя в направлении армирования, ν_{12} –

коэффициент Пуассона.

Влияние скорости нагружения на НДС слоя рассмотрим на результатах испытаний однонаправленного углепластика с термопластичной матрицей AS4/PEEK [2]. Испытания на одноосное растяжение образцов под углами $\theta = 0^\circ, 10^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ и 90° к направлению армирования проводились при $t = 100^\circ\text{C}$ и двух скоростях нагружения: 100 МПа/мин и 1,0 МПа/мин. Модули податливости S_{11} и S_{12} приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики слоя композита AS4/PEEK

$\dot{\sigma}_x$, МПа/мин	E_1 , ГПа	ν_{12}	S_{11} , ГПа ⁻¹	S_{12} , ГПа ⁻¹
1,0	143	0,442	0,00699	-0,00310
100	139	0,309	0,00719	-0,00222

Диаграммы деформирования образцов $\sigma_x(\varepsilon_x)$ и $\sigma_x(\varepsilon_y)$ [2] для всех случаев θ и $\dot{\sigma}_x$ были оцифрованы и по формулам (1) и (2) построены кривые внутрислойного сдвига $\tau_{12}(\gamma_{12})$ и деформирования слоя $\sigma_2(\varepsilon_2)$ в направлении, перпендикулярном армированию (трансверсальном). Кривые деформирования однонаправленного слоя для $\dot{\sigma}_x = 100$ МПа/мин и разных углов θ , перестроенные из соответствующих экспериментально определенных диаграмм $\sigma_x(\varepsilon_x)$ и $\sigma_x(\varepsilon_y)$ [2], приведены на рис. 1 и 2.

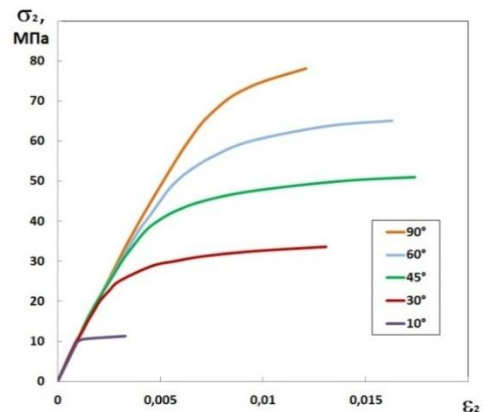


Рис. 1. Диаграммы деформирования однонаправленного слоя углепластика AS4/PEEK в направлении, перпендикулярном армированию, при скорости нагружения $\dot{\sigma}_x = 100$ МПа/мин

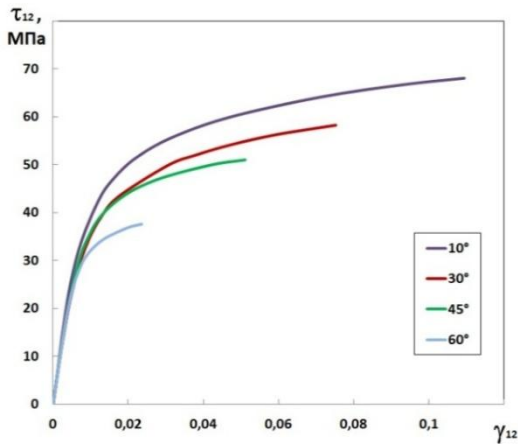


Рис. 2. Диаграммы внутрислойного сдвига однонаправленного углепластика AS4/PEEK при скорости нагружения $\dot{\sigma}_x = 100$ МПа/мин

Для описания механического поведения однонаправленного композита при скоростном нагружении используем нелинейное определяющее соотношение Работнова [3]

$$\varphi(e) = (1 + \beta I_\alpha^*)\sigma, \quad (3)$$

где $\varphi(e)$ – уравнение кривой мгновенного деформирования; e – деформация; σ – напряжение; β – параметр; $I_\alpha^* \sigma = \frac{1}{\Gamma(1+\alpha)} \int_0^t (t-\tau)^\alpha \sigma(\tau) d\tau$; $-1 < \alpha < 0$ – параметр сингулярности ядра Абеля; $\Gamma()$ – гамма-функция.

При скоростном нагружении $\sigma(t) = \dot{\sigma}t$, и тогда соотношение (3) принимает вид

$$\varphi(e) = \sigma + \chi \dot{\sigma}^{-(1+\alpha)} \sigma^{2+\alpha}, \quad (4)$$

$$\text{где } \chi = \frac{\beta}{\Gamma(3+\alpha)}.$$

При разных скоростях нагружения $\dot{\sigma}_A$ и $\dot{\sigma}_B$ и одном значении деформации соответствующие значения кривой мгновенного деформирования $\varphi_A(e)$ и $\varphi_B(e)$ должны быть равными, т.е.

$$\sigma_A + \chi \dot{\sigma}_A^{-(1+\alpha)} \sigma_A^{2+\alpha} = \sigma_B + \chi \dot{\sigma}_B^{-(1+\alpha)} \sigma_B^{2+\alpha}. \quad (5)$$

По двум кривым деформирования $\sigma(e)$, построенным по результатам испытаний с разными скоростями нагружения, можно вычислить параметры определяющего соотношения (4). Для этого производится минимизация квадратов разности значений кривых $\varphi_A(e_i)$ и $\varphi_B(e_i)$, $i = 1 \dots n$

$$F(\chi, \alpha) = \min \sum_{i=1}^n [\varphi_A(e_i) - \varphi_B(e_i)]^2. \quad (6)$$

Для каждой пары построенных ранее кривых деформирования слоя $\sigma_2(\varepsilon_2)$ и внутрислойного сдвига $\tau_{12}(\gamma_{12})$ углепластика AS4/PEEK, соответствующих двум скоростям нагружения 1,0 и 100 МПа/мин, определим $n = 5$ значений деформаций. Соответствующие им пары точек на кривых деформирования слоя используем для определения параметров χ и α путем минимизации

по формуле (6).

Скорости изменения напряжений слоя $\dot{\sigma}_2$ и $\dot{\tau}_{12}$ определялись для каждого случая θ и $\dot{\sigma}_x$ с учетом формул (1) и приведены в табл. 2.

Таблица 2. Скорости изменения напряжений слоя

θ	10°	30°	45°	60°	90°
$\dot{\sigma}_x = 1$ МПа/мин					
$\dot{\tau}_{12}$, МПа/мин	-	0,433	0,5	0,433	-
$\dot{\sigma}_2$, МПа/мин	-	0,25	0,5	0,75	1,0
$\dot{\sigma}_x = 100$ МПа/мин					
$\dot{\tau}_{12}$, МПа/мин	17,1	43,3	50	43,3	-
$\dot{\sigma}_2$, МПа/мин	3,02	25	50	75	100

В результате расчета помимо параметров χ и α было получено по 5 точек на кривых мгновенного деформирования соответствующих углам θ . Для аппроксимации мгновенных кривых по этим пяти точкам используем уравнение вида

$$\varphi(e) = ae + b(1 - \exp(-ce)). \quad (7)$$

Параметры χ и α , а также результаты аппроксимации приведены в табл. 3.

Таблица 3. Параметры χ и α и коэффициенты уравнения (7)

θ	10°	30°	45°	60°	90°
Внутрислойный сдвиг - $\varphi(\gamma_{12})$					
χ , мин ^{-(1+α)}	0,0626				
α	-0,781				
a , МПа	174	215	246	124	-
b , МПа	55,9	47,2	43,8	37,5	-
c	130	124	157	197	-
Деформирование слоя в трансверсальном направлении - $\varphi(\varepsilon_2)$					
χ , мин ^{-(1+α)}	0,0601				
α	-0,833				
a , МПа	0	0	0	0	0
b , МПа	12,8	35,7	55,8	73,9	111,3
c	1280	407	267	198	121

Расчетные кривые деформирования слоя можно получить из соотношения (4) «сползанием» с кривой мгновенного деформирования на величину, определяемую условиями нагружения

$$\sigma = \varphi(e) - \chi \dot{\sigma}^{-(1+\alpha)} \sigma^{2+\alpha}. \quad (8)$$

Некоторые расчетные диаграммы деформирования слоя представлены на рис. 3 и 4.

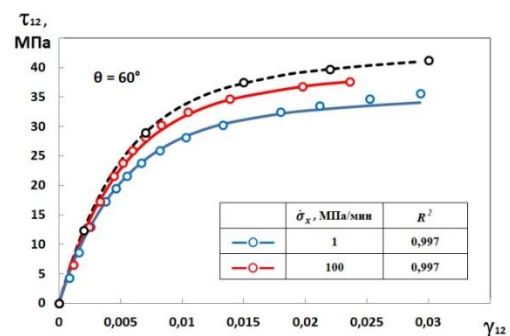


Рис. 3. Расчетные диаграммы внутрислойного сдвига однонаправленного углепластика AS4/PEEK при разных скоростях нагружения и угле $\theta = 60^\circ$

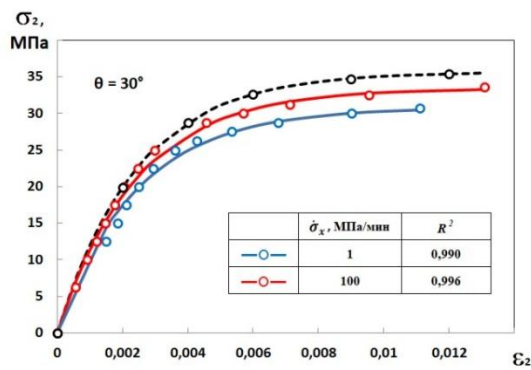


Рис. 4. Расчетные диаграммы деформирования слоя однонаправленного углепластика AS4/PEEK в трансверсальном направлении при разных скоростях нагружения и угле $\theta = 30^\circ$

На рис. 3 и 4 черным цветом показаны кривые мгновенного деформирования и 5 точек на них, которые были определены в результате минимизации по формуле (6). Цветные кривые деформирования, были построены по формуле (8) и сопоставлены с данными (точки), вычисленными по формулам (1) и (2). Сравнение показывает хорошее соответствие данных, по всем диаграммам коэффициент детерминации R^2 был в пределах $0,981 \div 0,999$.

По расчетным кривым деформирования слоя построим диаграммы деформирования $\sigma_x(\epsilon_x)$ и $\sigma_x(\epsilon_y)$ в главных осях образца, используя соотношения (1) и следующие формулы

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \epsilon_1 \cos^2 \theta + \epsilon_2 \sin^2 \theta - \gamma_{12} \sin \theta \cos \theta \\ \epsilon_y &= \epsilon_1 \sin^2 \theta + \epsilon_2 \cos^2 \theta + \gamma_{12} \sin \theta \cos \theta. \end{aligned} \quad (9)$$

Диаграммы в главных осях образца были построены для всех углов θ , и две из них представлены на рис 5 и 6, где экспериментально определенные диаграммы [2] представлены цветными линиями, расчетные – цветными точками. Диаграмма мгновенного деформирования показана штриховой линией.

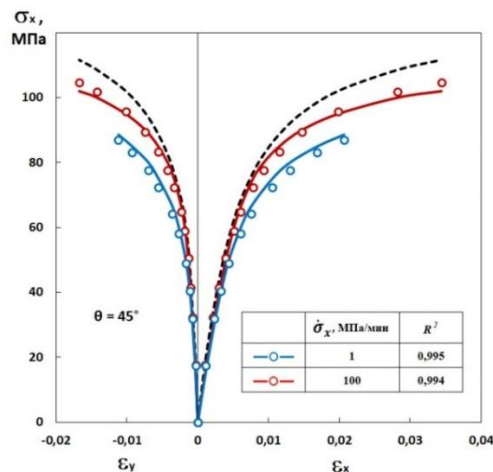


Рис. 5. Расчетные и экспериментальные диаграммы деформирования образцов углепластика AS4/PEEK при угле $\theta = 45^\circ$

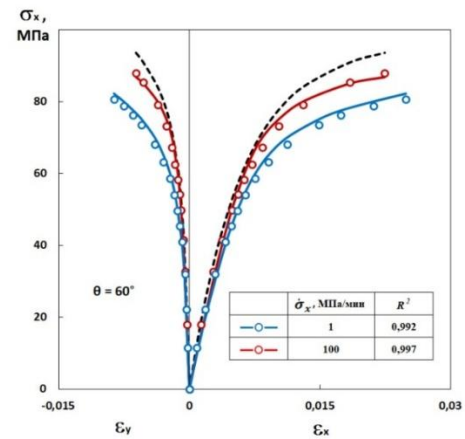


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные диаграммы деформирования образцов углепластика AS4/PEEK при угле $\theta = 60^\circ$

Из рис. 5 и 6 видно хорошее соответствие между экспериментально определенными кривыми и расчетными данными. Согласно табл. 4 по всем диаграммам деформирования коэффициент детерминации R^2 был в пределах $0,988 \div 0,997$.

Таблица 4. Коэффициенты детерминации R^2

θ	10°	30°	45°	60°	90°
$\dot{\sigma}_x = 1$ МПа/мин	-	0,994	0,995	0,992	0,993
$\dot{\sigma}_x = 100$ МПа/мин	0,997	0,997	0,994	0,997	0,988

Предложенный подход, основанный на нелинейном определяющем соотношении Работнова с ядром Абеля, удовлетворительно описывает закономерности нелинейного поведения однонаправленного углепластика при скоростном нагружении. Расчетные кривые деформирования слоя строятся путем «сползания» с диаграммы мгновенного деформирования на величину, определяемую условиями нагружения. Физический смысл функции мгновенного деформирования заключается в том, что она представляет собой верхнюю границу кривых деформирования.

Закономерности нелинейного поведения однонаправленного углепластика при скоростном деформировании будут рассмотрены в следующей статье авторов из настоящего сборника.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией): FFGU-2024-0021.

- Думанский А.М., Алимов М.А., Радченко А.А. Анализ нелинейного поведения композитного материала при одноосном растяжении // Информатизация и связь. 2013. № 1. С.69-72.
- Kawai M., Masuko Y., Kawase Y., Negishi R. Micromechanical analysis of the off-axis rate-dependent inelastic behavior of unidirectional AS/PEEK at high temperature // Int. J. of Mech. Sciences. 2001. V. 43. P.2069-2090.
- Думанский А.М., Алимов М.А., Фомина Е.И. Нелинейное деформирование однонаправленного углепластика в условиях скоростного нагружения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2025. № 1. С.11-19.

АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНОСТИ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ СКОРОСТНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ И НАГРУЖЕНИИ (ЧАСТЬ 2: СКОРОСТНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ)

Думанский А.М., Алимов М.А.

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; aldumans@yandex.ru

Исследованы закономерности нелинейного поведения однонаправленного углепластика при одноосном растяжении с двумя скоростями деформирования под разными углами к направлению армирования. С помощью алгебры резольвентных операторов получено определяющее соотношение, позволяющее описать нелинейные зависимости между напряжениями и деформациями однонаправленного слоя при скоростном деформировании.

Настоящая статья является продолжением предшествующей статьи авторов в этом сборнике [1], и ниже приводятся без повторения ссылки на некоторые выкладки и данные из этой статьи.

Материалом для исследования является однонаправленный углепластик с термопластичной матрицей AS4/PEEK [2]. Одноосное растяжение образцов из этого углепластика проводилось при скоростях деформирования $\dot{\epsilon}_x = 0,01$ и 1 %/мин. Характеристики однонаправленного слоя приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики слоя композита AS4/PEEK

$\dot{\epsilon}_x$, %/мин	E_1 , ГПа	ν_{12}	S_{11} , ГПа ⁻¹	S_{12} , ГПа ⁻¹
0,01	132	0,362	0,00756	-0,00274
1,0	138	0,305	0,00725	-0,00221

Характеристики слоя, экспериментально определенные диаграммы деформирования образцов $\sigma_x(\epsilon_x)$ и $\sigma_x(\epsilon_y)$ [2] и формулы для определения напряжений и деформаций однонаправленного слоя из [1] использовались при построении кривых деформирования слоя $\sigma_2(\epsilon_2)$ и $\tau_{12}(\gamma_{12})$ для всех случаев $\dot{\epsilon}_x$ и углов $\theta = 10^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ и 90° между осью приложения нагрузки и направлением армирования. Кривые деформирования $\sigma_2(\epsilon_2)$ при $\dot{\epsilon}_x = 0,01$ %/мин, перестроенные из экспериментальных диаграмм $\sigma_x(\epsilon_x)$ и $\sigma_x(\epsilon_y)$ [2], показаны на рис. 1.

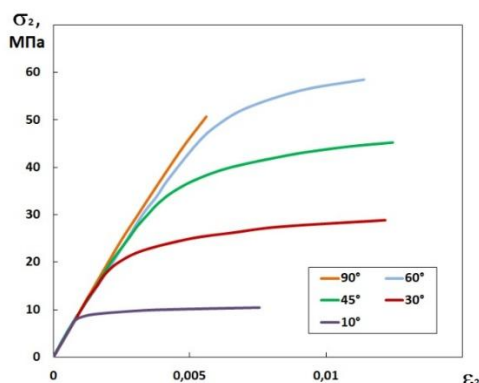


Рис. 1. Диаграммы деформирования однонаправленного слоя углепластика AS4/PEEK в направлении, перпендикулярном армированию, при скорости деформирования $\dot{\epsilon}_x = 0,01$ %/мин

Определим скорости $\dot{\epsilon}_2$ и $\dot{\gamma}_{12}$ в однонаправленном слое. В этих целях для всех случаев $\dot{\epsilon}_x$ и углов θ построим зависимости $\epsilon_2(t)$ и $\gamma_{12}(t)$, где $t = \epsilon_x / \dot{\epsilon}_x$, две из которых приведены на рис. 2 и 3.

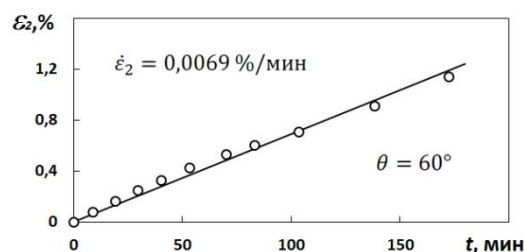


Рис. 2. Зависимость $\epsilon_2(t)$ при угле $\theta = 60^\circ$ и скорости деформирования $\dot{\epsilon}_x = 0,01$ %/мин

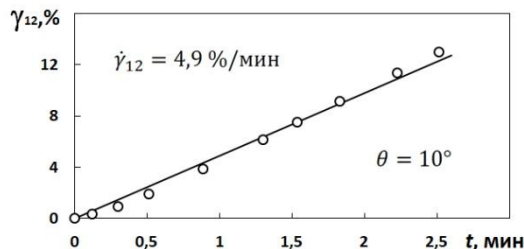


Рис. 3. Зависимость $\gamma_{12}(t)$ при угле $\theta = 10^\circ$ и скорости деформирования $\dot{\epsilon}_x = 1$ %/мин

Полученные зависимости деформаций слоя от времени близки к линейным, и скорости деформирования слоя $\dot{\epsilon}_2$ и $\dot{\gamma}_{12}$ для всех случаев можно считать постоянными величинами на протяжении всего процесса нагружения. Они приведены в табл. 2.

Таблица 2. Скорости деформирования слоя

θ	10°	30°	45°	60°	90°
$\dot{\epsilon}_x = 0,01$ %/мин					
$\dot{\gamma}_{12}$, %/мин	0,049	0,024	0,015	0,011	-
$\dot{\epsilon}_2$, %/мин	0,0027	0,0034	0,0051	0,0069	0,01
$\dot{\epsilon}_x = 1$ %/мин					
$\dot{\gamma}_{12}$, %/мин	4,9	2,4	1,5	1,1	-
$\dot{\epsilon}_2$, %/мин	0,27	0,34	0,51	0,69	1,0

Для построения кривых скоростного деформирования слоя ниже будут использованы диаграммы мгновенного деформирования, определенные ранее в статье [1] в следующем виде

$$\varphi(e) = ae + b(1 - \exp(-ce)). \quad (1)$$

Для описания поведения материала при деформировании с разными скоростями ниже используются операторные соотношения наследственной механики твердых тел [3]. В целях упрощения вычислений используем кусочно-линейную аппроксимацию кривых мгновенного деформирования. Для этого на кривой откладываем n точек, которые делят ее на $m = n - 1$ участков с касательными (мгновенными) модулями $E_i = \frac{\sigma_{i+1} - \sigma_i}{e_{i+1} - e_i}$, $i = 1 \dots m$, и тогда аналитическое выражение для кусочно-линейной кривой мгновенного деформирования может быть представлено в следующем виде

$$\varphi(e) = E_1 e - \sum_{i=2}^m (E_{i-1} - E_i)(e - e_i)H(e - e_i), \quad (2)$$

где E_1 – значение касательного модуля начального участка кривой, $H()$ – функция Хевисайда.

Отклик материала на воздействие деформаций, изменяющихся во времени, определяется следующим операторным выражением на кусочно-линейное представление [3]

$$\sigma = (1 - \beta \mathcal{Z}_\alpha^*(-\beta))\varphi(e), \quad (3)$$

где $\mathcal{Z}_\alpha(-\beta, t) = t^\alpha \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-\beta)^n (t^{1+\alpha})^n}{\Gamma[(1+\alpha)(1+n)]}$ – дробно-экспоненциальная функция Работнова, $\Gamma()$ – гамма-функция, $\mathcal{Z}_\alpha^*(-\beta)f = \int_0^t \mathcal{Z}_\alpha(-\beta, t - \xi) f(\xi) d\xi$, $\beta > 0$.

С учетом вида дробно-экспоненциальной функции в [3] было получено

$$\beta \mathcal{Z}_\alpha^*(-\beta) = \psi(t) = \beta t^{1+\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-\beta t^{1+\alpha})^n}{\Gamma[2+(1+\alpha)(1+n)]}, \quad (4)$$

где $t = e/\dot{e}$, $\beta = \chi \Gamma(3 + \alpha)$, значения параметров χ и α приведены в [1].

Отсюда с учетом (3) формулы для построения кривых скоростного деформирования слоя имеют следующий вид

- в общем случае

$$\sigma(e) = \left(1 - \psi\left(\frac{e}{\dot{e}}\right)\right)\varphi(e); \quad (5)$$

- в направлении, перпендикулярном армированию,

$$\sigma_2(\varepsilon_2) = \left(1 - \psi\left(\frac{\varepsilon_2}{\dot{\varepsilon}_2}\right)\right)\varphi(\varepsilon_2); \quad (6)$$

- при внутрислойном сдвиге

$$\tau_{12}(\gamma_{12}) = \left(1 - \psi\left(\frac{\gamma_{12}}{\dot{\gamma}_{12}}\right)\right)\varphi(\gamma_{12}), \quad (7)$$

скорости $\dot{\varepsilon}_2$ и $\dot{\gamma}_{12}$ приведены в табл. 2.

Диаграммы скоростного деформирования слоя определяются «сползанием» с кривых мгновенного деформирования $\varphi(e)$, полученных при скоростном нагружении в [1], на величину сомножителя $1 - \psi\left(\frac{e}{\dot{e}}\right) \leq 1$. При $\dot{e} \rightarrow \infty$ сомножитель $1 - \psi\left(\frac{e}{\dot{e}}\right) \rightarrow 1$, что является случаем мгновенного деформирования.

На рис. 4 и 5 приведены расчетные кривые скоростного деформирования слоя при $\theta = 30^\circ$, а на рис. 6 – перестроенные на их основе диаграммы деформирования образцов $\sigma_x(\varepsilon_x)$ и $\sigma_x(\varepsilon_y)$.

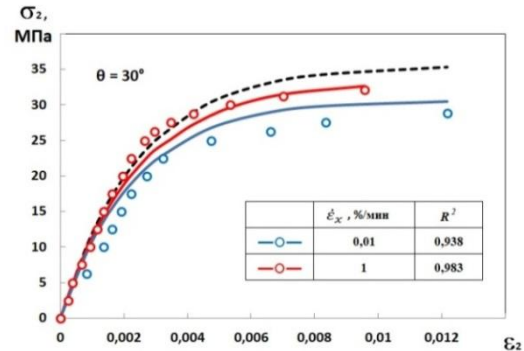


Рис. 4. Расчетные диаграммы скоростного деформирования слоя углепластика AS4/PEEK в трансверсальном направлении при угле $\theta = 30^\circ$

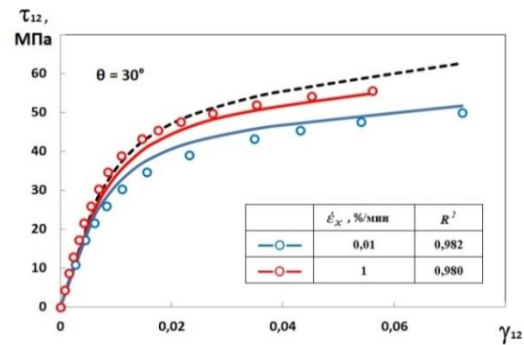


Рис. 5. Расчетные диаграммы скоростного внутрислойного сдвига углепластика AS4/PEEK при угле $\theta = 30^\circ$

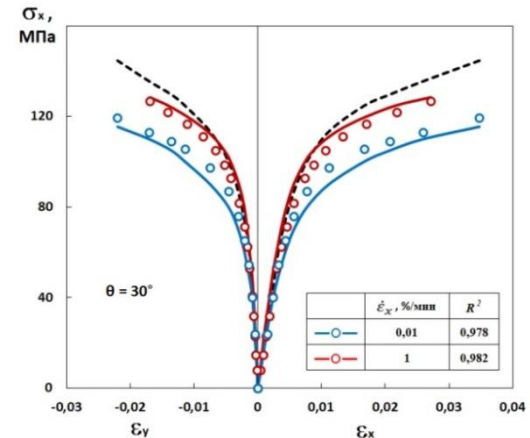


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные диаграммы деформирования образцов углепластика AS4/PEEK при угле $\theta = 30^\circ$

На рис. 4 и 5 черным цветом показаны кривые мгновенного деформирования слоя, определенные в [1], красным и синим – кривые скоростного деформирования, перестроенные по формулам (6) и (7). Цветные кривые были сопоставлены с диаграммами (точки), вычисленными по формулам для определения НДС слоя [1] (в частности, с такими диаграммами, которые показаны на рис. 1). Сравнение показывает удовлетворительное соответствие данных, по всем диаграммам

коэффициент детерминации R^2 был в пределах $0,938 \div 0,998$. На рис. 6 расчетные диаграммы (точки) сопоставлены с экспериментально определенными [2]. По всем диаграммам деформирования коэффициент R^2 был в пределах $0,978 \div 0,998$. Величина R^2 при скоростном деформировании, в целом, оказалась меньше, чем в [1], т.к. кривые мгновенного деформирования, используемые в формулах (5) – (7), определялись на основе данных скоростного нагружения [1] (назовем такой подход «метод СН»), а не скоростного деформирования.

Рассмотрим другой подход, в котором кривые мгновенного деформирования строятся по данным скоростного деформирования («метод СД»). При разных скоростях деформирования слоя $\dot{\epsilon}_A$ и $\dot{\epsilon}_B$ и одном значении деформации соответствующие значения кривой мгновенного деформирования должны быть равными, т.е. $\varphi_A(e) = \varphi_B(e)$ или

$$\sigma_A(e) \left(1 - \psi\left(\frac{e}{\dot{\epsilon}_A}\right)\right)^{-1} = \sigma_B(e) \left(1 - \psi\left(\frac{e}{\dot{\epsilon}_B}\right)\right)^{-1} \quad (8)$$

В целях вычисления параметров уравнения (4) производится минимизация квадратов разности значений кривых $\varphi_A(e_i)$ и $\varphi_B(e_i)$, $i = 1 \dots n$

$$F(\chi, \alpha) = \min \sum_{i=1}^n [\varphi_A(e_i) - \varphi_B(e_i)]^2. \quad (9)$$

Для каждой пары построенных ранее кривых деформирования слоя $\sigma_2(\epsilon_2)$ и $\tau_{12}(\gamma_{12})$ углепластика AS4/PEEK (таких, как на рис. 1), соответствующих двум скоростям деформирования $\dot{\epsilon}_{xA} = 0,01$ и $\dot{\epsilon}_{xB} = 1,0$ %/мин, определим $n = 5$ значений деформаций. Соответствующие им пары точек на кривых деформирования слоя используем для определения параметров χ и α путем минимизации по формуле (9). Скорости деформирования слоя $\dot{\epsilon}_2$ и $\dot{\gamma}_{12}$, необходимые для расчета, приведены выше в табл. 2.

В результате расчета получены параметры χ и α , а также коэффициенты уравнения (1) (табл. 3).

Таблица 3. Параметры χ и α и коэффициенты уравнения (1)

θ	10°	30°	45°	60°	90°
Внутрислойный сдвиг - $\varphi(\gamma_{12})$					
$\chi, \text{мин}^{-(1+\alpha)}$	0,0626				
α	-0,834	-0,714	-0,759	-0,817	-
$a, \text{МПа}$	145	253	254	0	-
$b, \text{МПа}$	53,7	46,8	45,4	39,9	-
c	114	127	160	185	-
Деформирование слоя в трансверсальном направлении - $\varphi(\epsilon_2)$					
$\chi, \text{мин}^{-(1+\alpha)}$	0,0601				
α	-0,765	-0,723	-0,788	-0,867	-0,990
$a, \text{МПа}$	125	109	31	0	0
$b, \text{МПа}$	11,7	35,8	56,7	78,1	144
c	1397	397	255	180	88

Используя формулу (1), были построены кривые мгновенного деформирования $\varphi(\gamma_{12})$ и $\varphi(\epsilon_2)$,

которые были сопоставлены с аналогичными кривыми, полученными ранее по результатам испытаний при скоростном нагружении [1] (в частности, с пунктирными кривыми на рис. 4 и 5). Кривые, полученные с использованием разных подходов (методов СН и СД), оказались близки, коэффициент детерминации R^2 , показывающий степень их соответствия между собой, был в пределах $0,955 \div 0,998$.

Однако диаграммы, построенные по методу СД, лучше описывают нелинейное поведение материала при скоростном деформировании. Ниже, на рис. 7, приводятся диаграммы скоростного деформирования $\sigma_x(\epsilon_x)$ и $\sigma_x(\epsilon_y)$ (изображены точками), при построении которых не использовались данные испытаний при скоростном нагружении. Сравнение с рис. 6 показывает их лучшее соответствие экспериментальным данным (цветные кривые), чем на рис. 6.

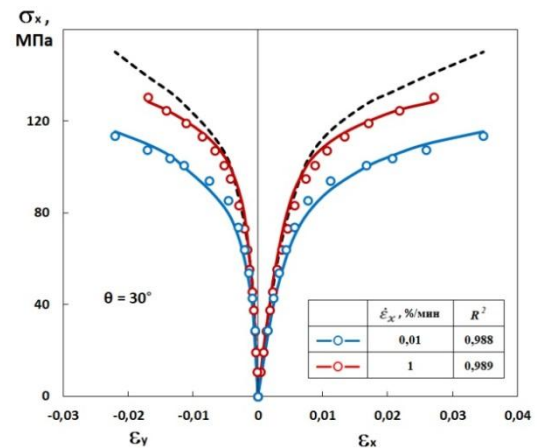


Рис. 7. Расчетные и экспериментальные диаграммы деформирования образцов углепластика AS4/PEEK при угле $\theta = 30^\circ$

На рис. 8 приведено сравнение коэффициентов детерминации R^2 , отражающих степень совпадения кривых деформирования $\sigma_x(\epsilon_x)$ и $\sigma_x(\epsilon_y)$, полученных с использованием разных подходов, с экспериментальными данными.

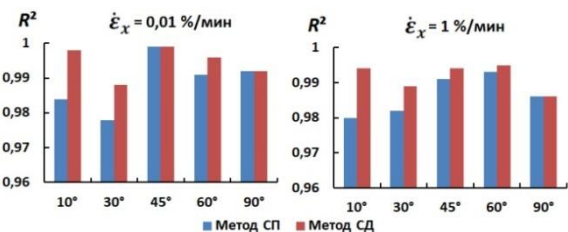


Рис. 8. Коэффициенты детерминации R^2

Тем не менее, соотношения, полученные по обоим методам, адекватно описывают нелинейное поведение углепластика при разных скоростях деформирования. Второй метод (метод СД) более предпочтителен, т.к. он точнее и зависит только от результатов испытаний при скоростном деформировании.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной

темы, присвоенной учредителем (организацией):
FFGU-2024-0021.

1. Думанский А.М., Алимов М.А. Анализ нелинейности однонаправленного углепластика при скоростном деформировании и нагружении (часть 1: скоростное нагружение) // Научные труды IX Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (FRITME-2025). М.: ИМАШ РАН. 2025.
2. Kawai M., Masuko Y., Kawase Y., Negishi R. Micromechanical analysis of the off-axis rate-dependent inelastic behavior of unidirectional AS/PEEK at high temperature // Int. J. of Mech. Sciences. 2001. V. 43. P.2069-2090.
3. Думанский А.М., Алимов М.А., Фомина Е.И. Нелинейное деформирование однонаправленного углепластика в условиях скоростного нагружения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2025. № 1. С.11-19

КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ СООТНОШЕНИЯ «СОСТАВ-СВОЙСТВО» ЧУГУНОВ МАРКИ ВЧ50

Екимова Т.А.¹, Емец К.С.¹

¹Петрозаводский государственный университет, Петрозаводск, Россия; dery@petrsu.ru

В работе представлены результаты корреляционного анализа между содержанием химических элементов в отливках из чугунов марки ВЧ50 и их твердостью. Показано, что микроструктура, оценку которой можно выполнить путем расчета коэффициента графитизации, имеет большее влияние на величину твердости, чем химический состав отливки. Полученные результаты будут использованы для построения предиктивных моделей «состав-свойство», позволяющих предсказывать механические свойства отливок на этапе их изготовления.

Введение

Современное металлургическое производство тесно связано с цифровизацией и автоматизацией всех стадий производственного цикла, начиная от проектирования состава и заканчивая контролем готовой продукции. В этих условиях всё большее значение приобретает обработка больших массивов технологической информации, что требует внедрения современных аналитических инструментов.

Использование технологий машинного обучения, включая нейронные сети, в материаловедении позволяет ускорить процессы разработки новых материалов, улучшить точность предсказания их свойств и сократить затраты на проведение дорогостоящих экспериментальных исследований. В металлургии все чаще модели машинного обучения используются не только для оптимизации производственных процессов, но и для предсказания механических свойств литых изделий [1, 2].

Точное предсказание механических свойств литейных сплавов является достаточно сложной задачей. Химический состав расплава и его модификация являются ключевыми факторами, влияющими на механические свойства чугунов, а многочисленные переменные, такие как взаимодействие легирующих элементов, структура готовой отливки, условия термической обработки, создают сложную сеть взаимосвязей, которые не всегда легко предсказать или интерпретировать. В настоящее время на предприятиях металлургического комплекса накоплен большой объем данных с технологических линий об условиях изготовления и результатах испытаний готовых изделий. Как правило, эти данные, накопленные за годы работы, не структурированы, однако они могут быть проанализированы и использованы для улучшения существующих технологий.

Целью данной работы является разведочный анализ данных о химическом составе и твердости отливок из высокопрочного чугуна марки ВЧ50. Полученные результаты будут использованы для построения предиктивных моделей «состав-свойство», позволяющих предсказывать механические свойства отливок на этапе их изготовления.

Материалы и методы исследований

Разработка и применение эффективных методов прогнозирования являются ключевым шагом в повышении качества изделий из чугунов. Для построения достоверных систем предиктивного анализа существенно зависит от качества исходных данных. К данным, которые служат основой для построения прогнозных моделей, предъявляются высокие требования. Разведочный анализ данных позволяет выполнить первоначальное описание и визуализацию данных, найти выбросы, ошибки и аномальные значения в наборе данных, выявить скрытые зависимости между химическим составом сплавов, режимами термообработки и итоговыми механическими свойствами готовой продукции. Для решения этих задач используются описательная статистика и корреляционный анализ.

В работе были проанализированы экспериментально полученные данные о химическом составе и механической твердости отливок из чугунов марки ВЧ50. Массив анализируемых данных состоял из информации о содержании (в масс. %) восьми химических элементов: углерод С, кремний Si, марганец Mn, фосфор P, сера S, хром Cr, медь Cu, никель Ni, молибден Mo, магний Mg и о твердости. Значение твердости приведено в единицах твердости по Бринеллю (НВ). Данные об отливках содержат информацию как о забракованных, так и незабракованных отливках в соответствии с ГОСТом 7293–85 [3]. Такой подход обеспечит учет всех возможных исходов и позволит в дальнейшем предсказать вероятность возникновения брака.

Главным фактором, определяющим свойства чугунов, является его микроструктура [4]. Для оценки влияния легирующих элементов на структуру и литейные свойства чугунов рассчитывались углеродные эквиваленты (CE) и коэффициент графитизации K_f :

$$CE = C + 0,33(Si + P), \quad (1)$$

$$K_f = C[Si - 0,2(Mn - 1,7S - 0,3) + 0,1P - 1,2Cr + 0,2Cu - 8Mg], \quad (2)$$

где C, Si, P, S, Mn, Cr, Cu, Mg – содержание соответствующих химических элементов в отливке.

Для оценки центральной тенденции анализируемой выборки рассчитывались среднее

арифметическое значение, мода и медианное значение [5].

Среднее арифметическое значение представляет собой элементарную оценку центральной тенденции:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}, \quad (3)$$

где:

x_i – значение элемента выборки; N – количество элементов в анализируемой выборке.

Мода – это величина, которая встречается в выборке наиболее часто.

Медиана – это числовая характеристика, отражающая центральную точку в упорядоченном наборе данных. Она делит выборку ровно на две части: 50% значений лежат ниже медианы, а остальные 50% – выше. В отличие от среднего арифметического значения и моды медиана является робастной, т.е. нечувствительной к выбросам, оценкой центрального положения.

Сравнение вычисленных значений среднего арифметического, медианы и моды позволяют оценить симметричность анализируемой выборки.

Для оценки силы связи между двумя анализируемыми параметрами (x и y) использовался коэффициент корреляции, рассчитанный по формуле [4]:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}. \quad (4)$$

Коэффициент корреляции имеет направленность и лежит в пределах от -1 до 1. Чем ближе значение коэффициента корреляции к целому значению, тем сильнее исследуемые величины влияют друг на друга. Значение коэффициента корреляции близкое к нулю говорит об отсутствии связи между анализируемыми параметрами.

Результаты и их обсуждение

На начальном этапе экспериментальные данные, полученные путем исследования отливок из чугунов, необходимо структурировать и привести их к виду, удобному для дальнейшей работы с ними. Исходный набор данных насчитывал более 3000 записей экспериментальных определений химических и физических свойств чугунов различных марок. Данные были проверены и отсортированы вручную и при помощи инструментов MS Excel. В результате предварительной обработки экспериментальных данных были исправлены опечатки, выбраны записи об образцах чугунов марки ВЧ50 только с полными и корректными данными. Если строка в массиве содержала хотя бы одно пустое поле или значение параметра было явно некорректным (например, значение твердости равно 2), то информация о таком эксперименте признавалась непригодной и удалялась. Из всех исходных данных полными и пригодными для дальнейшего анализа

оказались 346 записей об экспериментальных значениях: итоговый массив данных содержал 9 столбцов – содержание (в масс. %) 8 химических элементов и значение твердости.

Затем была проведена оценка на соответствие состава и твердости требованиям ГОСТа 7293–85. Следует отметить, что нормированные значения для меди Cu в документе не определены, однако их оценка крайне важна. Таким образом, было рассчитано число годных и негодных (бракованных) отливок, результаты приведены в табл. 1. Анализируемая выборка содержит данные как о годных, так и бракованных отливках, большинство бракованных отливок не соответствуют стандарту по твердости.

Таблица 1. Оценка соответствия химического состава и твердости отливок ГОСТу 7293–85

Всего, ед.	Годных, ед.	Брак, ед.	Брак по хим. составу, ед.	Брак по твердости, ед.
346	234	112	5	107

Для каждого параметра (содержания химического элемента и твердости) были рассчитаны мода, среднее арифметическое и медианное значения (табл.2).

Таблица 2. Результаты статистической обработки выборки

	$\bar{x}$	Медиана	Мода
C, %	3,648	3,65	3,650
Si, %	2,179	2,190	2,200
Mn, %	0,378	0,380	0,390
P, %	0,024	0,020	0,020
S, %	0,014	0,014	0,014
Cr, %	0,068	0,070	0,070
Mg, %	0,086	0,060	0,060
Cu, %	0,258	0,260	0,250
Твердость, HB	233	235	229

Результаты статистической обработки говорят о том, что экспериментальная выборка центральная и имеет симметричное распределение значений параметров в выборке.

Коэффициенты корреляции r были рассчитаны между каждым химическим элементом и значением твердости. Результаты расчетов приведены в табл. 3.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции r между содержанием химического элемента и твердостью отливки

rC	rSi	rMn	rP	rS	rCr	rMg	rCu
0,07	-0,16	0,28	0,09	-0,09	0,30	0,12	0,10

Как следует из табл.3 наибольшее влияние на твердость оказывает содержание кремния, марганца и хрома. Следует отметить, что влияние кремния и хрома, а также кремния и марганца на значение твердости взаимнообратное. Эти результаты согласуются с известными литературными данными [4]. Однако, коэффициенты корреляции между содержанием этих элементов и твердостью невысоки, и говорят о наличии слабых связей между параметрами. Это объясняется в первую очередь

тем, что содержание элементов также влияет друг на друга, а в целом, необходимо учитывать комплексное влияние химического состава на механические свойства. В литературе [4] для оценки такого влияния используют значения углеродного эквивалента и коэффициента графитизации.

Средние значения углеродного эквивалента и коэффициента графитизации, рассчитанных по формулам (1) и (2), составили 4,37 и 6,18 соответственно. Коэффициент корреляции между значением углеродного эквивалента и твердостью составил -0,016. Невысокое значение коэффициента корреляции говорит о том, что в данном случае нельзя оценить комплексное влияние химического состава на твердость. Возможно, это связано с тем, что, с одной стороны, высокопрочные чугуны не относятся к сильнолегированным чугунам; а с другой стороны предполагается, что на конечные механические свойства отливок из высокопрочных чугунов в большей степени оказывают влияние внешние условия получения, например, температура заливки или условия выпечной модификации.

Коэффициент графитизации учитывает влияние соотношения графитизирующих и антиграфитизирующих элементов в составе чугуна и влияет, в первую очередь, на структуру металла [4]. Известно, что механические свойства высокопрочных чугунов, определяются не только химическим составом, но и микроструктурой. Коэффициент корреляции между коэффициентом графитизации и твердостью имеет отрицательное значение и составляет -0,43, что говорит о наличии значимой обратной связи между параметрами.

Выводы

В работе выполнена статистическая обработка экспериментальных данных о составе и твердости высокопрочных чугунов марки ВЧ50 методами описательной статистики и корреляционного анализа.

Показано, что нет явных зависимостей между содержанием каждого из химических элементов на твердость. Наибольшее влияние на твердость оказывает содержание кремния, марганца и хрома, что хорошо согласуется с литературными данными.

Установлено, что между значением коэффициента графитизации и значением твердости имеется обратная корреляция.

Полученные результаты говорят о том, что микроструктура, оценку которой можно выполнить путем расчета коэффициента графитизации, имеет большее влияние на величину твердости, чем химический состав отливки.

1. Fragassa C., Babic M., Domingues dos Santos E. Machine Learning Approaches to Predict the Hardness of Cast Iron // Tribology in Industry 2020. V.42. No.1. P. 1—9.
2. Беляев С.А. Разработка системы поддержки принятия решений для предсказания брака в отливках из высокопрочных чугунов / С.А. Беляев, Т.А. Екимова, Р.А. Махилев, М.А. Мохов // Цифровые технологии в образовании, науке, обществе: материалы XVII Всероссийской науч.-практ. конф. (Петрозаводск, 22—24 ноября 2023 года). 2023. С.13-16.
3. ГОСТ 7293-85 Чугун с шаровидным графитом для отливок. М.: Стандартиформ, 2004 год.
4. Н.Г. Гиршович Справочник по чугунному литью. Ленинград: Машиностроение. 1978. 760 с.
5. Брюс П., Брюс Э. Практическая статистика для специалистов Data Science. СПб.: БХВ-Петербург. 2018. 304 с.

АУГМЕНТАЦИЯ ПРОЦЕССОВ НАГРУЖЕНИЯ ПО ЗАДАННОМУ КРИТЕРИЮ ПОВРЕЖДЕНИЯ

Ерпалов А.В.¹, Хорошевский К.А.¹, Гадолина И.В.²

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; erpalovav@susu.ru

² Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия

Предложен итеративный метод аугментации эксплуатационных процессов нагружения, предназначенный для генерации синтетических временных реализаций с целевым значением накопленного повреждения. Метод комбинирует традиционные подходы аугментации временных рядов с алгоритмом оптимизации и, при необходимости, расширением длительности сигнала. Валидация на реальных данных напряжений в раме фронтального погрузчика подтвердила эффективность метода, который сохраняет ключевые физические характеристики исходного процесса при достижении заданного уровня накопленного повреждения.

Введение

Интенсивный рост современных требований к точности оценки ресурса машиностроительных конструкций обуславливает необходимость использования сложных вероятностных алгоритмов, таких как методы машинного обучения.

Методы машинного обучения достигли значительных результатов в области прогнозирования долговечности конструкций. Нейронные сети различных архитектур стали применять во всех направлениях усталостной прочности материалов и конструкций: для оценки долговечности конструкций; для предсказания роста усталостных трещин, их длины и мест образования; для предиктивного анализа остаточной долговечности; для оценки предела выносливости материала; анализа процесса нагружения конструкций [1].

Основой любой нейросетевой модели являются исходные данные в виде набора данных, который должен быть достаточным по объему и обладать максимальным разнообразием. С точки зрения оценки усталостной долговечности такой набор данных должен содержать случайные процессы, различающиеся по длительности, широкополосности и интенсивности, а также обладающие различным повреждающим воздействием. В реальных условиях практически невозможно получить достаточный объем данных для разработки адекватных математических моделей из-за высокой стоимости эксперимента. Поэтому на этапе разработки модели оценки ресурса исследователи вынуждены прибегать к искусственно синтезированным процессам, имитирующим реальные эксплуатационные. Сложные эксплуатационные процессы получают в результате аугментации данных (генерации синтетических данных, подобных исходным).

В работе предлагается метод аугментации процессов нагружения, основанный на применении традиционных методов аугментации совместно с алгоритмом оптимизации для генерации процессов с различным повреждающим воздействием.

Традиционные методы аугментации

Аугментация данных представляет собой

процесс создания новых данных на основе существующих с целью увеличения объема и разнообразия обучающей выборки.

Традиционную аугментацию временных рядов можно разделить на три подхода: амплитудный, временной и частотный [2]. Также существуют гибридные методы, использующие несколько подходов [3]. Кроме того, существуют методы аугментации данных на основе машинного обучения: вариационный автокодировщик VAE [4] и генеративно-состязательные нейронные сети (GAN) [5]. Однако такие подходы требуют предварительного обучения на больших наборах данных.

В работе выбран ряд методов, ориентированных на сохранение физического смысла и ключевых статистических характеристик исходного сигнала:

1. *Искажение амплитуды (Magnitude Warping)* [6]. Метод предполагает применение переменного масштабирования к различным участкам временного ряда. В отличие от глобального масштабирования, которое применяет один коэффициент ко всему сигналу, данный метод воздействует на различные участки сигнала с разной интенсивностью, что позволяет создавать более плавные и естественные вариации исходных данных.

2. *Оконное искажение (Window Warping)* [7] – деформирует сигнал вдоль временной оси, сохраняя его амплитудные характеристики. Метод позволяет создавать вариации исходного сигнала за счет нелинейного изменения временной шкалы, что имитирует естественные изменения скорости протекания процессов. Подход заключается в выборе случайного окна во временном ряде и его последующем растяжении или сжатии с фиксированными коэффициентами (рис. 1).

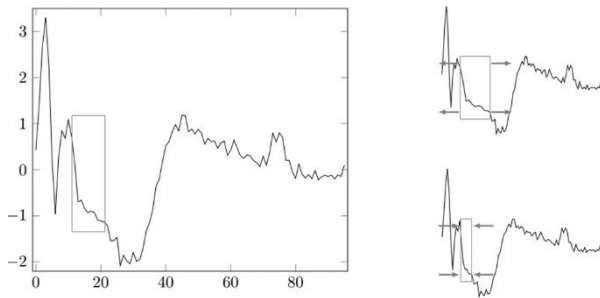


Рис. 1. К описанию метода «оконное искажение»

3. *Сдвиг во времени (циклический сдвиг)* [8]. Метод основан на циклическом переносе сигнала вдоль временной оси на случайную величину. В реальной эксплуатации процессы нагружения чаще носят циклический характер и начало регистрации сигнала часто является случайным относительно фазы процесса. Циклический сдвиг позволяет имитировать эту естественную изменчивость начала процесса регистрации.

Критерии оценки качества аугментации

Для оценки качества аугментации процессов нагружения предлагается использовать комплекс специализированных метрик, охватывающих статистические, спектральные, временные и damage-ориентированные характеристики. Такой подход позволяет гарантировать не только формальное сходство синтетических данных с исходными, но и сохранение их физического смысла, динамического характера и, что наиболее важно, повреждающей способности.

1. Статистические метрики: среднее, среднее квадратическое отклонение (СКО), максимальное значение, эксцесс, коэффициент асимметрии.

2. Спектральные метрики: спектральная плотность мощности (СПМ), спектральные моменты, коэффициент полноты спектра [9].

3. Временные метрики: частота пересечения нулевого уровня (v_0) и частота появления пиков (v_p).

4. Относительное накопленное повреждение. Достижение целевого значения D с заданной точностью является основным показателем успешности аугментации.

Предложенный метод аугментации

Разработанный метод предназначен для аугментации случайного процесса нагружения с целью достижения им заданного значения критерия усталостного повреждения. Метод базируется на применении традиционных методов аугментации, которые вынесены в отдельный модуль. Такой подход обеспечивает гибкость алгоритма, позволяя легко изменять или расширять набор используемых методов аугментации.

Алгоритм метода реализуется итеративно и состоит из двух основных контуров: контура аугментации и контура расширения длительности процесса. Схема алгоритма представлена на рис. 2.

Шаг 1: Инициализация.

В качестве входных данных задаются исходный процесс нагружения $x(t)$, целевое значение относительной долговечности D ($0 < D \leq 1$) и допустимая погрешность δ .

Шаг 2: Контур аугментации.

1) К исходному или текущему процессу нагружения применяются методы аугментации со случайно выбранными параметрами из заданного диапазона.

2) Для полученного аугментированного процесса $x'(t)$ выполняется оценка усталостной долговечности:

- Спектр нагрузок выделяется методом «падающего дождя»;
- Учет средней нагрузки и асимметрии цикла выполняется по методу Гудмана;
- Относительное повреждение d вычисляется на основе линейной гипотезы суммирования повреждений Палмгрена-Майнера.

3) Вычисленная долговечность d сравнивается с целевой D . Если условие $|d - D| \leq \delta$ выполняется, алгоритм завершает работу, возвращая аугментированный процесс $x'(t)$.

4) Если условие не выполняется, шаги 2.1–2.3 повторяются. Критически важно, что на данном этапе длина процесса остается неизменной. Алгоритм ищет такие параметры преобразований, которые обеспечат нужную долговечность за счет модификации амплитудно-временных характеристик, а не простого масштабирования амплитуд. Наложены ограничения: амплитуды не должны превышать предел текучести материала (обеспечение условий многоциклового усталости), а число итераций ограничено (например, 100).

Шаг 3: Контур расширения длительности.

Если контур аугментации исчерпал лимит итераций и не достиг цели, выполняется увеличение длительности процесса.

1) К текущему аугментированному процессу присоединяется случайный сегмент исходного процесса $x(t)$. Для исключения выбросов и переходных процессов присоединение осуществляется с использованием сплайн-функции для сглаживания.

2) Новый составной процесс становится входными данными для возврата к Шагу 2 (контур аугментации), где он снова подвергается аугментации со случайными параметрами.

3) Процедура повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто условие $|d - D| \leq \delta$.

Таким образом, метод сначала пытается найти оптимальное преобразование для процесса фиксированной длины, и только при невозможности этого – наращивает его длительность для достижения заданного уровня повреждения.

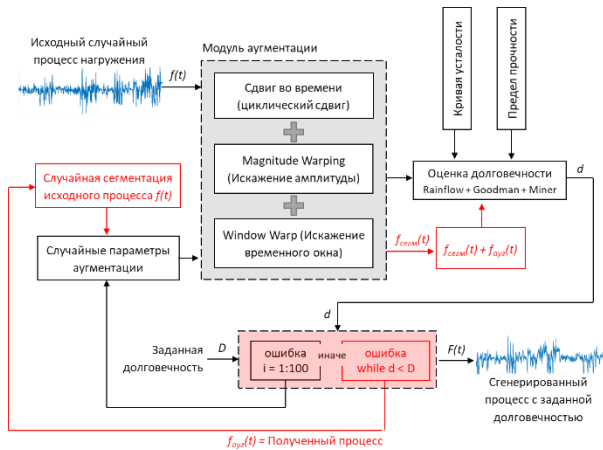


Рис. 2. Структурная схема метода аугментации

Валидация метода

Валидация предложенного метода выполнена на основе реальных экспериментальных данных, представляющих временную реализацию изменений напряжений (рис. 3) в наиболее нагруженной точке рамы фронтального погрузчика.

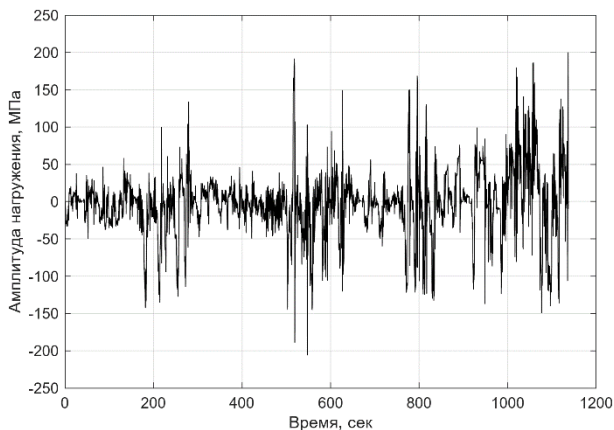


Рис. 3. Временная реализация исходного процесса

В соответствии с предложенной методологией была выполнена аугментация исходного процесса нагружения. Целевое значение относительного накопленного повреждения (D) составило 10^{-5} с допустимой абсолютной погрешностью $\delta = 0.0001$ относительно значения D .

Расчет долговечности выполнялся с использованием метода «падающего дождя» для схематизации случайного процесса, коррекции асимметрии циклов по линейной модели Гудмана и применения линейной гипотезы суммирования повреждений Палмгрена-Майнера. Относительное накопленное повреждение исходного процесса составило $4 \cdot 10^{-8}$.

В результате работы алгоритма был получен аугментированный процесс, длительность которого увеличилась в 36 раз. Сравнительный анализ представлен в табл. 1.

Таблица 1. Сравнительный анализ процессов

Характеристика	Исходный процесс	Аугм. процесс	Разница (абсол. или в %)
Статистические характеристики			
Среднее значение, МПа	-2.34	-5.56	3.22
Максимальное значение, МПа	200.2	266.3	25%
СКЗ, МПа	41.2	44.5	7%
Эксцесс	5.82	7.50	22%
Асимметрия	-0.061	-0.172	0.111
Козф. нерегулярности, I	0.097	0.107	9%
Спектральные характеристики			
Козф. полноты спектра, V	0.428	0.407	5%
Спектр. момент 0-го порядка, λ_0	1407	1937	27%
Спектр. момент 1-го порядка, λ_1	434	514	16%
Спектр. момент 2-го порядка, λ_2	677	713	5%
Спектр. момент 4-го порядка, λ_4	9417	7976	15%
v_0 (пересечения среднего)	0.694	0.607	13%
v_p (частота пиков)	3.73	3.34	10%
Параметр ширины спектра, ϵ	0.983	0.983	0%

Выводы

Разработан итеративный метод аугментации эксплуатационных процессов нагружения, который позволяет генерировать синтетические реализации с заданным значением относительного накопленного повреждения. Метод сочетает применение традиционных методов аугментации (искажение амплитуды, оконное искажение, циклический сдвиг) с алгоритмом оптимизации и, при необходимости, расширением длительности сигнала.

Ключевым преимуществом метода является его способность контролируемо варьировать повреждающую способность процесса, а не просто его форму.

Валидация метода на реальных данных эксплуатационных нагрузок рамы фронтального погрузчика показала его эффективность. Аугментированный процесс продемонстрировал 36-кратное увеличение длительности при достижении целевого уровня накопленного повреждения.

Комплексный анализ с использованием статистических, спектральных и damage-ориентированных метрик подтвердил, что метод сохраняет ключевые физические характеристики исходного процесса, обеспечивая при этом необходимое разнообразие данных.

Предложенный метод представляет собой эффективный инструмент для решения проблемы недостатка данных при обучении моделей машинного обучения для задач прогнозирования долговечности и оценки ресурса конструкций.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-29-20268,

<https://rscf.ru/project/25-29-20268/>

1. Chen J., Liu Y. Fatigue modeling using neural networks: A comprehensive review // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 2022. Vol. 45, № 4. P. 945–979.
2. Iglesias G. et al. Data Augmentation techniques in time series domain: a survey and taxonomy // *Neural Comput. Appl.* 2023. Vol. 35, № 14. P. 10123–10145.
3. Pan Q., Li X., Fang L. Data Augmentation for Deep Learning-Based ECG Analysis // *Feature Engineering and Computational Intelligence in ECG Monitoring*. Singapore: Springer Singapore, 2020. P. 91–111.
4. Kingma D.P., Welling M. Auto-Encoding Variational Bayes // *2nd Int. Conf. Learn. Represent. ICLR 2014 - Conf. Track Proc.* 2013. P. 1–14.
5. Goodfellow I. et al. Generative adversarial networks // *Commun. ACM.* 2020. Vol. 63, № 11. P. 139–144.
6. Um T.T. et al. Data augmentation of wearable sensor data for parkinson's disease monitoring using convolutional neural networks // *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Multimodal Interaction*. New York, NY, USA: ACM, 2017. P. 216–220.
7. Le Guennec A., Malinowski S., Tavenard R. Data Augmentation for Time Series Classification using Convolutional Neural Networks // *ECML/PKDD Work. Adv. Anal. Learn. temporal data*. 2016.
8. Alan Oppenheim R.S. *Discrete-Time Signal Processing*. 3rd editio. 2013. 1056 p.
9. Гадолина И.В., Ерпалов А.В., Хорошевский К.А. Анализ процессов нагружения разных типов с помощью набора полезных инструментов для последующей оценки долговечности // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2024. № 3. P. 19–29.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ОДНОГО ИЗ СПОСОБОВ СИНТЕЗА НАНОАЛМАЗОВ КАК ОСНОВЫ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Жиркевич В.Ю.¹

¹Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; basiliuss@gmail.com

В докладе рассматриваются ударно-волновые процессы, сопровождающие детонационный синтез наноалмазов в специальном водном бассейне. Моделирование проводится средствами метода конечных элементов. Показано, что при полусферическом дне бассейна достигается существенно асимметричное воздействие на газовый пузырь, образованный продуктами детонации. Это позволяет повысить эффективность охлаждения и как следствие – выход продукта.

Детонационные наноалмазы (ДНА) образуются в процессе детонации взрывчатых веществ (ВВ) непосредственно из углерода, входящего в состав этих веществ. Обладая рядом уникальных свойств, они представляют интерес для применения в различных отраслях машиностроения и, в частности, в качестве трибологического материала. Причем в последнем случае в двух разных ипостасях – как структурообразующий агент, существенно повышающий качество полимеров или гальванических покрытий, и как компонент специальных присадок к маслам, заметно снижающих трение и износ в контактных парах [1,2].

Пожалуй, основным способом синтеза ДНА в настоящее время является подрыв смесевых ВВ в условиях специальных взрывных камер. При этом наиболее распространенная технология предполагает создание в камере инертной газовой среды и заключение заряда ВВ в водную или ледяную бронировку. Это связано с тем, что при детонации давление за фронтом зоны химических реакций быстро падает, в то время как температура остается достаточно высокой, чтобы уже образовавшиеся ДНА были потеряны вследствие графитизации и окисления. Отсюда проистекает требование обеспечить в процессе синтеза интенсивное охлаждение продуктов детонации.

Анализ наиболее свежих публикаций по данной тематике позволяет заметить, что в последнее время все большее внимание уделяется исследованию факторов, влияющих на производительность процесса синтеза в условиях взрывных камер [3-5]. Этому находится достаточно очевидное объяснение – цикличность соответствующего технологического процесса и сложность его автоматизации являются его неотъемлемыми атрибутами. Откачивание продуктов детонации, установка очередного заряда, замена газовой среды на инертную и последующая герметизация требуют заметных затрат времени. То есть, в любом случае, речь идет о минутах. В связи с этим представляется заманчивым переход на технологический процесс, реализуемый в нормальных условиях и исключаящий необходимость в операциях монтажа и герметизации. Тогда время цикла можно было бы свести к секундам и тем самым увеличить

производительность как минимум на порядок.

Одним из таких процессов является подрыв заряда в водной среде специального открытого бассейна [6]. Возможная конструкция такого бассейна показана на рис.1.

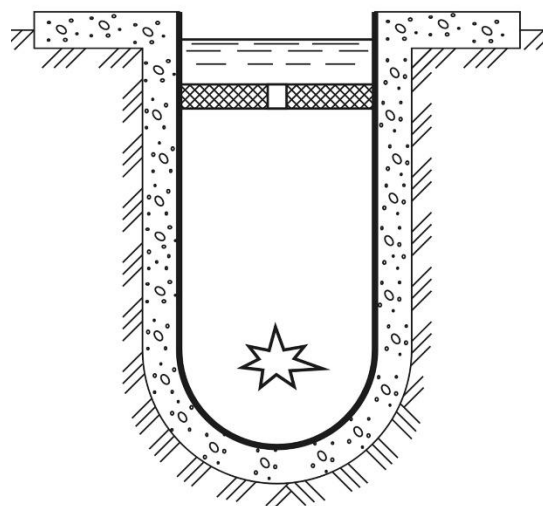


Рис. 1. Бассейн для детонационного синтеза наноалмазов

Бассейн представляет собой облицованную металлом и заполненную водой цилиндрическую бетонную конструкцию с полусферическим дном. В верхней части смонтирован сетчатый рассекатель, предназначенный для предотвращения образования водяного султана и дробления образующихся пузырей с газовыми продуктами детонации и алмазосодержащей шихтой (АШ). В центре рассекателя предусмотрено сквозное отверстие, куда через заданные промежутки времени поочередно сбрасываются заранее подготовленные заряды. Несложная автоматика позволяет производить сброс без участия человека. Существуют также не нуждающиеся в отдельном рассмотрении достаточно простые технические решения, которые позволяют автоматически инициировать заряды на заданной глубине.

Моделирование волновых явлений, происходящих во время взрыва в таком бассейне, осуществлялось в среде Explicit Dynamics программного комплекса ANSYS, и его результаты представлены на рис.2. Моделировался взрыв заряда ВВ С4 массой 1 кг в бассейне диаметром 5 м.

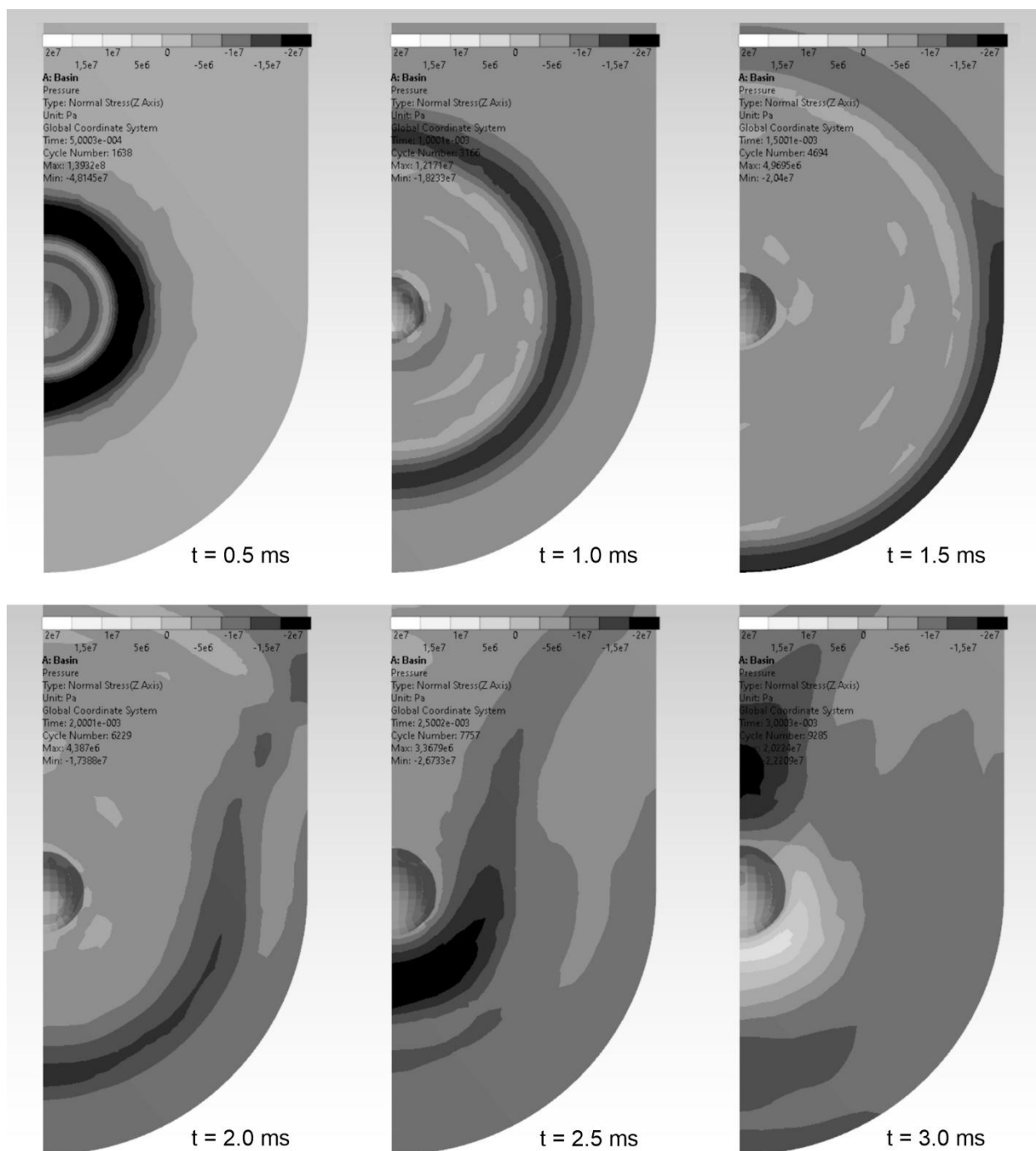


Рис. 2. Стадии прохождения ударной волны

На рисунке с интервалом 0.5 миллисекунд показаны последовательные стадии роста газового пузыря и прохождения ударной волны. Поскольку в механике деформируемого тела положительными традиционно считаются напряжения растяжения, повышенные давления в жидкости, отображенные на рисунке более темными тонами, обозначены на диаграмме отрицательными величинами.

Вполне ожидаемо движение ударной волны оказывается значительно более быстротекущим процессом в сравнении с ростом газового пузыря. Можно видеть, что после отражения от дна бассейна в момент $t = 1.5$ мс образуется сходящаяся

полусферическая волна, направляющаяся к точке подрыва. От нее заметно отстает отраженная волна, образующаяся выше точки подрыва. При этом давление на фронте волны в нижней полусфере по мере продвижения к центру возрастает и значительно превосходит давление в волне выше точки подрыва. В момент встречи с поверхностью газового пузыря давление в отраженной волне оказывается почти соизмеримым с давлением ударной волны, наблюдавшейся здесь непосредственно после взрыва.

Наибольший интерес представляет момент времени $t = 3$ мс после взрыва (последнее

изображение на рисунке). В этот момент отраженная волна, прошедшая место нахождения газового пузыря, образует зону существенно повышенного давления над ним. Одновременно под пузырем образуется значительная зона разряжения, отображаемая на рисунке светлыми тонами. Причем значения давлений в этой зоне по абсолютной величине соизмеримы с давлениями над пузырем. Понятно, что реального смысла такие значения не имеют. Разряжения в жидкости, существенно превышающие по величине гидростатическое давление в данной зоне, закономерно приведут к нарушению сплошности жидкой среды. Физически это означает, что среда прекратит свое существование в жидкой фазе, а полученный результат указывает на неизбежное разрушение четкой границы раздела сред, возникновение интенсивных кавитационных явлений, сопровождающихся образованием струйных выбросов в полость пузыря, и целого комплекса сопутствующих физических процессов, не подлежащих моделированию средствами выбранного инструмента МКЭ.

Таким образом, дальнейшая численная симуляция в рамках принятой модели теряет смысл. В то же время, полученный результат имеет важное значение, поскольку указывает на неизбежность диспергирования воды и ее активного перемешивания с газовыми продуктами детонации в зоне взрыва. А это означает их интенсивное охлаждение, чего и желательно было добиться. То есть, можно констатировать, что технология синтеза ДНА в условиях открытого водного бассейна теоретически способна обеспечить получение конечного продукта

при высокой производительности.

Установить оптимальное с точки зрения производительности сочетание массы заряда, размеров бассейна и прочих параметров возможно только в рамках натурных экспериментов. В то же время представляется очевидным, что время цикла при реализации такой технологии будет исчисляться считаными секундами, а следовательно, существует возможность увеличить производительность во много раз.

1. Буркат Г.К., Долматов В.Ю., Жиркевич В.Ю., Постнов В.Н. Новое поколение композиционных металл-алмазных гальванических покрытий на основе ультрадисперсных алмазов детонационного синтеза // *Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2000. – Т. 6, № 1. – С. 58-69.
2. Буркат Г.К., Долматов В.Ю., Жиркевич В.Ю. Перспективные применения в машиностроении алмазов детонационного синтеза // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. – 2000. – №1, С.42-49.
3. Dolmatov, V. Specific Power of Explosive and its Effect on Nanodiamonds // *Universal Journal of Carbon Research*. – 2023. – P. 66-71.
4. Dolmatov V.Yu., Rudenko D.V., Eidelman E.D., Blinova M.A. Predictive estimation of detonation nanodiamond yield based on the characteristics of carbon-containing explosives // *Journal of Advanced Materials and Technologies*. – 2024. – Vol. 9, No. 4. – P. 244-256.
5. Блинова М.А., Долматов В.Ю. Прогнозная оценка выхода детонационных наноалмазов от кислородного баланса мощных углеродсодержащих взрывчатых веществ // *Химия для биологии, медицины, экологии и сельского хозяйства : Сборник тезисов докладов Третьего международного симпозиума, Санкт-Петербург, 05–07 июня 2024 года*. – Санкт-Петербург: ООО "Издательство "ЛЕМА", 2024. – С. 102-104.
6. Глушак Б.П., Жиркевич В.Ю., Постнов В.Н. Способ утилизации боеприпасов // Патент РФ № 2087844 : заявл. 29.04.1996 : опубл. 20.08.1997.

МОДЕЛЬ УСТАЛОСТНОГО МАСШТАБНО-СТРУКТУРНОГО РАЗРУШЕНИЯ КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРИ НАГРУЖЕНИЯХ С АСИММЕТРИЕЙ ЦИКЛА

Завойчинская Э.Б.¹, Лавриков Г.Е.^{1,2}

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; george.lavrikov@yandex.ru

² Институт машиноведения им. А.А. Благоднарова РАН, Москва, Россия

Представляется метод построения кривых много- и гигацикловой усталости по уровням дефектности во всем диапазоне асимметрии цикла осевого нагружения титановых сплавов. Показывается, что расчеты для титановых сплавов BT6, ПТ-3В, BT3-1 в широком диапазоне асимметрий цикла хорошо согласуется с опытными данными. Обсуждается возможность использования методов ускоренных испытаний для определения усталостных свойств титановых сплавов.

Введение

Данная работа посвящена методу исследования вероятности хрупкого разрушения и построению кривых усталости по уровням дефектности в зависимости от коэффициента асимметрии цикла в областях много- и гигацикловой усталости титановых сплавов. Рассматривается циклическое нагружение следующего вида:

$$\sigma(\tau) = \sigma_a(\alpha + \sin \omega \tau), \quad \alpha = \frac{\sigma_m}{\sigma_a}, \quad \tau \in [0, t], \quad (1)$$

где σ_m – постоянная компонента напряжения, σ_a – амплитуда, ω – круговая частота, ν – частота, $\omega = 2\pi\nu$, N – число циклов нагружения, $N = \nu t$, α – параметр асимметрии цикла, $R = (\alpha - 1)/(\alpha + 1)$.

Исторически первым применяемым для дисков и лопаток компрессоров и турбин при температурах до 450°C является титановый сплав BT3-1, имеющий глобулярно-пластинчатую $(\alpha + \beta)$ - структуру. Для более высоких температур до 550°C разработаны сплавы BT6 (зарубежный аналог Ti-6Al-4V), BT-8 (BT8-1, BT8M-1), BT-9, BT25, BT25V. Современным динамически развивающимся направлением применения титановых сплавов является медицина: в частности, в элементах дентальных имплантатах, при эндопротезировании коленных и тазобедренных суставов и фиксации позвоночников широко используется титановый сплав BT6 и др. Новые группы титановых сплавов были созданы для гидравлических труб (Ti-3Al-2.5V), воздухопроводов (Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al), шасси (Ti-10V-2Fe-3Al) и хвостовых конусов (Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo) летательных аппаратов и др. Также в авиационной и автомобильной промышленности находят применение псевдо α -сплавы: OT-4, BT18Y (зарубежные аналоги IM1834, Ti1100), BT41. Одной из основных задач повышения ресурса является создание регламентированной структуры сплава.

Большинство элементов конструкций испытывают асимметричные нагружения, поэтому одним из актуальных вопросов является установление закономерностей развития усталостного разрушения с учетом асимметрии цикла.

Экспериментальное построение кривых

усталости при различных асимметриях цикла сопряжено с большими финансовыми и трудовыми затратами, при этом практически невозможно охватить все режимы нагружений. Вследствие этого для формирования синтетических данных при использовании технологий искусственного интеллекта как для обучения, так и для тестирования необходимо применять математическое моделирование развития процессов разрушения. Известные данные для титановых сплавов относятся, в основном, к кривым усталости по макроразрушению при симметричных и пульсирующих циклах определенных частот и при различных температурах [1—9]. Необходимость в продлении ресурса конструкций требует определение зависимости усталостных свойств материала от коэффициента асимметрии цикла в областях длительных сроков службы и назначения остаточной долговечности в областях гигацикловой (в среднем, $N_f \in (10^6, 10^{11})$ циклов) усталости. Широкое использование ускоренных испытаний требует изучения зависимости усталостных свойств материала от частоты нагружения.

Модель усталостного масштабного-структурного разрушения

В этой работе рассматривается модель усталостного масштабного-структурного разрушения, в которой определяется понятие дефекта j -ого масштабного уровня в некотором представительном объеме V_c ($V_c = L^3$ – объем твердого тела, в котором возможно зарождение начальной макротрещины-лидера длины L). Вводится непрерывная возрастающая случайная функция j -ого уровня размера длины $l_j^* = l_j^*(\tau)$ от линейного размера $l_j = l_j(\tau)$ и плотности дефекта $q_j = q_j(\tau)$. Образование дефекта j -ого масштабного уровня начинается с достижения функцией $l_{j-1}^* = l_{j-1}^*(\tau)$ предельного значения $l_{f,j-1}^*$ в момент времени τ_{j-1} , $j = 1, \dots, 6$, $\tau_0 = 0$ (в момент времени τ_j дефекты j -ого уровня достигают своего предельного состояния). Значения $l_j^* = l_j^*(\tau)$ для каждого момента времени τ , $\tau \in [0, t]$, являются случайными величинами.

В качестве функции распределения вероятности

хрупкого разрушения на j -ого $Q_j = Q_j(\tau)$ предлагается рассматривать вероятность, с которой случайная величина $l_j^*(\tau)$ больше значения $l_{f,j}^*$: $Q_j(\tau) = P(l_j^*(\tau) > l_{f,j}^*)$, $j = 1, \dots, 6$, $\tau \in [0, t]$. Функции $Q_j = Q_j(\tau)$ являются функциями процесса нагружения и для них строится рекуррентная система определяющих соотношений. Функция вероятности макроразрушения $Q = Q(\tau)$, $\tau \in [0, t]$, задается следующим образом:

$$Q(\tau) = Q_4^*(\tau) + Q_5(\tau) + Q_5^*(\tau) + Q_6(\tau), \quad (2)$$

где функция $Q_j^* = Q_j^*(\tau)$ – вероятность разрушения по дефектам j -ого уровня при формировании и развитии дефектов $(j+1)$ -ого уровня, $j = 4, 5$. Кривые усталости по уровням дефектности описываются следующими уравнениями:

$$Q_j(\tau_j) = Q_{j,th}, \quad j = 1, \dots, 6, \quad (3)$$

$$Q_j^*(\tau_j) = Q_{j,th}, Q_j^*(\tau_{j+1}) = 1 - Q_{j+1,th}, \quad j = 4, 5, \quad (4)$$

$$Q(t_f) = Q_{th}, \quad (5)$$

где τ_j – долговечность на j -ом уровне (в данной работе $Q_{j,th} = 1$), t_f – долговечность по образованию макротрещины конечной длины с некоторой заданной вероятностью Q_{th} ($Q_{th} = 1$). Дальнейшее развитие макротрещин-лидеров описывается методами и подходами механики разрушения.

Для нахождения материальных функций по опытным данным определяется пара (σ_4, N_4) , где амплитуда напряжений σ_4 принимается равной условному пределу выносливости или пределу усталости материала σ_{-1} по макроразрушению по коротким трещинам. Заметное изменение микро- и макроструктуры наблюдается при изменении числа циклов нагружения на десятичные порядки, поэтому можно предположить: $N_j = 10^{4-j} N_4$, $j = 1, 2, 3$. Пара (σ_j, N_j) , $j = 5, 6$, выбираются по кривой усталости по образованию единичных макротрещин.

При симметричном нагружении ($R = -1$) вероятности разрушения j -ого уровня $Q_j = Q_j(n)$ и $Q_j^* = Q_j^*(n)$ определяются следующими соотношениями:

$$Q_j(n) = \frac{\sigma_a}{\sigma_j(\omega, N_j)} \left(\frac{\lg n - \lg n_{j-1}(\sigma_a)}{\lg N_j - \lg n_{j-1}(\sigma_j)} \right)^\chi, \quad (6)$$

$$\lg n > \lg n_{j-1}, \quad \sigma_a > \sigma_{j-1}, \quad n_0 = 1, \quad j = 1, \dots, 6,$$

$$Q_j^*(n) = \frac{\sigma_{j+1}(\omega, N_{j+1}) - \sigma_a}{\sigma_{j+1}(\omega, N_{j+1}) - \sigma_j(\omega, N_j)} \left(\frac{\lg n - \lg n_{j-1}(\sigma_a)}{\lg N_j - \lg n_{j-1}(\sigma_j)} \right)^\chi, \quad (7)$$

$$\lg n > \lg n_j, \quad \sigma_j \leq \sigma_a \leq \sigma_{j+1}, \quad j = 4, 5,$$

где χ – материальная константа материала, $n_j, j = 1, \dots, 6$ – долговечность на j -ом уровне, выраженная в числе циклов.

Модель для нагружения с различными коэффициентами асимметрии цикла

В модели для учета влияния параметра α базовые функции $\sigma_j = \sigma_j(\alpha, \omega, N_j)$ предлагается

рассматривать в виде:

$$\sigma_j(\alpha, \omega, N_j) = \sigma_j(\omega, N_j) \cdot \hat{\sigma}(\alpha, \eta_j),$$

$$\hat{\sigma}(\alpha, \eta_j) = \alpha^c (\eta_j - 1) + 1, \quad j = 1, \dots, 6, \quad R < 0.5, \quad (8)$$

$$\hat{\sigma}(\alpha, \eta_j) = \alpha^c (1 - \eta_j) + 1, \quad j = 1, \dots, 6, \quad R > 1,$$

где c – материальная константа (см. табл. 1); при $R < 0.5$ $\eta_j = \sigma_j^0(\omega, N_j) / \sigma_j(\omega, N_j)$, при $R > 1$ $\eta_j = \sigma_j^\infty(\omega, N_j) / \sigma_j(\omega, N_j)$; $\sigma_j = \sigma_j(\omega, N_j)$, $\sigma_j^0 = \sigma_j^0(\omega, N_j)$, $\sigma_j^\infty = \sigma_j^\infty(\omega, N_j)$ – базовые функции для симметричного нагружения, пульсирующего растяжения ($R = 0$) и пульсирующего сжатия ($R = \infty$) соответственно.

Таблица 1. Значение c в зависимости от R

Диапазон R	$R \leq 0$	$R \in (0, 0.5)$	$R > 1$
c	1	5/19	1

Согласно известным опытным данным [1] в диапазоне $R \in (0.5, 1)$ имеет место циклическая ползучесть рассмотренных титановых сплавов. Например, для сплава ВТ6 в этом диапазоне максимальная деформация достигает 4%, а максимальное напряжение цикла практически не зависит от числа циклов и близко к пределу текучести сплава. Изменяется характер процесса: определяющим становится развитие процесса вязкого разрушения, характерного для процессов ползучести.

Результаты анализа усталостного разрушения титановых сплавов

Для титанового сплава ВТ6 ($\sigma_s = 950$ МПа, $\sigma_b = 1050$ МПа, σ_s – предел текучести, σ_b – временное сопротивление) выбирается $\chi = 1/2$ в выражениях (6), (7). По данным [2] выбираются следующие материальные константы: при частоте $\nu = 20$ кГц – $\sigma_4 = 450$ МПа при $N_4 = 9 \cdot 10^9$ циклов, $\sigma_5 = 475$ МПа при $N_5 = 8 \cdot 10^7$ циклов, $\sigma_6 = 500$ МПа при $N_6 = 7 \cdot 10^6$ циклов; при частоте $\nu = 30$ Гц (в условиях изгиба с вращением) – $\sigma_4 = 495$ МПа при $N_4 = 10^7$ циклов, $\sigma_5 = 600$ МПа при $N_5 = 10^5$ циклов, $\sigma_6 = 840$ МПа при $N_6 = 6 \cdot 10^3$ циклов. Результаты расчетов представлены на рис. 1: кривые усталости по шести уровням дефектности, отмеченные точечным пунктиром при $\nu = 20$ кГц и штрих пунктиром при $\nu = 30$ Гц с соответствующими цифрами; кривые усталости по макроразрушению f_t 20 кГц при $\nu = 20$ кГц и f_t 30 Гц при $\nu = 30$ Гц. Получено удовлетворительное соответствие опытным данным ($\nu = 20$ кГц – точки, $\nu = 30$ Гц – кресты).

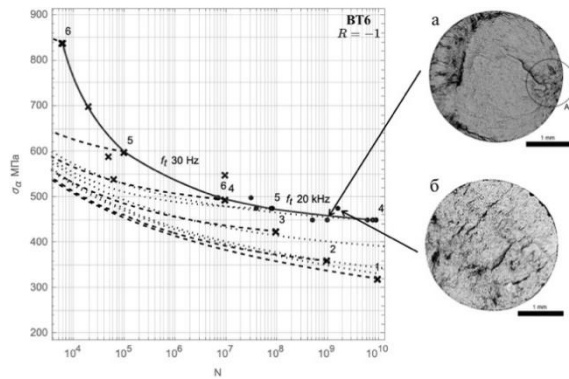


Рис. 1. Кривые усталости по уровням дефектности для титанового сплава BT6 симметричного нагружения при разных частотах и фактографии излом: (а) – $\sigma_a = 450$ МПа, $N_f = 1.17 \cdot 10^9$ циклов; (б) – $\sigma_a = 475$ МПа, $N_f = 1.74 \cdot 10^9$ циклов

В результате анализа усталостных свойств сплава BT6 от частоты (от скорости нагружения) сделаны следующие выводы. В [2] для серии образцов ($\nu = 30$ Гц, 20 кГц) наблюдается отсутствие зависимости сплава BT6 от частоты (рис. 1). При этом анализ поверхностей излома с помощью сканирующего электронного микроскопа выявил, что у большинства образцов наблюдались поверхностные трещины (рис. 1(а)), в исключительных случаях трещина развивалась под поверхностью (рис. 1(б)) [2]. В работах [3,6] рассматривается три группы образцов А, В, С сплава BT6 с различной структурой и обработкой поверхности при $\nu = 120$ Гц, 600 Гц и 20 кГц. Для образцов из группы А ($\sigma_s = 916$ МПа, $\sigma_b = 960$ МПа) с размером зерна $d = 0.007$ мм и группы В ($\sigma_s = 897$ МПа, $\sigma_b = 967$ МПа) с $d = 0.02$ мм не наблюдается влияние частоты. При этом анализ для группы С ($\sigma_s = 866$ МПа, $\sigma_b = 906$ МПа) со структурой, близкой к группе А и пределами усталости в среднем меньше до 15%, показал зависимость усталостных свойств от частоты, что, по-видимому, связано с обработкой поверхности. Предел усталости при $N_f = 10^6$ циклов и $\nu = 20$ кГц оказался на 20% выше, чем при $\nu = 120$ Гц. В образцах группы С очаг макроразрушения наблюдался на поверхности, группы А и В – на поверхности только до $N_f = 5 \cdot 10^6$ циклов до разрушения. В [4,5] для серий образцов получена немонотонная зависимость от частоты.

На рис. 2 по данным [6] построены кривые усталости по уровням дефектности для сплава BT6 при частотах нагружения $\nu = 120$ Гц и 20 кГц с асимметриями $R = -1, 0, 0.3$ в координатах $\sigma_{max} \sim N$ (σ_{max} – максимальное напряжение) по соотношениям (2)-(7) с учетом (8). Точками обозначаются опытные данные при $R = 0$, крестами – при $R = 0.3$ и звёздами – при $R = -1$. Максимальное значение напряжения при $R = 0.3$, в среднем, увеличивается на 15% по сравнению с симметричным циклом при одинаковых долговечностях. Получено удовлетворительное

соответствие опытным данным.

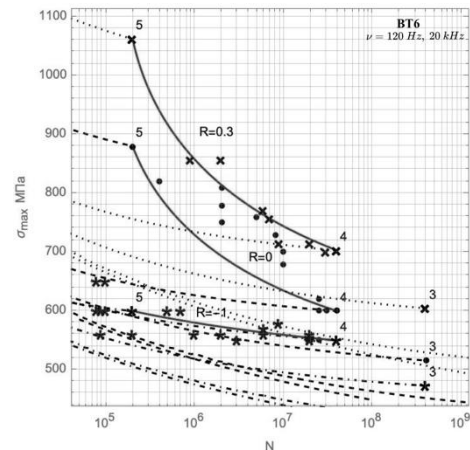


Рис. 2. Кривые усталости по уровням дефектности для титанового сплава BT6 при разных R

По экспериментальным данным [7] для титанового сплава ПТ-3В ($\sigma_s = 667$ МПа, $\sigma_b = 736$ МПа, $\chi = 1/2$) при $\nu = 5$ Гц построены кривые усталости по уровням дефектности и по макроразрушению при $R = -5, -2, -1, 0$. Получено хорошее соответствие известным опытным данным. Для сплава ПТ-3В наблюдается уменьшение σ_{max} при $R = -5$, примерно в 3.8 раза, по сравнению с симметричным циклом при одинаковых долговечностях.

Для титанового сплава BT3-1 ($\sigma_s = 960$ МПа, $\sigma_b = 1100$ МПа, $\chi = 1/3$) по опытным данным [8] фиксируется зависимость усталостных свойств от частоты, что связано со структурой или с поверхностью рассматриваемых серий образцов. Наблюдается увеличение пределов усталости, в среднем, до 40% при равных долговечностях. Также для сплава BT3-1 получены кривые усталости по четырем уровням дефектности при $\nu = 100$ Гц и $R = -1, 3, \infty$ на основании экспериментальных данных [9]. Получено, что при $R = 3$ пределы усталости увеличиваются в среднем в два раза по сравнению с симметричным циклом при равных долговечностях.

Закключение

В этой работе предложены расчетные кривые усталости по уровням дефектности для титановых сплавов BT6, ПТ-3В, BT3-1 при разных частотах и асимметриях циклов, удовлетворительно описывающие опытные данные. Анализ экспериментальных данных по исследованию зависимости усталостных свойств от частоты нагружения на примере сплава BT6 показал, что они, в основном, определяются структурой сплава и обработкой поверхности образцов.

1. Peters J.O., Boyce B.L., Chen X., McNaney J.M., Hutchinson J.W., Ritchie R.O. On the application of the Kitagawa-Takahashi diagram to foreign-object damage and high-cycle fatigue // Eng. Fract. Mechanics. 2002. V.69. P.1425–1446.
2. Janecek M., Novy F., Harcuba P., Strasky J., Trsko L., Nhade

- M., Wagner L. The Very High Cycle Fatigue Behaviour of Ti-6Al-4V Alloy // *Acta Physica Polonica A*. 2015. V.128. P.497-502.
3. Takeuchi E., Furuya Y., Nagashima N., Matsuoka S. The effect of frequency on the gigacycle fatigue properties of a Ti-6Al-4V alloy // *Fatigue Fract. of Eng. Mater. Struct.* 2008. V.31. P.599-605.
4. Bathias C., Paris P. C. Gigacycle fatigue in mechanical practice // New York: Dekker Publisher. 2005. 304 p.
5. Нгуен Нгок Т., Капралов В.М., Коленько Г.С. Влияние частот нагружения на сопротивление усталости материала // *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*. 2019.Т.25. № 2. С.68-77.
6. Furuya Y., Nishikawa H., Hirukawa H., Nagashima N., Takeuchi Catalogue of NIMS fatigue data sheets // *Sci. and Tech. of advanced mater.* 2019. V.20(1). P.1055-1072.
7. Багмутов В.П., Водопьянов В.И., Кондратьев О.В., Бадиков К.А. Усталостная прочность при отрицательных значениях коэффициента асимметрии стали 45 и титанового сплава ПТ-3В // *Известия ВолгГТУ*. 2015. С.69-73.
8. Шанявский А.А., Никитин А.Л., Palin-Luc T., Bathias C. Масштабная иерархия процессов малоциклового, многоциклового и сверхмногоциклового усталости разрушения титанового сплава ВТ3-1 // *Физическая мезомеханика*. 2014. Т.17. № 4. С.59-68.
9. Оспенникова О.Г., Наприенко С.А., Автаев В.В. Влияние морской воды на сопротивление многоциклового усталости сплава ВТ3-1 при различных коэффициентах асимметрии // *Труды ВИАМ*. 2019. № 1(73). С.116-124

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИИ НА НАНОУРОВНЕ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Зюзин Д.И.¹

¹ Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

Настоящая статья представляет собой комплексный анализ современного состояния и перспектив развития метрологического обеспечения измерений нанообъектов (нанометрологии). На основе результатов проведенного анализа, выявлены проблемы и ряд ключевых стратегических направлений по их решению. Во-первых, для повышения точности проводимых измерений предложена разработка и внедрение высокоточных квантовых эталонов. Во-вторых, предложено развитие и усиление международного сотрудничества и развития общей стандартизации для обеспечения глобальной сопоставимости и доверия к данным. В-третьих, предложен метод мультипараметрических методов измерений. В-четвертых, предложено совершенствование методик, оборудования и жесткого контроля окружающей среды для снижения количества артефактов.

Введение

С ростом популярности нанотехнологий и наноматериалов возникает ряд актуальных проблем, требующих немедленного решения. Ключевой из них является разработка надежных и точных методов измерений на наноуровне, где перестают действовать классические законы физики. Параллельно необходимо создание новых эталонов и измерительных средств с исключительно высокой разрешающей способностью и чувствительностью. Ярким примером служит измерение размеров и свойств наночастиц, тонких пленок и нанотрубок.

В настоящее время традиционные единицы измерения оказываются неприменимыми на наноуровне из-за проявления квантовых эффектов и доминирующей роли поверхностных явлений. Высокоточное воспроизведение этих единиц требует разработки принципиально новых эталонов и методик. Например, определение метра через длину волны излучения атома цезия теряет практический смысл при работе с нанообъектами, размеры которых сопоставимы с длиной волны электрона."

С ростом популярности нанотехнологий и наноматериалов возникает ряд актуальных проблем, требующих немедленного решения.

Исследование и анализ проблем

1. Физические ограничения

– *Квантовые эффекты*, такие как туннелирование электронов, квантовая интерференция, дискретность энергии делают неприменимыми классические законы физики [1-3].

– *Влияние поверхностных эффектов*. Как известно [4] свойства наноматериалов зависят от поверхностных эффектов и явлений, таким образом с уменьшением размеров контролируемых объектов идет рост отношения площади поверхности к ее объему, а, следовательно, и поверхностная энергия Гиббса начинает преобладать над объемной, что приводит к изменению термодинамических, термодинамических, электронных (работа выхода, зонная структура) и механических (прочность, пластичность) свойств наноструктур.

– *Тепловые флуктуации* приводят к шумам и

нестабильности измерений [5].

2. Технологические ограничения

– *Ограниченная точность* современных средств измерений. Один из важных примеров проблемы точности современных средств измерений являются атомно-силовые и сканирующие туннельные микроскопы [6-8].

– *Сложность калибровки из-за отсутствия эталонов*. Отсутствие непрерывной цепочки сравнений от национального эталона к рабочему и первичным эталонам для нанодиапазона, а вместе с этим и проблема прослеживаемости к международным стандартам.

– *Влияние внешних факторов* (вибрация, температура, влажность) [9].

– *Влияние процесса измерений*. Такие параметры, как температура, механическое воздействие, электрические и магнитные поля оказывают влияние на процесс и результаты проводимых измерений [9].

– *Нестабильность наноматериалов*. Наночастицы металлов, таких как например, Ag, Fe быстро окисляются на воздухе, на наноматериалы оказывает влияние адсорбция молекул из окружающей среды, что изменяет их поверхностные свойства, а также агрегация и агломерация наночастиц при измерениях под влиянием Ван-дер-ваальсовой силы.

3. Метрологические ограничения

– *Нехватка стандартизированных методик измерений*. Различие в применяемых лабораториями методик, разрабатываемых протоколов, затрудняет сравнение данных [10,11].

– *Проблемы прослеживаемости результатов к международным эталонам*. Слабая связь результатов измерений с международными эталонами из-за отсутствия надежной калибровочной цепочки.

Анализ и предложения по решению проблем

Проанализировав выявленные проблемы современной метрологии в области наноизмерений можно предложить следующие решения:

– *Разработка новых эталонов*. Основывая на квантовых явлениях, способные обеспечивать

высокую точность [12].

– *Применение стабильных наноматериалов.* Такие стабильные материалы, как золотые наночастицы или квантовые точки CdSe являются основой для создания эталонов [13], так как золотые наночастицы устойчивы к окислению и легко функционализируются, а квантовые точки имеют узкий спектр излучения, что делает их хорошими эталонами для флуоресцентной микроскопии.

– *Функционализация поверхности.* Функционализация поверхности предотвращает агрегацию [14]. Примерами такого явления являются полиэтиленгликоль или тиолы. Полиэтиленгликоль создает стерический барьер, предотвращая агрегацию, а тиолы образуют прочные связи с золотом, стабилизируя частицы. Применения такого явления способно повысить стабильность наночастиц в растворах и при измерениях.

– *Совершенствование измерительной техники* [11,15,16].

Повышение точности измерений с применением атомно-силовой и электронной микроскопии через применение криогенной атомно-силовой микроскопии. Применение криогенной атомно-силовой микроскопии позволит снизить тепловые шумы, что повысит точность и повторяемость проводимых измерений за счет работы при сверхнизких температурах.

– *Использование оптических методов.* Использование ближнепольной микроскопии [16,17] позволяет преодолеть дифракционный предел для оптических методов.

– *Контроль внешних условий.* Проведение измерений в специальных условиях, таких как вакуум или инертная атмосфера [18] позволит минимизировать влияние окисления и адсорбции, а вместе с тем и количества возникающих артефактов.

– *Разработка стандартов и методик.* Для повышения уровня сравнимости данных между лабораториями возможно активное участие в международных стандартизациях (ISO/TC 229), а также проведение межлабораторных сличений [19] для повышения достоверности данных.

– *Междисциплинарный подход.* Сотрудничество с такими науками как физика, химия, материаловедение [20].

– *Международное сотрудничество.* Совместные проекты (напр., в рамках EURAMET, ARMP) и обмен эталонами/методиками ускоряют прогресс и обеспечивают глобальную сопоставимость получаемых данных [21].

Перспективные направления исследований

– *Квантовые эталоны.* Разработка квантовых эталонов повышенной точности на основе эффекта Холла и других квантовых явлений [11,16] и использование новых материалов (топологические изоляторы) позволит повысить точность измерений и калибровок.

– *Мультипараметрические методы измерений* [22]. Одновременное измерение нескольких характеристик (размер, форма, заряд, состав) с помощью усовершенствованных сенсоров или гибридных микроскопов.

Заключение

Основываясь на проведенном анализе состояния метрологического обеспечения измерений нанообъектов и проблем нанометрологии в целом возможно выделить ряд ключевых тенденций для дальнейшего развития:

– *Разработка и внедрение квантовых эталонов.* Основываясь на фундаментальных явлениях и константах квантового мира, проводить дальнейшую разработку и внедрение эталонов.

– *Комплексное совершенствование методик.* В изучении нанообъектов включить применение криогенных техник, ближнепольной микроскопии и жесткого контроля среды для минимизации артефактов.

– *Международная стандартизация и межлабораторные сличения.* Применять принципы международной стандартизации и выход на международное сотрудничество (в том числе межлабораторные сличения получаемых результатов) для сопоставимости данных и доверия к результатам.

– *Интеграция междисциплинарных знаний и искусственного интеллекта.* Развитие междисциплинарного взаимодействия, применение компьютерного моделирования, машинного обучения и искусственного интеллекта является необходимыми инструментами для интерпретации сложных наноизмерений.

– *Исследование перспективных направлений.* Одновременное измерение нескольких характеристик позволит улучшить получаемые результаты, но требует решения проблем стабильности и аттестации.

1. Гольдманский, В. И. Туннельные явления в химической физике / В. И. Гольдманский, Л. И. Трахтенберг, В. Н. Флёргов. – М.: Наука, 1986. – 296 с.
2. Блохинцев, Д. И. Основы квантовой механики / Д. И. Блохинцев. – 4-е изд. – М.: Физматгиз, 1963. – 620 с. (Примечание: Издательство "Физматгиз" указано как наиболее вероятное для 1963 г. Если точное неизвестно, можно оставить "М., 1963")
3. Ландау, Л. Д. Квантовая механика (нерелятивистская теория) / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1974. – 752 с. – (Теоретическая физика; т. III).
4. Третьяков, Ю. Д. Основные направления фундаментальных и ориентированных исследований в области наноматериалов / Ю. Д. Третьяков, Е. А. Гудилин // Успехи химии. – 2009. – Т. 78, № 9. – С. 867–888. – EDN KUYFWN.
5. Дрякина, В. С. Флуктуации в наносистемах: от фундаментальных закономерностей к прикладным аспектам / В. С. Дрякина // Вестник науки. – 2025. – Т. 3, № 5(86). – С. 1836–1842. – EDN PGDRWT.
6. Немкаева, Р. Р. Сравнение методик атомно-силовой микроскопии при исследовании аморфных углеродных пленок / Р. Р. Немкаева, Е. С. Мухаметкаримов, Б. Е. Алпысбаева // Вестн. Казах. нац. ун-та. Сер. физ. – 2017. – № 1(60). – С. 88–92. – EDN HTQDOF.
7. Сравнительный анализ методов атомно-силовой и

- растровой электронной микроскопии для исследования радиационно-модифицированного полиэтилентерефталата / Д. Б. Боргеков, А. Т. Жумажанова, М. М. Сайфулин [и др.] // Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии: сб. докл. X Междунар. конф., Минск, 13–16 нояб. 2012 г. / гл. ред. С. А. Чижики. – Минск: Беларус. наука, 2012. – С. 126–131. – EDN YOMNUD.
8. Применение методик сканирующей зондовой микроскопии (СТМ и АСМ) для исследования морфологии поверхности перспективных материалов / В. К. Орлов, В. М. Сергеев, И. И. Акимов [и др.] // Вопр. атом. науки и техники. Сер.: Материаловедение и новые материалы. – 2013. – № 1(74). – С. 173–183. – EDN SAGJHT.
9. Бойко, А. А. Анализ факторов, влияющих на результат измерения / А. А. Бойко, М. Ю. Еременко, О. В. Мартыненко // России – творческую молодёжь: материалы XII Всерос. науч.-практ. студ. конф., Камышин, 25–26 апр. 2019 г. / Волгогр. гос. техн. ун-т; [редкол.: ...]. – Камышин: ВолгГТУ, 2019. – Т. 2. – С. 8–9. – EDN JVDOTR.
10. Березовская, Т. Н. Аттестация и стандартизация методик измерений в сфере наноиндустрии / Т. Н. Березовская // Мир измерений. – 2020. – № 1. – С. 10–14. – EDN NWOMHZ.
11. Нанометрология и стандартизация в нанотехнологиях / А. С. Батурин, А. Ю. Кузин, П. А. Тодуа, М. Н. Филиппов // Законодательная и прикладная метрология. – 2019. – № 3(160). – С. 19–25. – EDN UOKBLF.
12. Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene / K. S. Novoselov, A. K. Geim, D. Jiang [et al.] // Nature. – 2005. – Vol. 438, No. 7065. – P. 197–200. – DOI: 10.1038/nature04233. – EDN LJAORD.
13. Цзи, В. Я. Изучение свойств золота в микро- и наноструктурах / В. Я. Цзи, С. Я. Фу, М. Я. У // Междунар. студ. науч. вестн. – 2016. – № 6. – С. 83. – EDN XDZGJD.
14. Schmid, G. Large metal clusters and colloids - Metals in the embryonic state / G. Schmid // Prog. Colloid Polym. Sci. – 1998. – Vol. 111. – P. 52–57. – DOI: 10.1007/bfb0118109. – EDN LNNYBH.
15. Giessibl, F. J. Advances in atomic force microscopy / F. J. Giessibl // Rev. Mod. Phys. – 2003. – Vol. 75, No. 3. – P. 949–983. – DOI: 10.1103/RevModPhys.75.949.
16. Потемкин, А. Обеспечение метрологической ответственности измерения перемещения в нанометровом диапазоне / А. Потемкин // Наноиндустрия. – 2016. – № 6(68). – С. 60–68. – EDN WMVAEP.
17. Betzig, E. Imaging intracellular fluorescent proteins at nanometer resolution / E. Betzig, G. H. Patterson, R. Sougrat [et al.] // Science. – 2006. – Vol. 313, No. 5793. – P. 1642–1645. – DOI: 10.1126/science.1127344.
18. Foster, A. S. Origin of contrast in STM images of functionalized surfaces / A. S. Foster, F. L. Gejo, A. L. Shluger, R. M. Nieminen // Phys. Rev. Lett. – 2005. – Vol. 95, No. 12. – Art. no. 126102. – DOI: 10.1103/PhysRevLett.95.126102.
19. Interlaboratory comparison for the measurement of particle size and zeta potential of silica nanoparticles in an aqueous suspension / G. Roebben [et al.] // J. Nanopart. Res. – 2011. – Vol. 13, No. 12. – P. 6557–6571. – DOI: 10.1007/s11051-011-0624-4.
20. Whitesides, G. M. The once and future nanomachine / G. M. Whitesides // Science. – 2005. – Vol. 307, No. 5709. – P. 189–190. – DOI: 10.1126/science.1107529.
21. Roco, M. C. International collaboration in nanotechnology: The U.S.-E.U. experience / M. C. Roco // J. Nanopart. Res. – 2011. – Vol. 13, No. 8. – P. 3389–3404. – DOI: 10.1007/s11051-011-0382-y.
22. Beltrán, A. M. Multiparametric optical sensing with plasmonic nanostructures / A. M. Beltrán, A. Csaki, J. König [et al.] // ACS Sens. – 2020. – Vol. 5, No. 5. – P. 1234–1247. – DOI: 10.1021/acssensors.0c00

НЕЛИНЕЙНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ ОТ ПЛОТНОСТИ ЗАПОЛНЕНИЯ В FDM-ОБРАЗЦАХ ИЗ ПОЛИЛАКТИДА

Иванов Г.Ю., Кулаков О.И., Фролов А.Д.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

В работе исследовано влияние плотности концентрического заполнения на трибологические характеристики образцов из полилактида (PLA), полученных методом послойного наплавления. Проведены испытания на абразивный износ при плотностях заполнения от 80% до 100%. Установлена нелинейная зависимость интенсивности износа от плотности заполнения, выявлен эффект аномального снижения износа при плотности заполнения 90%. Предложен механизм самосмазывания, обусловленный заполнением микрополостей частицами износа, формирующими буферный слой в зоне контакта. Результаты работы имеют практическое значение для оптимизации параметров 3D-печати деталей, работающих в условиях абразивного износа.

Введение

Полилактид (PLA) и его современные модификации, включая PLA Plus, относятся к числу наиболее востребованных материалов для FDM-печати благодаря сочетанию биоразлагаемости, низкой усадки при печати и удовлетворительных механических свойств. Модифицированные составы PLA Plus демонстрируют повышенную прочность и ударную вязкость по сравнению со стандартными аналогами, что расширяет область их потенциального применения [1,2].

Особый научный интерес представляет изучение нелинейных эффектов в зависимости износостойкости от плотности заполнения. Предварительные исследования авторов показали возможность существования оптимальных значений плотности заполнения, при которых наблюдается аномальное повышение износостойкости, что может быть связано с эффектами самосмазывания за счет специфического распределения полостей в структуре материала [3,4].

Целью настоящего исследования является установление количественной зависимости интенсивности абразивного износа образцов из PLA Plus от плотности концентрического заполнения при FDM-печати и выявление физических механизмов, определяющих наблюдаемые закономерности. Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

Материалы и методы

В качестве материала исследования использовался коммерческий полилактид марки PLA Plus производства компании Sunlu. Выбор данного материала обусловлен его улучшенными механическими характеристиками по сравнению со стандартным PLA: пределом прочности при растяжении 65–70 МПа, модулем упругости 3,5–4,0 ГПа и ударной вязкостью 12–15 кДж/м² согласно технической документации производителя.

Изготовление образцов осуществлялось на настольном 3D-принтере Bambu Lab A1, оснащённом системой активного охлаждения и калибровки стола. Основные технические характеристики принтера: точность позиционирования по осям X/Y $\pm 0,1$ мм, по оси Z

$\pm 0,01$ мм, максимальная температура сопла 300°C.

Для обеспечения воспроизводимости результатов все образцы изготавливались в едином цикле печати со строго контролируемыми параметрами:

- Температура экструзии: $220 \pm 2^\circ\text{C}$
- Температура стола: $60 \pm 2^\circ\text{C}$
- Толщина слоя: 0,16 мм
- Скорость печати: 60 мм/с
- Диаметр сопла: 0,4 мм

Особое внимание уделялось поддержанию постоянной влажности филамента в процессе печати. Перед началом работ материал выдерживался в сушильной камере при 45°C в течение 4 часов.

Образцы представляли собой параллелепипеды размером 15,0×15,0×12,0 мм с допуском $\pm 0,1$ мм. Выбор квадратной формы обусловлен обеспечением равномерного распределения нагрузки в процессе трибологических испытаний.

В исследовании применялся концентрический метод заполнения (concentric infill) – специализированный алгоритм построения внутренней структуры FDM-образцов, характеризующийся расположением экструдированных дорожек в виде концентрических контуров, повторяющих геометрию внешнего периметра детали.

Плотность заполнения варьировалась в диапазоне от 80% до 100% путем изменения расстояния между соседними концентрическими контурами при сохранении постоянной ширины дорожки. На рисунке 1 представлена визуализация внутренней структуры образца, демонстрирующая расположение экструдированных дорожек в виде концентрических контуров.

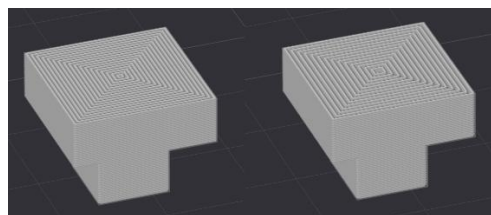


Рис. 1. Визуализация концентрической структуры образцов при заполнении: 100% (слева) и 80% (справа)

Испытания проводились на трибологической установке ИМАШ ПРУ с возвратно-поступательным движением. Контроль параметров испытаний осуществлялся с помощью специализированного программного обеспечения:

- Удельная нагрузка: 7,18 кгс/см² (0,704 МПа)
- Амплитуда перемещения: 80,0±0,5 мм
- Линейная скорость: 13,3 см/с
- Частота циклов: 50±1 цикл/мин
- Продолжительность испытаний: 20 мин

(1000 циклов)

Исследование проводилось с последовательным использованием контробразцов:

1. Полированная сталь 45 (шероховатость Ra = 0,05–0,1 мкм)
2. Абразивные шкурки зернистости: 400

Далее осуществлялся анализ поверхности износа и измерение потери массы.

Измерение массы образцов проводилось на аналитических весах с точностью ±0,05 мг. Каждое измерение повторялось трижды, за конечное значение принималось среднее арифметическое. Перед взвешиванием образцы очищались сжатым воздухом и выдерживались в условиях контролируемой влажности (50±5%) в течение 2 часов.

Для оценки эффективности использования материала и точности реализации заданных параметров заполнения проведен сравнительный анализ расчетной и фактической массы образцов. Расчетная масса определена на основе геометрических параметров образца и плотности материала с учетом заданной плотности заполнения в программе-слайсере. Систематическое превышение расчетной массы над фактической обусловлено технологическими особенностями FDM-процесса, включая ретракцию филамента, стартовые и финишные участки экструзии, а также калибровкой экструдера.

Результаты

В исследовании использовано 33 образца с шагом плотности заполнения 1–2% в диапазоне от 80% до 100%. Для каждой плотности заполнения изготовлено по 3 идентичных образца, что позволило провести статистический анализ воспроизводимости результатов. Относительное стандартное отклонение для каждой группы образцов не превышало 5%, что подтверждает высокую воспроизводимость методики изготовления и испытаний.

При испытаниях на полированной стали 45 износ образцов оказался незначительным в пределах погрешности измерений (±0,2 мг). Средние значения потери массы для всех плотностей заполнения находились в диапазоне от -0,15 до +0,18 мг, что статистически незначимо ($p > 0,05$). Наблюдаемое незначительное увеличение массы некоторых образцов может быть связано с сорбцией влаги из воздуха во время испытаний.

[5,6]

Для количественной оценки влияния плотности заполнения на износостойкость FDM-образцов проведены трибологические испытания на абразивной шкурке зернистостью 400.

Наблюдается выраженная нелинейная зависимость интенсивности износа от плотности заполнения с четко выраженным минимумом при 90% плотности. Максимальный износ зафиксирован при минимальной плотности заполнения 80% (134,25 мг), минимальный - при 90% (48,4 мг). (Рисунок 2)

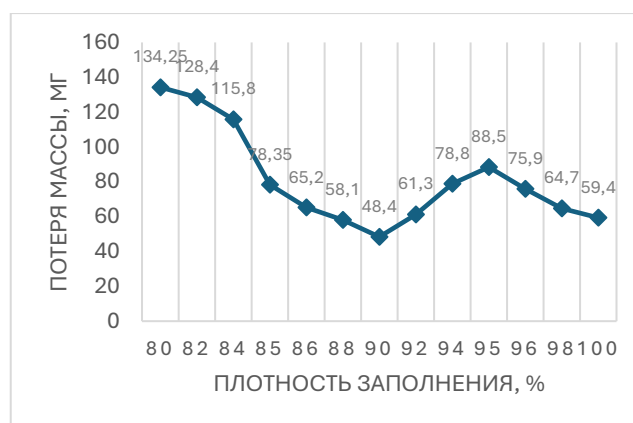


Рис. 2. Зависимость потери массы от плотности заполнения

Визуальный анализ поверхности образцов после испытаний выявил характерные особенности:

1. При плотностях 80–84% наблюдается выраженное разрушение внутренней структуры
2. В диапазоне 85–95% отмечается равномерный износ с сохранением целостности каркаса
3. При 100% заполнении наблюдается гладкая поверхность износа с минимальным повреждением

Наблюдаемый минимум интенсивности износа при плотности заполнения 90% (48,4 мг) по сравнению с соседними значениями может быть объяснен синергетическим действием нескольких физических механизмов:

1. Оптимальное соотношение механической прочности и объема полостей. При 90% заполнения достигается баланс между достаточной механической прочностью каркаса для сопротивления абразивному воздействию и оптимальным объемом полостей, способных эффективно удерживать частицы износа.

2. Формирование буферного слоя из продуктов износа. Экспериментально наблюдаемое накопление частиц PLA порошкообразной формы в полостях (рисунок 3) создает защитный слой, который перераспределяет нагрузку, уменьшая пиковые контактные напряжения, снижает прямой контакт абразива с основной структурой материала, выступает в роли твердой смазки, изменяя характер трения.



Рис. 3. Порошкообразные частицы PLA между слоями образца

3. Геометрические особенности концентрического заполнения. При 90% плотности расстояние между соседними контурами ($\approx 0,06$ мм)

обеспечивает эффективное удержание частиц износа без их вымывания из зоны контакта, сохранение структурной целостности при циклическом нагружении, равномерное распределение частиц по всей площади контакта.

4. Энергетический аспект. Частицы в полостях поглощают часть энергии трения, преобразуя ее в энергию деформации и теплоту, что снижает энергетическое воздействие на основную структуру материала.

Данный эффект имеет практическое значение для оптимизации параметров печати деталей, работающих в условиях абразивного износа, позволяя достигать максимальной износостойкости при экономии материала.

Для комплексной оценки эффективности использования материала проведен анализ суммарных потерь, включающих как технологические потери при печати, так и эксплуатационные потери при трибологических испытаниях.

На рисунке 4 представлен график общих потерь материала от степени заполнения.

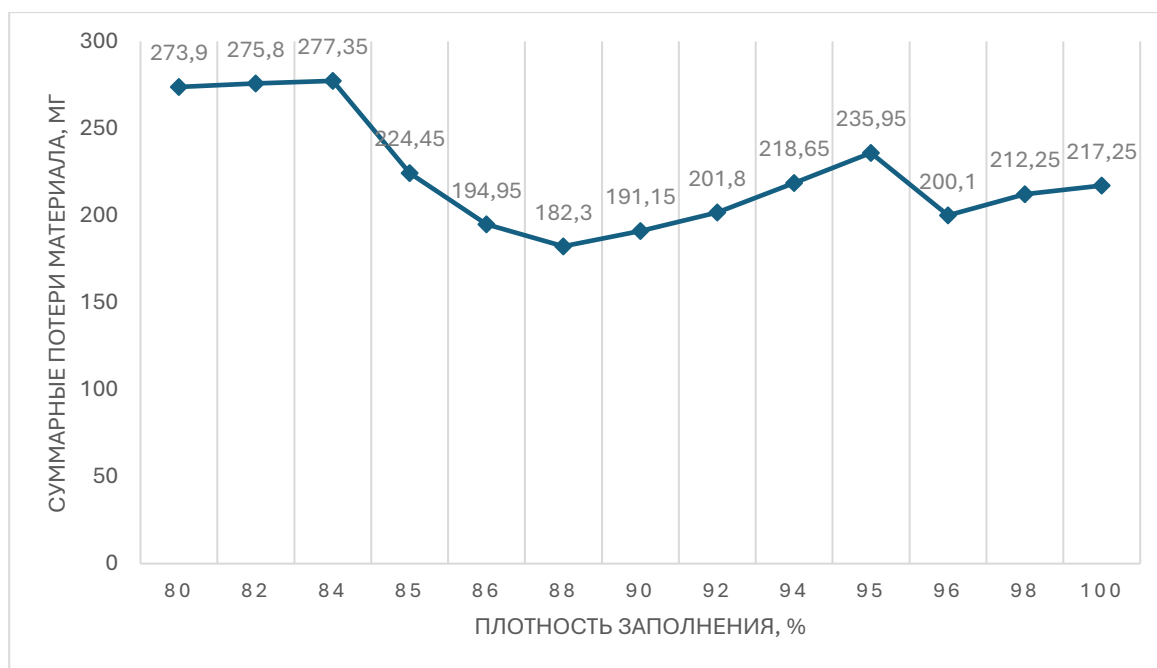


Рис 4 – Зависимость суммарных потерь материала от плотности заполнения

Выводы

1. Установлена нелинейная зависимость интенсивности абразивного износа FDM-образцов из PLA Plus от плотности заполнения. Наибольшая износостойкость наблюдается при 90% заполнения (потеря массы 48,4 мг).

2. Выявлено anomalous повышение износостойкости при 90% заполнения, которое возможно обусловленный эффектом самосмазывания. Установлено, что полости оптимального размера заполняются частицами износа, формирующими буферный слой, который

снижает прямой контакт абразива с основным материалом.

3. Определен оптимальный диапазон плотностей заполнения (88–90%) для деталей, работающих в условиях абразивного износа, обеспечивающий минимальные суммарные потери материала и максимальную эксплуатационную стойкость.

4. Показано, что технологические потери при FDM-печати образцов составляют 6,6–12,1% и зависят от плотности заполнения.

Результаты работы имеют практическую

значимость для проектирования и изготовления функциональных деталей методом FDM-печати, работающих в условиях трения и износа. В будущем планируется разработка практических рекомендаций по выбору параметров печати для оптимизации трибологических характеристик и эффективного использования материала, что позволит сократить расход филамента без ухудшения эксплуатационных свойств.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0023.

1. Gibson I., Rosen D.W., Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. – Springer, 2015. – 498 p.
2. Tlegenov Y., Hong G.S., Lu W.F. A review of 3D printing technologies for soft polymer materials // *Advanced Materials Technologies*. – 2023. – Vol. 8, Issue 5. – P. 2201705.
3. Liu Z., Wang Y., Wu B., et al. A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid products // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 102. – P. 2877-2889.
4. Dey A., Yodo N. A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2019. – Vol. 3, Issue 3. – P. 64.
5. Wang P., Zou B., Xiao H., et al. Effects of printing parameters of fused deposition modeling on mechanical properties, surface quality, and microstructure of PEEK // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2019. – Vol. 271. – P. 62–74.
6. Mohamed O.A., Masood S.H., Bhowmik J.L. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects // *Advances in Manufacturing*. – 2015. – Vol. 3. – P. 42-53.

ЗАДАЧА ИЗНАШИВАНИЯ ВНУТРЕННЕГО ПОКРЫТИЯ ТРУБЫ ЖЕСТКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ВСТАВКОЙ

Казаков К.Е.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия; kazakov@ipmnet.ru

В статье рассматривается задача изнашивания внутреннего тонкого слоя двухслойной трубы жесткой цилиндрической вставкой в случае, когда диаметр вставки и упругие свойства тонкого слоя зависят от осевой координаты. Для поставленной задачи формулируется математическая модель. На основании специального подхода строится аналитическое решение, вид которого позволяет производить вычисления даже в случае сложного задания форм и свойств поверхностей.

Цель

Использование в промышленности и машиностроении многослойных труб обусловлено тем, что такие трубы позволяют учесть множество технологических требований. Одни слои обеспечивают необходимую жесткость конструкции, вторые, например, выполняют роль электроизоляторов, третьи защищают от агрессивных сред и т.д. Однако нанесение таких слоев может влиять на напряженно-деформированное состояние в областях, где такие многослойные трубы крепятся друг к другу или к другим конструкциям при помощи разнообразных элементов: муфт, вставок, ниппелей и т.д. Это влияние может оказывать как положительный, так и отрицательный эффект, поэтому учет дополнительных слоев важен при расчете конструкций на прочность.

При работе механизмов и конструкций зачастую присутствуют вибрации, которые приводят к изнашиванию контактирующих элементов, что также необходимо принимать во внимание.

В настоящей работе рассматривается задача об изнашивании жесткой вставкой внутреннего мягкого слоя двухслойной трубы в предположении, что этот слой обладает продольной неоднородностью. Целью работы является прогнозирование изменения контактных напряжений и степени износа с течением времени. В качестве метода решения рассматриваемой задачи предлагается использовать специальный подход, позволяющий построить аналитическое решение задачи в рядах, учитывающее как изнашивание внутреннего слоя, так и его неоднородность.

Механическая и математическая формулировки задачи

Протяженная осесимметричная цилиндрическая труба состоит из двух слоев: упругого однородного внешнего слоя и тонкого внутреннего слоя, упругие свойства которого зависят от осевой координаты. Слои не сцеплены друг с другом, то есть между слоями осуществляется гладкий контакт. В некоторый момент времени внутрь такой трубы помещается жесткая осесимметричная вставка так, что между внутренним слоем и вставкой происходит полный контакт (длина линии контакта совпадает с длиной вставки). В результате такого

взаимодействия труба деформируется. В процессе работы механизма или конструкции происходят вибрации, в результате чего во внутренний слой, контактирующий со вставкой, начинает изнашиваться. Необходимо найти распределение контактных давлений, а также оценить изменение профиля с течением времени.

Можно показать (на основании работ [1, 2]), что математической моделью такого процесса является следующее смешанное интегральное уравнение относительно неизвестного контактного давления $q(z, t)$:

$$\begin{aligned} & \frac{1 - \nu_{\text{lay}}^2(z)}{E_{\text{lay}}(z)} [h - u_{\text{wear}}(z, t)] q(z, t) + u_{\text{wear}}(z, t) + \\ & + \frac{2(1 - \nu_{\text{main}}^2)}{\pi E_{\text{main}}} \int_{-a}^a k_i \left(\frac{z - \zeta}{H} \right) q(\zeta, t) d\zeta = \\ & = g(z) - r_{\text{in}} + h, \quad z \in [-a, a], \quad t \geq \tau_0, \\ & u_{\text{wear}}(z, t) = \frac{k_{\text{wear}} V}{T(z)} \int_{\tau_0}^t q(z, \tau) d\tau. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $E_{\text{lay}}(z)$ и $\nu_{\text{lay}}(z)$ — упругие модули покрытия (внутреннего слоя), h — начальная толщина покрытия, E_{main} и ν_{main} — упругие модули основного слоя, H — толщина основного слоя, r_{in} — внутренний радиус основного слоя, $g(z)$ — внешний радиус вставки, $k_i(\dots)$ — известное ядро краевой задачи для цилиндра [1], k_{wear} — коэффициент пропорциональности, связанный с изнашиванием, V — средний модуль скорости движения вставки относительно покрытия, $T(z)$ — твердость покрытия. В данной модели предположено, что скорость изнашивания пропорциональна контактному давлению, средний модуль скорости движения соприкасающихся поверхностей относительно друг друга и обратно пропорционален твердости покрытия (линейный износ). Следует отметить, что уравнение (1) является нелинейным уравнением, однако если ограничить модель предположением, что величина износа на порядок меньше толщины покрытия, то слагаемым

$$\frac{1 - \nu_{\text{lay}}^2(z)}{E_{\text{lay}}(z)} u_{\text{wear}}(z, t) q(z, t)$$

можно пренебречь в силу его малости по

отношению к другим слагаемым. В этом случае (1) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} & \frac{1-\nu_{\text{lay}}^2(z)}{E_{\text{lay}}(z)} hq(z,t) + \frac{k_{\text{wear}} V}{T(z)} \int_{\tau_0}^t q(z,\tau) d\tau + \\ & + \frac{2(1-\nu_{\text{main}}^2)}{\pi E_{\text{main}}} \int_{-a}^a k_i \left(\frac{z-\zeta}{H} \right) q(\zeta,t) d\zeta = \\ & = g(z) - r_{\text{in}} + h, \quad z \in [-a, a], \quad t \geq \tau_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнение (2) является линейным по отношению к неизвестной функции $q(z,t)$.

Для ряда материалов [3, 4] справедливо, что твердость покрытия пропорциональна его контактной жесткости, то есть

$$T(z) = k_T \frac{E_{\text{lay}}(z)}{1-\nu_{\text{lay}}^2(z)}.$$

В этом случае уравнение (2) примет вид

$$\begin{aligned} & \frac{1-\nu_{\text{lay}}^2(z)}{E_{\text{lay}}(z)} \left[hq(z,t) + \frac{k_{\text{wear}} V}{k_T} \int_{\tau_0}^t q(z,\tau) d\tau \right] + \\ & + \frac{2(1-\nu_{\text{main}}^2)}{\pi E_{\text{main}}} \int_{-a}^a k_i \left(\frac{z-\zeta}{H} \right) q(\zeta,t) d\zeta = \\ & = g(z) - r_{\text{in}} + h, \quad z \in [-a, a], \quad t \geq \tau_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, для нахождения неизвестного контактного давления $q(z,t)$ необходимо решить интегральное уравнение (3).

Построение аналитического решения

Уравнение (3) можно привести к безразмерному виду:

$$\begin{aligned} m(z^*) (\mathbf{I} - \mathbf{V}) q^*(z^*, t^*) + \mathbf{F} q^*(z^*, t^*) &= \delta^* - g^*(z^*), \\ z^* \in [-1, 1], \quad t^* \geq 1. \end{aligned} \quad (4)$$

при помощи замены переменных

$$z^* = \frac{z}{a}, \quad \zeta^* = \frac{\zeta}{a}, \quad t^* = \frac{t}{\tau_0}, \quad \delta^* = \frac{\delta}{a},$$

$$g^*(z^*) = \frac{r_{\text{in}} - h - g(z)}{a}, \quad m(z^*) = \frac{h[1-\nu_{\text{lay}}^2(z)]E_{\text{main}}}{2a(1-\nu_{\text{main}}^2)E_{\text{lay}}(z)},$$

$$q^*(z^*, t^*) = \frac{2(1-\nu_{\text{main}}^2)q(z,t)}{E_{\text{main}}},$$

$$\mathbf{V}f(t^*) = -\frac{k_{\text{wear}} V \tau_0}{k_T h} \int_1^{t^*} f(\tau^*) d\tau^* = -V^* \int_1^{t^*} f(\tau^*) d\tau^*,$$

$$\mathbf{F}f(z^*) = \frac{1}{\pi} \int_{-1}^1 k_i \left(\frac{a(z^* - \zeta^*)}{H} \right) f(\zeta^*) d\zeta^*.$$

Для решения уравнения (3) необходимо

применять специальный подход, так как оно является смешанным интегральным уравнением и содержит множитель $m(z^*)$, связанный с упругими свойствами покрытия, и слагаемое $g^*(z^*)$, связанное с профилем вставки, которые могут описываться сложными быстро изменяющимися функциями. Подход основан на следующей последовательности действий.

1. Решение следует искать в виде

$$q^*(z^*, t^*) = \frac{\hat{q}(z^*, t^*)}{\sqrt{m(z^*)}} - (\mathbf{I} - \mathbf{V})^{-1} \frac{g^*(z^*)}{m(z^*)}.$$

В этом случае уравнение (4) преобразуется к

$$(\mathbf{I} - \mathbf{V}) \hat{q}(z^*, t^*) + \hat{\mathbf{F}} \hat{q}(z^*, t^*) = \frac{\delta^* - \hat{g}(z^*)}{\sqrt{m(z^*)}}, \quad (5)$$

$$z^* \in [-1, 1], \quad t^* \geq 1,$$

где $\hat{g}(z^*)$ — функция, которая не является быстро изменяющейся, $\hat{\mathbf{F}}$ — оператор Фредгольма, обладающий теми же свойствами, что и $\mathbf{F}$.

2. Решение в каждый момент времени следует искать в пространстве $L_2[-1, 1]$ с базисом, построенном на основании ортогонализации следующей системы линейно независимых функций

$$\left\{ \frac{1}{\sqrt{m(z^*)}}, \frac{z^*}{\sqrt{m(z^*)}}, \frac{(z^*)^2}{\sqrt{m(z^*)}}, \dots \right\}.$$

3. Строить решение необходимо по базису из собственных функций оператора $\hat{\mathbf{F}}$.

Не останавливаясь на технических деталях, приведем лишь вид окончательного решения

$$q^*(z^*, t^*) = \frac{1}{m(z^*)} \left[\sum_{k=0}^{\infty} f_k(t^*) \sum_{m=0}^{\infty} \psi_{km} p_m(z^*) - \frac{g^*(z^*)}{e^{V^*(t^*-1)}} \right].$$

Выводы

В решении в явном виде выделены функции, связанные со свойствами покрытия и профилем вставки. Все остальные функции являются достаточно гладкими. Такое представление решения позволяет производить эффективные вычисления, когда физико-механические свойства сопрягаемых деталей описываются сложными быстро изменяющимися функциями.

Работа выполнена по теме государственного задания (номер госрегистрации 124012500437-9).

1. Черныш В.А. Контактные задачи теории ползучести для стареющих цилиндрических тел. Диссертация кандидата физико-математических наук. Институт проблем механики. 1999. 209 с.
2. Арутюнян Н.Х., Манжиров А.В. Контактные задачи теории ползучести. Ереван: Изд-во НАН РА, 1999. 320 с.
3. Проников А.С. Износ и долговечность станков. М.: Машгиз, 1957. 275 с.
4. Солдатенков И.А. Износостойкая задача с приложениями к инженерному расчету износа. М.: Физматкнига, 2010. 160 с.

ПАРАМЕТРЫ 3D ПЕЧАТИ ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

Казанцева Н.В.¹, Кузьмина А.В.¹, Байкузина А.Р.¹, Ежов И.В.¹, Плотников М.С.¹, Сахаров Н.А.¹, Коэмец Ю.Н.¹, Чернышихин С.В.²

¹Институт физики металлов УрО РАН им. М.Н. Михеева, Екатеринбург, Россия; kazantseva-11@mail.ru

²Университет науки и технологий НИТУ МИСИС, Москва, Россия

Проведено исследование влияния параметров печати лазерного 3D принтера на плотность получаемых изделий из порошков сплавов Ti-6Al-4V и стали 316L. Экспериментально показано, что объемная плотность энергии лазера не является универсальным параметром, отвечающим за плотность СЛС металлических изделий. Показано, что причина отсутствия одного универсального набора параметра для качественной печати из одного и того же металлического порошка с помощью разных лазерных 3D принтеров связана с предопределенными параметрами, задаваемым фирмой-изготовителем 3D принтера. Обнаружено, что скорость сканирования лазера в 3D принтере по-разному влияет на толстые и тонкие участки СЛС изделия из порошка, стали 316L: при низкой скорости сканирования дефекты в массивных частях минимальны, а в тонких – происходит перегрев материала, что приводит к большому количеству дефектов. На примере канюлированного медицинского винта со сложной геометрией было выявлено, что даже незначительное изменение условий процесса лазерной 3D печати существенно влияет как на плотность СЛС материала, так и на степень шероховатости поверхности.

При печати с помощью лазерного 3D принтера, в целом, используют порядка 130 входных параметров, которые влияют на качество получаемого изделия. В литературе обычно рассматривают изменение лишь некоторых, легко доступных параметров печати лазерного 3D принтера: скорость сканирования лазера и его мощность, толщину слоя металлического порошка, схему сканирования, расстояние между треками прохода лазера [1-2]. Авторы предлагают разнообразные наборы оптимальных параметров 3D печати для металлических образцов [3]. При этом один универсальный режим для качественной печати из одного и того же металлического порошка с помощью разных лазерных 3D принтеров отсутствует. Gong et al. предложили в качестве такого универсального параметра рассматривать объемную плотность энергии лазерного излучения [4]. С помощью двухфакторной статистической обработки функциональной зависимости объемной плотности энергии от скорости сканирования и мощности лазера, авторы работы [4] предположили существование «окна свариваемости», построенного по распределению объемной плотности энергии. СЛС образцы сплава Ti-6Al-4V, напечатанные с величинами объемной плотности энергии, находящимися в этом «окне свариваемости» должны иметь плотность выше 99% [4]. Однако, учет только двух параметров из 130 вызывает сомнение универсальности такого подхода. Другой, не менее важной проблемой является качественная печать металлических изделий с участками различной толщины.

Цель данной работы – анализ влияния параметров печати лазерного 3D принтера на качество получаемого металлического изделия сложной формы.

Материалы и методы

Для проведения исследования были использованы модели стандартных медицинских

канюлированных винтов из сплава 316L напечатанные методом селективного лазерного сплавления (СЛС) с тремя различными скоростями сканирования с помощью лазерного 3D принтера AddSol в атмосфере аргона.

А также, для исследования была изготовлена серия образцов (130 штук) из порошка сплава Ti-6Al-4V. Образцы размерами 10x10x10 мм были, полученные методом селективного лазерного сплавления (СЛС) с помощью лазерного 3D принтера ONSINT AM150 с использованием различных режимов. Относительную плотность образцов определяли методом Архимеда с помощью аналитических весов OHAUS. Микроструктуру и внутреннюю дефектность СЛС-образцов исследовали в центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН на растровом электронном микроскопе Tescan MIRA LMS.

Результаты и их обсуждения

Рисунок 1 представляет результаты сканирующей электронной микроскопии внутренней структуры полученных винтов. Медленная скорость сканирования лазером способствует образованию большого количества газовых пор, как в центральной части 3D винта, так и в его тонкостенных участках (Рис.1 а,б). Тонкостенные участки демонстрируют меньшую дефектность за счёт более эффективного охлаждения и меньших тепловых градиентов, тогда как массивные детали склонны к образованию внутренних пор и трещин из-за неравномерного охлаждения. Средняя скорость сканирования лазера (Рис.1 в, г) увеличивает количество пор в толстой части винта, а в тонкой - снижает. Быстрое перемещение лазера способствует образованию технологических пор с острыми краями, которые, в последующем, становятся местами зарождения и развития трещин. Размер пор также увеличивается с увеличением скорости сканирования.

Шероховатость поверхности и геометрическая

точность профиля резьбы стальных СЛС винтов также зависит от толщины изделия: уменьшается с увеличением скорости сканирования лазера в тонкой части и растет - в толстой части винта.

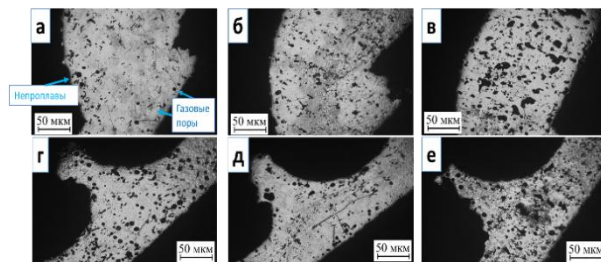


Рис.1. Структура 3D винтов из стали 316L на различных участках, поперечное сечение, скорость сканирования 400; 600; 800 мм/с: а, в, д – шляпка (толстая часть), б, г, е – резьба винта (тонкая часть)

Как показало наше исследование, в «окне свариваемости», предложенном в работе [4], только один образец имеет плотность 99,4% (рис.2, красная звездочка), остальные показали относительную плотность ниже 99%.

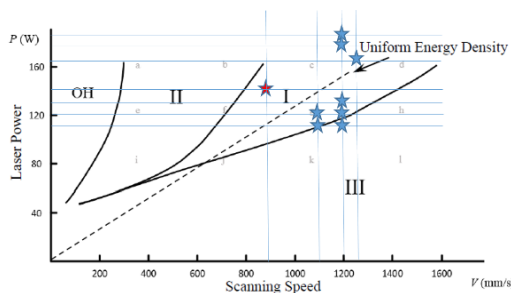


Рис.2. Параметры 3D печати СЛС образцов сплава Ti-6Al-4V, попадающие в «окно свариваемости»

Не только скорость сканирования и мощность, а также изменение расстояния между лазерными треками и схема сканирования также оказывают существенное влияние на относительную плотность образца. На рисунке 3 приведена микроструктура образцов, имеющих различную относительную плотность и одинаковую плотность объемной энергии. Изменение плотности в 0,2% оказывается существенным и проявляется в присутствии технологических пор (непроплавов), имеющих неправильные границы (Рис.3).

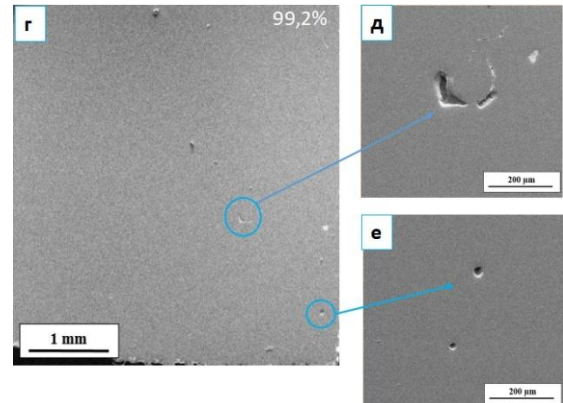
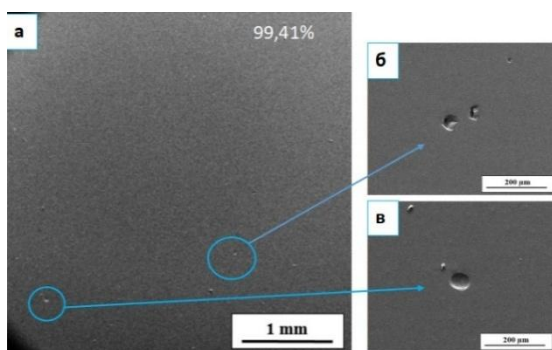


Рис.3. Микроструктура СЛС Ti-6Al-4V образцов с объемной плотностью энергии 59 Дж/мм³

Закключение

Таким образом, согласно полученным в работе экспериментальным результатам, можно сделать следующие заключения:

- скорость сканирования в лазерном 3D принтере по-разному влияет на участки различной толщины, их плотность и степень шероховатости поверхности, а также геометрическую точность изделия;
- объемная плотность энергии лазерного излучения не может служить универсальным параметром для получения СЛС образцов с высокой плотностью;
- причина отсутствия одного универсального набора параметра для качественной печати из одного и того же металлического порошка с помощью разных лазерных 3D принтеров обусловлена predetermined параметрами прибора, задаваемыми фирмой-изготовителем.

Работа выполнена в рамках государственного задания РАН и МИНОБРНАУКИ России в Институте физики металлов УрО РАН.

1. Glardon, R., et al., Influence of Nd: YAG Parameters on the Selective Laser Sintering of Metallic Powders. CIRP Annals - Manufacturing Technology. 2001. Vol. 50(1). P. 133-136
2. Vandenbroucke B., Kruth J-P. Rapid Prototyping Journal. 2007. Vol.13. P. 196.
3. Kazantseva N. Main factors affecting the structure and properties of titanium and cobalt alloys manufactured by the 3D printing. Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1115. Iss. 4. P. 42008.
4. Gong, H., Rafi, H., Starr, T., Stucker, B. The Effects of Processing Parameters on Defect Regularity in Ti-6Al-4V Parts Fabricated By Selective Laser Melting and Electron Beam Melting. Proc. 24th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference. 2013. P. 424-439

ИНТЕГРАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОДУЛЯ АНАЛИЗА ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН В ИНФОРМАЦИОННУЮ СИСТЕМУ СБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Камцев В.А.,¹ Филипович О.В.²

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Россия; kva_m98@mail.ru

²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Россия

Рассмотрена укрупнённая схема архитектуры цифрового предприятия по стандарту ИЕС 62264-1. Приведено описание взаимодействия информационных потоков между компонентами АСУТП сборочного предприятия на примере селективной сборки изделий. Предложена структура и способ интеграции интеллектуального модуля анализа законов распределения случайных величин в МРМ-подсистему PLM-платформы.

Введение

Современное сборочное производство является сложной системой, автоматизация операций в которой представляет собой очень важную проблему. Ее решение позволяет повысить производительность труда и качество изделий, снизить производственные затраты. Однако, это затрудняется рядом факторов, связанных с большой номенклатурой собираемых изделий, сложностью их конструкций, малой технологичностью, а также ограничениями экономического характера.

Сборочная система имеет многокомпонентную иерархически подчиняющуюся структуру, содержащую две составляющие: технологическую

математическом обеспечении.

Информационная среда сборочного предприятия

Согласно международному стандарту ИЕС 62264-1 (он же ANSI/ISA-95), цифровое предприятие – это организация, реализующая сквозную интеграцию бизнес- и производственных процессов через стандартизированные интерфейсы между уровнями, обеспечивающую прозрачность, управляемость и автоматизацию на основе данных [3].

Информационная среда цифрового предприятия, архитектура которого показана на рис. 1, разделена

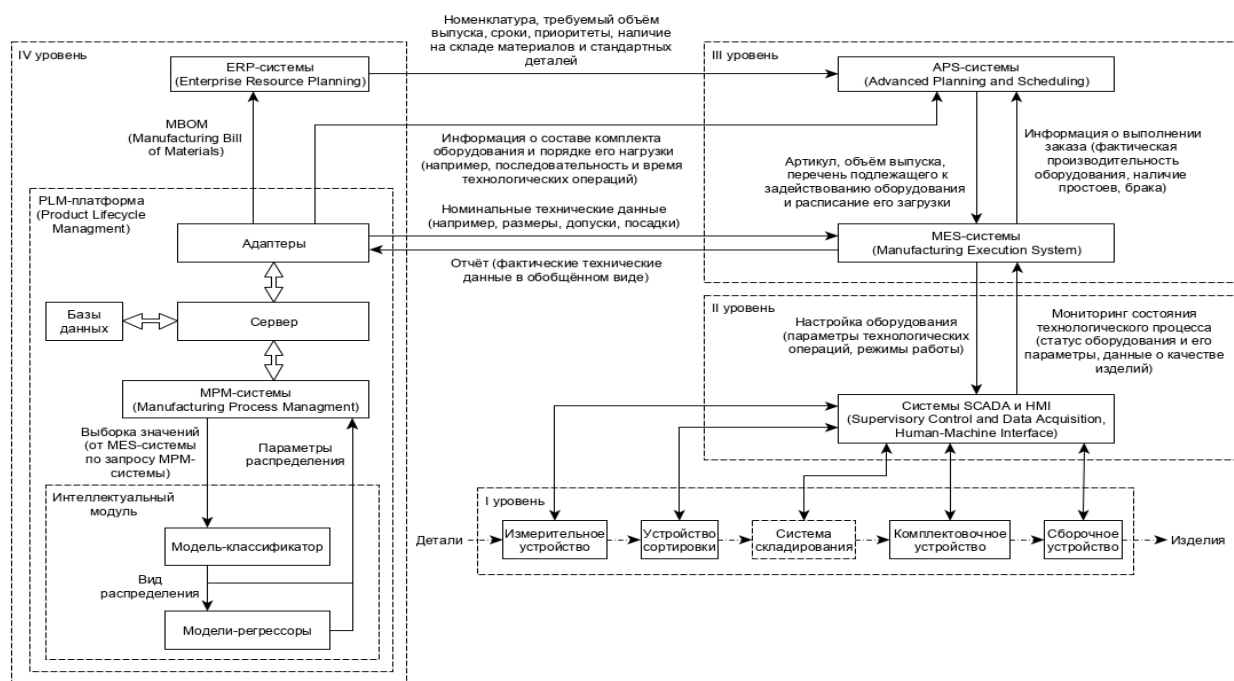


Рис. 1. Укрупнённая схема информационной системы сборочного предприятия

и информационную, используемую для управления производством [1,2]. **Целью работы** является анализ одного из известных вариантов информационной среды сборочного предприятия для осуществления возможности интеграции в неё интеллектуального модуля идентификации законов распределения случайных величин, используемых в

на следующие уровни иерархии (снизу вверх):

1) контроль на базовом уровне: управление физическими процессами с помощью программируемых логических контроллеров (ПЛК) и релейной логики;

2) контроль и мониторинг: локальный мониторинг состояния оборудования и координация

его работы с помощью SCADA- и HMI-систем (Supervisory Control and Data Acquisition и Human-Machine Interface);

3) управление производственными операциями: управление производством (контроль выполнения операций и производственных заданий в целом, сбор данных от систем более низкого уровня), качеством, техническим обслуживанием и материальными потоками с помощью MES- и APS-систем (Manufacturing Execution System и Advanced Planning and Scheduling);

4) бизнес-планирование и логистика: управление бизнес-процессами (планирование ресурсов, заказы, финансы) с помощью ERP-систем (Enterprise Resource Planning).

Таким образом, основная цель модели ISA-95 – стандартизировать обмен данными между бизнес-планированием (уровень 4) и управлением производством (уровень 3). Однако данный стандарт не включает в себя описание систем, предназначенных для проектирования изделий, формирования технологической карты их изготовления и контроля качества производства – PLM-систем.

PLM-система (Product Lifecycle Management) – единая для различных автоматизированных систем информационная (программная) платформа (среда, система, пространство), предназначенная для управления данными на всех этапах жизненного цикла продукции (ЖЦП). Каждый из модулей ставится в соответствие своему этапу ЖЦП и предоставляет инструментарий, необходимый для решения сопутствующих задач. В качестве примера PLM-системы можно привести *Teamcenter* компании *Siemens* [4]. Несмотря на то, что PLM не входят в иерархию информационной среды предприятия, их часто относят к уровню 4, наравне с ERP [5].

ERP-система – единая модульная информационная система для управления ресурсами и бизнес-процессами предприятия. По структуре она (равно как и APS, MES) во многом схожа с PLM. Отличие заключается лишь в перечне функциональных модулей и их назначении, среди которых можно выделить, например:

- SAP FI (FI nancial) для управления данными финансового (бухгалтерского) учёта;
- MM (Material Management) для планирования корпоративных ресурсов (управление закупками, запасами и оптимизацией цепочки поставок)
- SD (Sales and Distribution) для управления процессами продажи и дистрибуции;
- HCM (Human Capital Management) для административного управления персоналом предприятия.

Пример отечественной ERP-системы: *1C:ERP* компании 1C [6].

APS-система – это система расширенного планирования и диспетчеризации производства, предназначенная для создания по выбираемым

критериям оптимального расписания производства с учётом нескольких факторов, к которым можно отнести, например:

- наличие материалов и сроки, компетенциях персонала (данные из ERP);
- время наладки между разными типами изделий;
- фактическая загрузка оборудования и наличие простоев (данные из MES);
- информация о технологическом маршруте для каждого типа изделия и технических ограничениях оборудования (данные из PLM).

APS адаптируются к изменяющимся условиям на производстве и осуществляют, в случае необходимости, перепланирование процесса загрузки оборудования и персонала в режиме реального времени.

Несмотря на кажущуюся на первый взгляд схожесть роли APS и ERP, задачи, решаемые ими, соответствуют разным уровням информационного обмена предприятия. ERP, как и PLM, относятся к самому высокому уровню стратегического и бизнес-планирования, в то время как APS и MES – к уровню ниже. В качестве примера APS-системы можно назвать *Opcenter Advanced Planning* компании *Siemens* [4].

MES-системы – это специализированные программные комплексы, которые предназначены для решения задач оперативного планирования и управления производством:

- управление производственными заказами от ERP опосредованно через APS;
- сбор производственных данных (PDA (Production Data Acquisition)) для мониторинга хода выполнения операций, определения наличия брака и передача на следующий этап производства;
- оценка показателей OEE (Overall Equipment Effectiveness) и KPI (Key Performance Indicators);
- сбор машинных данных (MDA (Machine Data Acquisition)) с производственного оборудования посредством SCADA и HMI.

Настройка оборудования производится, исходя из соответствующей информации от PLM, а именно от её MPM-подсистемы.

В качестве примера отечественной MES-системы можно привести *SimpleMES* компании *SimpleOne* [7].

SCADA- и HMI-системы необходимы для управления производством на локальном уровне. Через HMI оператор взаимодействует с оборудованием, управляемым от одного или нескольких ПЛК, а также отслеживает текущее состояние оборудования и параметры проведения технологической операции непосредственно на рабочем месте. Аналогичным образом SCADA подключается напрямую к ПЛК и производит считывание данных и запись управляющих сигналов, но осуществляет это централизованно.

Интеграция интеллектуального модуля анализа данных

Построенная таким образом схема информационной системы может быть применена на сборочных предприятиях, в частности, там, где технологический процесс производства конечного продукта использует метод групповой взаимозаменяемости. Известно, что селективная сборка состоит из нескольких взаимосвязанных этапов (измерение, сортировка, складирование, комплектование, сборка) [8,9]. Обобщенная структура сборочного процесса показана на рис. 1 (первый уровень) в виде многоэтапной системы, в которой на вход каждого этапа поступают, а с выхода – снимаются определенные данные, при этом изменения происходят под действием технологических факторов. Для анализа показателей технологических процессов и синтеза сборочных систем используется математическое моделирование. На базе аналитических и имитационных моделей создаются алгоритмы и разрабатывается комплекс программ, предназначенный, в том числе, и для оперативного управления технологическими процессами.

Созданный в настоящее время математический аппарат [9,10] использует данные о случайных величинах, в частности законах распределения погрешностей измерений и параметров деталей, по которым происходит сборка. В [11] описана архитектура и принцип работы интеллектуального модуля, который с помощью методов машинного обучения производит анализ законов распределения случайных величин. На выходе модуль определяет вид закона распределения выборки значений и его параметры.

При осуществлении оперативного управления может возникать задача дополнительной интерпретации различных данных, например, переопределения границ селективных групп и величин групповых допусков. Это обстоятельство накладывает некоторые ограничения на возможность интеграции модуля в MES-системы, где требуется, чтобы были известны конечные значения параметров технологического процесса селективной сборки и настройки соответствующего оборудования. Поэтому, предлагается произвести интеграцию интеллектуального модуля в MPM-подсистему PLM (см. рис. 1, четвертый уровень). MES осуществляет сбор машинных данных от SCADA и HMI, производит оценку показателей сборочного процесса [9] и формирует отчет, который поступает в MPM-подсистему. Если как минимум один из показателей не находится в установленных пределах, то формируется запрос от MPM к MES о получении не обобщенных значений показателей процесса сборки, а исходных данных, на основании которых эти показатели оцениваются

(например, выборка из значений – отклонений фактических размеров деталей от номинальных). Далее данные поступают в качестве входных в интеллектуальный модуль, после дополнительной интерпретации ответа которого MPM формирует корректировку настройки оборудования, участвующего в процессе селективной сборки, для MES-системы. MES, в свою очередь, адаптирует и создает управляющие команды системам и механизмам более низкого уровня для уже непосредственного воздействия на технологический процесс.

Заключение

Интеграция интеллектуального модуля, идентифицирующего законы распределения случайных величин, в информационную систему сборочного предприятия позволит автоматически в режиме реального времени осуществлять управление технологическим процессом. Это приведет при использовании в АСУТП встраиваемых полимодельных комплексов, выполняющих моделирование процессов и оптимизацию показателей, к повышению эффективности селективной сборки.

1. Пашков Е.В. Транспортно-накопительные и загрузочные системы в сборочном производстве / Е.В. Пашков, А.Г. Карлов, В.Я. Копп. – Киев : УМК ВО, 1992 – 536 с.
2. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных производственных систем / В.Я. Копп. – Севастополь: СевНТУ, 2012 – 700 с.
3. ГОСТ Р МЭК 62264-1–2014. Интеграция систем управления предприятием. Часть 1. Модели и терминология. Введ. 26.11.2014. – М. : Стандартинформ, 2016. – 73 с.
4. Siemens Digital Industries Software : Siemens Software. – URL: <https://www.sw.siemens.com/> (дата обращения: 12.10.2025).
5. Обзор отечественного рынка PLM-систем: Личный сайт Ярослава Пуказова. – URL: <https://yaroslav.pukazov.ru/blog/overview-russian-market-PLM-systems/?ysclid=mgkw31e2rl593073363> (дата обращения: 14.10.2025).
6. Модуль 1С: PM Управление проектами для 1С:ERP: Официальный сайт 1С Первый бит. – URL: <https://www.1cbit.ru/erp-modul-1c-pm-upravlenie-proektami/> (дата обращения: 11.10.2025).
7. Управление производственными процессами: Официальный сайт SimpleMES. – URL: <https://simplemes.ru/> (дата обращения: 5.10.2025).
8. Филипович О.В. Структура информационно-управляющей системы процессом селективной сборки / О.В. Филипович // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2024. – № 3(27). – С. 17-26.
9. Катковник В.Я. Основы теории селективной сборки / В.Я. Катковник, А.И. Савченко. – Л. : Политехника, 1991. – 303 с.
10. Филипович О.В. Методы моделирования процессов однопараметрической многоэлементной селективной сборки / О.В. Филипович // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2025. – № 2(30). – С. 44-50.
11. Камцев В.А. Идентификация распределений случайных составляющих погрешностей измерения с применением искусственных нейронных сетей / В.А. Камцев, О.В. Филипович // Автоматизация и измерения в машино- приборостроении. – 2025. – № 4(32). – С. 4-21.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ АНТИФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ ПОЛИМЕРОВ

Капустин В.В., Памфилов Е.А.

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», Брянск, РФ

Рассмотрены достоинства и недостатки антифрикционных композиционных материалов с использованием в качестве матрицы искусственных и растительных полимеров, а также различные методы их создания. Предложены способы повышения теплофизических и триботехнических параметров исследуемых материалов за счёт использования металлической фазы и модифицирующих наполнителей.

В настоящее время на практике в машиностроении всё чаще применяют полимерные антифрикционные композиционные материалы в узлах трения различных машин и оборудования. Их использование обусловлено целым рядом преимуществ: хорошая прирабатываемость и низкий коэффициент трения, в некоторых случаях до сотых долей, что снижает износ сопряжённых деталей и повышает работоспособность в течении длительного времени; хорошие демпфирующие свойства; способностью к шаржированию твёрдых абразивных частиц, что предохраняет сопряжённую деталь от абразивного износа; а также во многих случаях повышением эксплуатационных свойств. Особенно эффективно применение полимерных композиционных материалов в узлах трения, где смазка контактирующих деталей затруднена или вовсе невозможна [1-3].

Перспектива использования в качестве матрицы растительных и искусственных полимеров обусловлена наличием у них ряда уникальных свойств: относительно низкий коэффициент трения при граничной смазке и сухом трении, в отличие от большинства применяемых конструкционных материалов; высокая химическая стойкость; высокие изоляционные свойства и т.д.

Вместе с тем, несмотря на отмеченные выше преимущества, главным недостатком таких материалов являются ограниченные физико-механические свойства. Применяемые в узлах трения полимерные композиционные материалы не удовлетворяют широкому диапазону скоростей, нагрузок, температур, возникающих в таких узлах, что является серьезным недостатком к их более широкому использованию в современных машинах и оборудовании. При этом существенным недостатком таких материалов является низкие теплофизические параметры.

В частности, неравномерный нагрев металлических и полимерных деталей сопровождается изменением зазора между ними. При этом недостаточный теплоотвод из зоны трения приводит к термическому разрушению полимерных материалов и повреждению функциональных поверхностей контактирующих деталей. Эти факторы негативно влияют на работу триботехнического узла и ведут к

преждевременному выходу из строя. Поэтому наряду с другими свойствами важным является обеспечение повышенного уровня теплофизических характеристик, таких как теплопроводность, температуропроводность, теплоемкость и др. [2,3].

При этом поиск новых способов модификации искусственных и растительных полимеров, а также разработка композитных и металлополимерных материалов и конструкций подшипников скольжения на их основе с улучшенным комплексом эксплуатационных и технологических свойств является актуальной задачей в области создания конструкционных материалов трибологического назначения.

Анализ экспериментальные данных свидетельствуют о том, что повышение теплофизических характеристик полимеров достигается путем введения в её матрицу металлической фазы. Эта фаза может быть представлена как в виде отдельных включений, так и в виде цельного каркаса или изготовленного из отдельных элементов [3].

В целях оптимизации теплофизических свойств в качестве металлической составляющей целесообразно применение легкоплавких металлов или эвтектических сплавов, например, сплав Вуда или Розе. При этом в процессе эксплуатации при достижении материалом температуры плавления, происходит фазовый переход. Плавление легкоплавкого металла сопровождается интенсивным поглощением тепловой энергии, что приводит к замедлению температурного градиента и эффективному теплоотводу из зоны фрикционного контакта. Таким образом, тепловая энергия, генерируемая при трении, рассеивается как за счет высокой теплопроводности металлических включений, так и за счет энергии, расходуемой на их фазовое превращение. Следует подчеркнуть, что в процессе плавления температурный режим деталей, содержащих данный теплоаккумулирующий компонент, остается неизменным. Важно отметить, что в процессе работы температура деталей, остается стабильной [3]. Структурные схемы таких материалов изображены на рисунке 1.

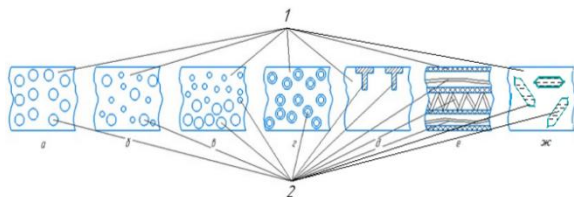


Рис. 1. Структурные схемы и форма металлической фазы в металлополимерных композиционных материалах: 1- полимерная матрица, 2- металлическая фаза; а- металлическая фаза одинаковой дисперсности [4]; б- металлическая фаза разной дисперсности [5]; в- фаза различной дисперсности, послойно размещенная в матрице [6]; г- биметаллическая фаза; д – поверхностно расположенные теплоотводящие макроэлементы [8]; е- чередование полимерного материала и металлической составляющей в виде металлической полосы, сетки или пружин [7,9], ж – капсулы с легкоплавким материалом [10].

Металлическая фаза, представленная в виде оболочки или капсулы, изготавливается из материалов высокой теплопроводности, обладающих более высокой температурой плавления, чем заполняющий их легкоплавкий материал. В качестве такого рода материалов может выступать медь, алюминий, бронза, которые наносятся на оболочку, например, электрохимическим, электроискровым способом и т.д. [3].

Для повышения триботехнических показателей таких материалов в качестве модифицирующих наполнителей эффективно применяют порошковые материалы, например, меди, бронзы, алюминия, цинка, а также свинецсодержащие дисперсные наполнители, например, порошки свинца, оксиды и диоксиды свинца и т.д. Перспективными также являются микроволокна, углеродные нанотрубки, волластонит, оксид кремния, а также нитрид бора, скрытокристаллический графит, дисульфид молибдена и др. [1-3].

При этом размер, форма наполнителя, их физико-механические и химические свойства-важные факторы, существенно влияющие на сопротивляемость изнашиванию и фрикционно-износные характеристики создаваемых материалов. В них интегрируются положительные свойства полимеров и металлов, при этом достигается повышение эксплуатационных характеристик [3].

На основе этих исследований в настоящее время для применения в триботехнических узлах различной техники и оборудования создан целый ряд материалов и конструкций подшипников

скольжения на основе растительных и искусственных полимеров с повышенными теплофизическими, триботехническими, и демпфирующими свойствами [4-10].

Таким образом разработка новых антифрикционных композиционных материалов на полимерной матрице основывается на рациональном применении существующих структурных компонентов, что обеспечивает существенное повышение их физико-механических, триботехнических и теплофизических показателей. Введение термоаккумулирующих и теплоотводящих элементов в состав композитов способствует оптимизации температурного режима эксплуатации узлов трения, расширяя тем самым области их применения. Следует подчеркнуть, что полимерные материалы, в отличие от большинства традиционных конструкционных материалов (включая стали, чугуны, керамика, антифрикционные бронзовые сплавы, баббиты и т.д.), характеризуются более широким спектром модификации свойств, что позволяет осуществлять целенаправленное управление их свойствами в соответствии с условиями эксплуатации.

1. Машков Ю.К., Кургузова О.А., Рубан А.С. Разработка и исследование износостойких полимерных нанокомпозитов // Вестник СибАДИ. 2018; 15(1) С. 36-45.
2. Пошарников Ф.В., Усиков А.В., Серебрянский А.И. Применение композиционного материала на основе полимера в узлах трения деревообрабатывающего оборудования // Лесн. журн. – 2012. – № 4. С. 104–111.
3. Памфилов Е.А., Шевелева Е.В., Пилюшина Г.А. Антифрикционные армированные древесно-металлические материалы // Трение и износ. -2019. Т.40. № 1. С. 121-128.
4. Патент № 2286489. Подшипник скольжения / Памфилов Е.А., Шевелева Е.В., Сидоров О.В., Муратов Д.И. Оpubл. 27.10.2006
5. Патент № 2289732. Подшипник скольжения / Памфилов Е.А., Шевелева Е.В., Сидоров О.В., Муратов Д.И. Оpubл. 20.12.2006 Бюл. № 35
6. Патент № 2432508. Подшипник скольжения / Памфилов Е.А., Сидоров О.В., Шевелева Е.В., Алексеева Е.В., Пилюшина Г.А. Оpubл. 27.05.2009 Бюл. № 15
7. Патент № 108519. Подшипник скольжения / Е.А. Памфилов, Лукаш А.А., Прусс Б.Н., Пилюшина Г.А. Оpubл. 20.9.2011 Бюл. № 26
8. Патент № 2226240. Подшипник скольжения / Е.А. Памфилов, Евельсон Л.И., Симин А.П., Шевелева Е. В. Оpubл. 27.03.2004
9. Патент №177912. Подшипник скольжения / Памфилов Е.А., Пилюшина Г.А. Оpubл. 15.03.2018г Бюл. № 8
10. Патент № 2769691. Антифрикционный композиционный материал / Памфилов Е.А., Капустин В.В., Пилюшина Г.А., Букреев О.Д. Оpubл. 05.04.2022 г Бюл. № 10

ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ НАНЕСЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ

Карцев С.В.¹, Гаврилов Д.А.¹

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; gavriuss@yandex.ru

Задача повышения эксплуатационного ресурса работы деталей технологического оборудования путем упрочнения поверхностей ее рабочих органов всегда была актуальной. Обоснование оптимального метода реализации технологии восстановления и упрочнения деталей технологического оборудования требует всестороннего комплексного подхода. Проведенный анализ применяемых схем плазматронов, позволяет выделить ряд существенных достоинств плазменного метода нанесения покрытий.

Введение

Увеличение эксплуатационного ресурса технологического оборудования используя процессы восстановления и упрочнения деталей представляет собой ключевой фактор в оптимизации материальных затрат и сокращения издержек на техническое обслуживание и ремонт.

В результате обширных научных исследований и экспериментов, направленных на совершенствование методов ремонта и восстановления деталей, удалось существенно продвинуться в решении проблем, связанных с восстановлением и упрочнением деталей технологического оборудования. Полученные результаты были подкреплены теоретическими выкладками и практическими доказательствами эффективности предложенных подходов.

Определение оптимального метода реализации технологии восстановления и упрочнения деталей технологического оборудования требует всестороннего комплексного подхода. При выборе подходящего способа необходимо провести анализ по нескольким ключевым направлениям: экономическая эффективность, техническая составляющая, экологический аспект и организационные факторы.

Методы восстановления и упрочнения деталей технологического оборудования

Плазменное напыление представляет собой высокотехнологичный процесс формирования защитных и функциональных покрытий, основанный на распылении порошковых и проволоочных материалов в высокотемпературной плазменной струе.

Существенное технологическое преимущество данного метода обусловлено уникальными характеристиками процесса, среди которых особо выделяются повышенная температура плазменной струи, инертная среда рабочего процесса и сверхвысокие скорости перемещения частиц материала. Эти факторы в совокупности обеспечивают широкие возможности для эффективного регулирования физико-механических свойств формируемых покрытий.

Важным достоинством метода является его способность преодолевать технологические ограничения, характерные для других

газотермических способов нанесения покрытий. Особую значимость представляет возможность создания покрытий из материалов с экстремально высокой температурой плавления, что недоступно многим альтернативным технологиям.

Высокая производительность процесса сочетается с исключительной универсальностью по отношению к типу распыляемого материала, включая как проволоку, так и порошковые материалы с различными температурными характеристиками. Многопараметрическая система управления позволяет гибко регулировать качество формируемых покрытий, при этом коэффициент использования материала достигает 0,7–0,85 при работе с проволоочными материалами и 0,2–0,8 при использовании порошковых композиций [1, 2].

Технологическая эффективность метода дополнительно усиливается перспективами комплексной автоматизации процесса, что в сочетании с экономической целесообразностью и относительно невысокой стоимостью оборудования делает плазменное напыление одним из наиболее перспективных способов формирования защитных покрытий в современной промышленности.

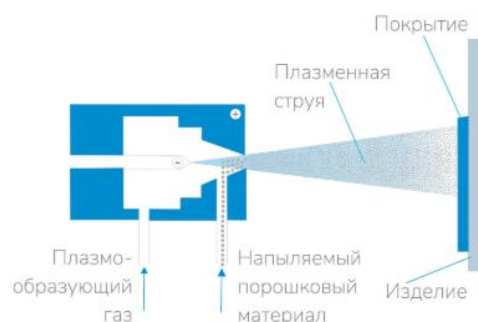


Рис. 1. Схема плазменного напыления.

Плазменная наплавка представляет собой комплексную технологию упрочнения и восстановления деталей, которая реализуется с учетом их конструктивных особенностей и условий эксплуатации. Технологический процесс характеризуется разнообразием модификаций, различающихся по типу присадочного материала, способу его подачи и электрической схеме подключения.

Электрическая схема процесса базируется на

использовании двух типов сжатой дуги по отношению к обрабатываемому изделию: прямого и косвенного действия. Процесс инициирования дуги осуществляется комбинированным методом, при котором первичная стадия включает возбуждение сжатой дуги косвенного действия между анодом и катодом плазмотрона посредством осциллятора [3].

Формирование дуги прямого действия происходит при контакте косвенной дуги (40–60 А) с токоведущей деталью. В процессе плазменной наплавки предусмотрена возможность использования различных присадочных материалов, включая: нейтральную или токоведущую проволоку, комбинацию двух проволок, порошковые материалы, комбинированную подачу порошка совместно с проволокой.

Наиболее распространенным методом плазменной наплавки считается технология, при которой порошковый материал подается непосредственно в плазменную дугу. Частичное расплавление порошка происходит в процессе его транспортировки, после чего материал осаждается на обрабатываемую поверхность, которая подвергается воздействию электрической дуги прямого действия (рис. 2).

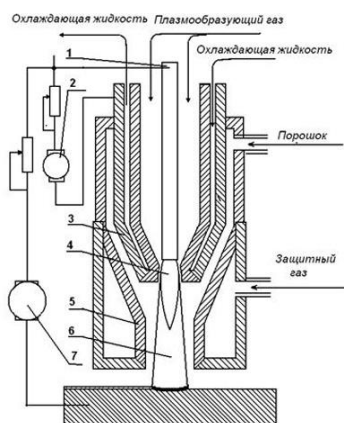


Рис. 2. Схема плазменной наплавки с подачей порошкового материала в дугу.

1 - электрод; 2 - источник питания дуги косвенного действия (плазменной струи); 3 - внутреннее сопло; 4 - плазменная струя;

5 - наружное сопло; 6 - сжатая дуга; 7 - источник питания сжатой дуги.

Ключевое преимущество данного метода заключается в возможности гибкого управления тепловыми потоками, направляемыми как на нагрев порошкового материала, так и на обработку самой детали. Благодаря этому удастся формировать высококачественные наплавленные покрытия с предельно малой глубиной проплавления основного металла [4, 5, 6].

Однако технология имеет ряд существенных недостатков. Прежде всего, это касается конструктивных особенностей плазменного аппарата, который характеризуется: значительные габаритные характеристики установки (диаметр

плазмотрона составляет 55–60 мм); существенные показатели расхода плазмообразующих газов (в диапазоне 22–26 л/мин).

Эффективным зарекомендовал себя метод наплавки с применением токоведущей проволоки. Данная технология характеризуется особым распределением тепловых потоков: сжатая дуга преимущественно задействована для расплавления присадочного материала, в то время как подогрев обрабатываемой детали осуществляется в меньшей степени.

Формирование наплавленного слоя происходит главным образом за счёт тепловой энергии, генерируемой перегретым присадочным металлом, который эффективно связывается с предварительно подогретую поверхность основного материала.

Следует отметить, что применение метода прямой дуговой наплавки с использованием присадочной проволоки (рис. 3), позволяет существенно повысить производительность процесса. Однако данный подход имеет существенный недостаток - увеличение глубины проплавления основного металла, что может негативно сказаться на структуре материала [7]

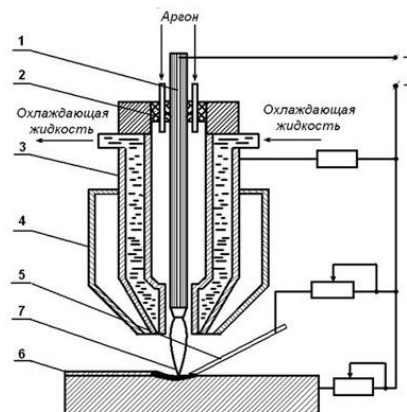


Рис. 3. Схема плазменной наплавки токоведущей проволокой.

1 - электрод; 2 - изолятор; 3 - плазмообразующее сопло; 4 - защитное сопло; 5 - токоведущая проволока (пруток); 6 - изделие; 7 - сжатая дуга.

Плазменная наплавка с применением двух плавящихся электродных проволок, которые последовательно подключаются к источнику переменного тока. Данный источник обеспечивает их нагрев до необходимых температурных показателей, после чего проволоки подаются в хвостовую часть формируемой сварочной ванны.

Формирование сварочной ванны осуществляется за счёт сжатой дуги прямого действия, которая питается от источника постоянного тока. Этот метод позволяет достичь оптимального режима плавления и наплавления материала.

Особого внимания заслуживает система защиты расплавленного металла, которая реализована посредством комплексного воздействия двух

газовых сред. Плазмообразующий газ создаёт надёжную защитную атмосферу вокруг зоны плавления, а дополнительный защитный газ, подаваемый через специальное сопло, обеспечивает изоляцию расплавленного металла от воздействия окружающей среды.

Благодаря такому технологическому решению достигается высокая эффективность процесса наплавки, обеспечивающая точный контроль температурного режима и качественное формирование наплавленного слоя. Данная методика позволяет получать соединения с требуемыми характеристиками при сохранении оптимальных параметров процесса (рис. 4).

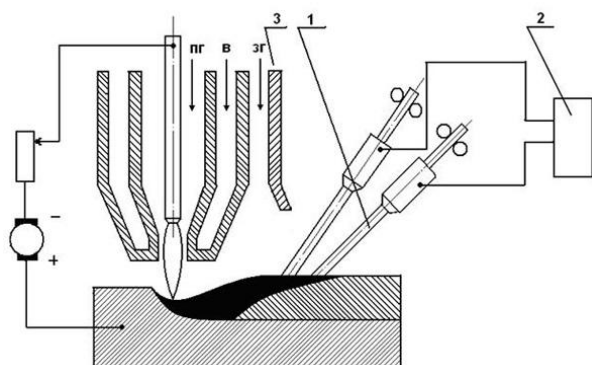


Рис. 4. Схема плазменной наплавки с подачей в ванну двух плавящихся электродных проволок.

1 - электродные токоведущие проволоки; 2 - источник переменного тока; 3 - защитное сопло; ПГ - плазмообразующий газ; В - охлаждающая жидкость; ЗГ - защитный газ.

Технология плазменной наплавки плавящимся электродом представляет собой уникальный метод, в основе которого лежит интеграция двух различных способов: наплавки с использованием сжатой дуги и наплавки в среде инертного газа.

Принцип работы данного метода основан на создании электрической дуги между плавящимся электродом и обрабатываемой деталью. Ключевым элементом процесса является особое расположение электрода — он закрепляется под определённым углом по отношению к оси плазматрона. Такое положение обеспечивает формирование оптимальной сварочной зоны и способствует эффективному протеканию процесса наплавки (рис. 5).

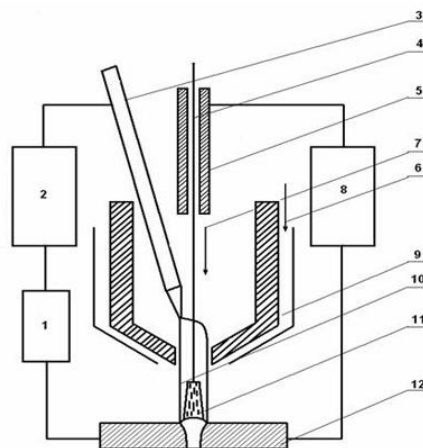


Рис. 5. Схема наплавки сжатой дугой плавящимся электродом.

1 - осциллятор; 2 - источник тока с подающей характеристикой; 3 - электрод; 4 - электродная проволока; 5 - токоподвод; 6 - защитный газ; 7 - плазмообразующий газ; 8 - источник тока с жесткой характеристикой; 9 - плазмообразующее сопло; 10 - сжатая дуга; 11 - сварочная дуга; 12 - изделие.

Питание дуги осуществляется от специального источника постоянного тока, который характеризуется падающей внешней характеристикой. Это позволяет достичь необходимой стабильности процесса и обеспечить требуемый температурный режим.

Эффективность метода достигается благодаря комбинированному воздействию на обрабатываемую поверхность. Сжатая дуга создаёт высокую концентрацию тепловой энергии, необходимой для плавления материала, а инертная газовая среда надёжно защищает рабочую зону от негативного влияния окружающей среды. В результате формируется качественное наплавленное соединение с заданными характеристиками [7].

Выводы

Анализ научно-технической литературы и практического опыта производственных предприятий позволяет выделить ряд существенных достоинств плазменных методов нанесения покрытий.

К ключевым преимуществам данного метода относятся: широкие возможности по легированию получаемых покрытий, высокая производительность процесса, расширенная номенклатура применяемых наплавочных материалов, гибкая регулировка теплового воздействия на основной и присадочный металлы. Благодаря комплексу перечисленных преимуществ плазменная наплавка демонстрирует высокий потенциал для решения разнообразных технологических задач в современной промышленности.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код(шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией)

FFGU-2024-0023.

1. Карцев С.В. Генераторы низкотемпературной плазмы для поверхностной обработки деталей технологического оборудования с улучшенными энергетическими и ресурсными характеристиками / С.В. Карцев // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2024. – № 3. – С. 110-114.
2. Кравченко И.Н. Влияние технологических параметров плазменного напыления на формирование защитных и функциональных покрытий / И.Н. Кравченко, С.Ю. Жачкин, Е.П. Тимашов, Г.И. Трифонов, С.В. Карцев, С.Н. Кузнецов // Новые огнеупоры. – 2023. – № 7. – С. 33-37.
3. Kartsev S.V. Mathematical substantiation of the reduction of oxidation processes in a plasmatron of plasma facilities during deposition of wear-resistant coatings (Математическое обоснование снижения окислительных процессов в плазматроне плазменных установок при нанесении износостойких покрытий) / S.V. Kartsev // Journal of Machinery Manufacture and Reliability (Машиностроение и надежность). – 2022. – Vol. 51. – No. 7. – Pp. 624-629.
4. Карцев С.В. Экспериментальное обоснование воздействия теплового потока дуги плазматрона на термический цикл нанесенного износостойкого покрытия /С.В. Карцев //Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2022. – № 3. – С. 74-79.
5. Юдин В.М. Плазмотроны для порошковой наплавки / В.М. Юдин, А.Н. Шиповалов, Г.А. Храпков, А.А. Маврутенков // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2022. – № 4. – С. 36-39.
6. Шиповалов А.Н. Плазменная наплавка деталей высоколегированными порошками на основе железа / А.Н. Шиповалов, В.М.Юдин, А.В. Ферябков//Сборник научных статей 2-й Международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика А.А. Байкова. Курск. – 2021. – С. 105-108.
7. Кудинов В.В. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белащенко [и др.]. – М.: Наука, 1990. – 408 с.

АНАЛИЗ РАБОТЫ И ПРИЧИНЫ ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ОПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ МЕЛЬНИЦЫ МОКРОГО САМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ММС-70×23 «ГИДРОФОЛ»

Карцев С.В.¹, Елагин С.Г.¹, Аноприенко А.К.¹,

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; sotell@mail.ru

Проведен всесторонний анализ работы и причины выхода из строя высоконагруженных опорных подшипников скольжения, используемых в мельницах мокрого самоизмельчения ММС 70×23 «ГИДРОФОЛ». В рамках проведенного исследования рассматриваются особенности распределения нагрузок, виды характерных повреждений опорных подшипников скольжения и их влияние на ресурс работы мельницы мокрого самоизмельчения.

Введение

Долговечность, экономичность, надежность, а во многих случаях габариты и вес технологического оборудования существенно зависят от конструкции, качества изготовления и монтажа подшипниковых узлов, к которым предъявляются новые повышенные требования, обусловленные в первую очередь увеличением статических и ударных нагрузок, действующих на опоры, и необходимостью значительного увеличения надежности опорных узлов. Современные экономические отношения в сфере производства обогащенной железной руды требуют повышения качества выпускаемой продукции, обеспечения ее конкурентоспособности и соответствия уровню мировых стандартов. Поэтому техническая и технологическая политика в горнорудной промышленности направлена на увеличение эксплуатационного ресурса технологического оборудования используя процессы восстановления и упрочнения быстроизнашиваемых деталей, оптимизацию материальных затрат и сокращение издержек на техническое обслуживание и ремонт. Актуальность темы обусловлена не только значимостью подшипников скольжения в горнорудной промышленности России, но и их ролью в глобальных производственных процессах, где надежность технологического оборудования является залогом успешной работы.

Обзор конструкции мельницы мокрого самоизмельчения ММС-70×23 «Гидрофол»

В настоящее время на горно-обогатительных комбинатах при производстве обогащенной железной руды (окатышей) широко применяют мельницы мокрого самоизмельчения типа ММС-70×23 «Гидрофол», в которых при самоизмельчении куски сырья действуют, как измельчающие тела. В отдельных случаях в барабан мельницы загружают металлические шары в количестве, не превышающем 4...6% ее свободного объема. Преимуществами таких мельниц служат: высокая производительность; простота конструкции и обслуживания; небольшая частота вращения рабочих органов; низкая удельная затрата электроэнергии; высокая надежность и долговечность; высокая однородность шлама; сама мельница не пылит. Единственным недостатком

этой мельницы являются ее большие габариты. Общий вид мельницы мокрого самоизмельчения ММС-70×23 «Гидрофол» показан на рисунке 1.



Рис. 1. Общий вид мельницы мокрого самоизмельчения ММС-70×23 «Гидрофол». Производитель АО «Тяжмаш», Россия, Самарская область

Основные технические характеристики мельницы мокрого самоизмельчения ММС-70×23 «Гидрофол» представлены в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики мельницы мокрого самоизмельчения ММС-70×23 «Гидрофол»

Параметры	Показатель
Производительность, т/ч	400
Длина барабана, м	2,3
Диаметр барабана, м	7
Рабочий объем барабана, м ³	80
Частота вращения барабана, мин ⁻¹	13
Масса без электрооборудования, т	410

Привод мельницы мокрого самоизмельчения осуществляется с помощью зубчатой венцевой шестерни от электродвигателя через редуктор главного привода. Мельница кроме главного привода снабжена вспомогательным приводом для медленного вращения барабана при техническом обслуживании и ремонте. Привод мельницы - периферийный с зубчатым венцом, закрепленным на консоли разгрузочной цапфы; в зацепление с ним входит подвенцовая шестерня, которая получает вращение от электродвигателя через главный

редуктор. Для проворачивания мельницы на небольшой скорости при техническом обслуживании и ремонте предусмотрен вспомогательный привод с электродвигателем и редуктором, тихоходный вал которого соединен муфтой с быстроходным валом главного редуктора [1].

Роль опорных подшипников скольжения в работе мельницы мокрого самоизмельчения ММС-70×23 «Гидрофол»

Для компенсации неравномерной просадки фундаментов мельница мокрого самоизмельчения опирается на раму через цапфовые подшипники скольжения, заключенные в корпуса. Вкладыши цапфовых подшипников установлены на сферических опорах. Смазка цапфовых подшипников скольжения и редуктора главного привода осуществляется циркуляционно с использованием всесезонного гидравлического масла. В условиях высокой нагрузки и недостаточной смазки процесс износа вкладышей подшипника скольжения ускоряется, что в итоге вызывает образование задириков, особенно в тех местах, где нагрузка максимальна (Рис. 2.).

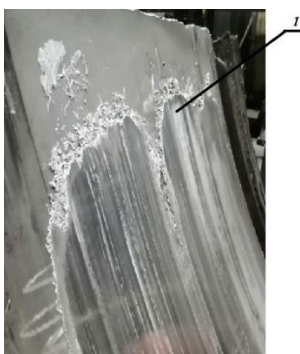


Рис. 2. Вкладыш цапфового подшипника скольжения мельницы мокрого самоизмельчения ММС-70×23 «Гидрофол»:

1- задир на рабочей поверхности вкладыша

В результате происходит увеличение зазоров, что ухудшает условия смазывания и вызывает перегрев подшипника скольжения. У вращающегося под высокой нагрузкой подшипника скольжения поверхности соприкосновения, как правило, выглядят немного матовыми. Это не признак износа в обычном смысле, такое явление не оказывает влияния на долговечность подшипника скольжения. Каждая причина повреждения подшипника скольжения находит отражение в характерной картине повреждения. Такие повреждения, которые именуют первичными, порождают вторичные повреждения – усталостные раковины и трещины, – которые служат непосредственной причиной выхода вкладыша подшипника скольжения из строя. Уже первичные повреждения в некоторых случаях могут оказаться причиной утраты подшипником скольжения работоспособности. Например, износ и,

соответственно, чрезмерно большой зазор в подшипнике, могут вызвать недопустимо большие вибрации и шум.

Большая часть ремонтных работ на мельницах мокрого самоизмельчения производится по причине дефектов опорных подшипников скольжения (Рис 3.).



Рис. 3. Выполнение ремонтных работ по восстановлению вкладышей подшипника скольжения мельницы мокрого самоизмельчения ММС-70×23 «Гидрофол»

Поэтому вопросы оперативной оценки технического состояния таких опорных подшипников скольжения, диагностики возникающих в них дефектов, а также прогнозирования возможности их дальнейшей эксплуатации, занимают одно из важных мест в комплексе работе по техническому обслуживанию и ремонту.

Исследование состава и микроструктуры вкладышей подшипников скольжения

Правильный подбор антифрикционного материала, к которому относятся баббиты на основе анализа микроструктуры и условий эксплуатации имеет решающее значение для обеспечения долговечности и надежности вкладышей подшипников скольжения. Рекомендуется применять баббит с улучшенной микроструктурой для подшипников, работающих в условиях сильного износа или при высоких температурах, в то время как для менее требовательных условий подойдут более простые составы. Важно использовать методы контроля качества на этапах производства и последующего ремонта, чтобы избежать возникновения неисправностей, которые могут влиять на стабильность работы подшипников. Химический состав антифрикционного сплава для заливки подшипников скольжения мельниц мокрого самоизмельчения должен удовлетворять нормам, приведенным в ГОСТ 1320-74. По согласованию с производителем могут также использоваться аналогичные или близкие по составу антифрикционные сплавы иностранного производства [2,3].

Микроструктура баббита напрямую влияет на эксплуатационные характеристики вкладышей подшипников скольжения. При выборе баббита для конкретного применения важно учитывать не только его химический состав, но и структурные особенности, которые определяются технологией производства. Основные компоненты баббита, такие как олово и свинец в значительной степени определяют прочность, износостойкость и теплостойкость материала.

Структура баббита образуется в процессе охлаждения и кристаллизации, что влияет на его склонность к образованию трещин при высоких температурах. Гомогенность и размер кристаллов являются решающими факторами, которые определяют характер трения и способности самосмазывания материала. Чем более равномерно распределены микроструктуры, тем меньше вероятность возникновения локализованных напряжений и износа. (Рис. 4.).



Рис. 4. Микроструктура поверхности вкладыша подшипника скольжения мельницы мокрого самоизмельчения ММС-70×23 «Гидрофол»

Наличие примесей и их распределение в структуре также может существенно повлиять на эксплуатационные характеристики. Например, серебристые вкрапления в баббите могут оказывать положительное влияние на его стойкость к коррозии, а увеличение содержания меди усиливает прочность при высокой температуре. Эксплуатационные условия, такие как скорость вращения, нагрузка и температура в узле трения, должны соответствовать выбранной марке баббита. Высокие температуры могут привести к изменению микроструктуры, способствуя образованию дефектов и даже к разрушению вкладыша [4]. Параметры, такие как оксидная пленка и качество смазки, также должны быть учтены, поскольку они влияют на взаимодействие между поверхностями скольжения. Для практического применения, выбранные марки баббита должны проходить тщательную проверку на износостойкость, силу на сдвиг и стабильность при высоких температурах. Химический состав отечественных антифрикционных сплавов на основе олова и свинца представлен в таблице 2.

Таблица 2. Химический состав отечественных антифрикционных сплавов на основе олова и свинца

Марка сплава	Основные компоненты, %						
	Олово	Сурьма	Медь	Кадмий	Никель	Свинец	Мышьяк
Б88	остальное	7,3 - 7,8	2,5 - 3,5	0,8 - 1,2	0,15 - 0,25	-	-
Б83	остальное	10 - 12	5,5 - 6,5	-	-	-	-
Б83С	остальное	9 - 11	5,0 - 6,0	-	-	1,0 - 1,5	-
БН	9 - 11	13 - 15	1,5 - 2,0	0,1 - 0,7	0,10 - 0,50	остальное	0,5 - 0,9

Продолжение таблицы 2

Марка сплава	Примеси, %, не более					
	Железо	Мышьяк	Цинк	Свинец	Висмут	Алюминий
Б88	0,05	0,05	0,005	0,10	0,05	0,005
Б83	0,10	0,05	0,010	0,35	0,05	0,005
Б83С	0,10	0,10	0,010	-	0,05	0,010
БН	0,10	-	0,020	-	0,10	0,050

В зависимости от условий эксплуатации можно рекомендовать различные сочетания составов и процессов термообработки, которые позволят максимально улучшить эксплуатационные свойства вкладышей [5].

Выводы

В современном производственном процессе по обогащению железной руды высоконагруженные подшипники скольжения играют ключевую роль в обеспечении надежности и эффективности работы мельниц мокрого самоизмельчения.

Однако, несмотря на их важность, случаи выхода из строя подшипников скольжения, особенно в таких критически нагруженных системах, как мельницы мокрого самоизмельчения, остаются актуальной проблемой. Это приводит к значительным экономическим потерям и снижению производительности, что подчеркивает необходимость глубокого анализа причин и факторов, способствующих этому явлению.

На надежность подшипников скольжения оказывают влияние различные факторы, такие как качество материалов, точность изготовления, условия работы и эксплуатационные нагрузки. Изучение этих аспектов позволит выявить основные причины выхода подшипников из строя и предложить пути их устранения.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код(шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0023.

1. Мельницы мокрого самоизмельчения ММС. Технические характеристики. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.tyazhmash.com/products/melnicy-mokrogo-samoizmelcheniya-mms/> (дата обращения: 02.07.2025).
2. Хрущов М.М. Усталость баббитов / М.М. Хрущов // Институт машиноведения. - М.-Л.: Изд-во Акад. наук СССР, 1943 (Казань). - 140 с.
3. Чернавский С. А. Подшипники скольжения / С. А. Чернавский. - М.: Машгиз, 1963. - 244 с.
4. Зернин, М.В. Контактная ползучесть баббитового слоя подшипников скольжения / М.В. Зернин, А.Г. Кузьменко, А.В. Яковлев // Заводская лаборатория. - 2008. - Т. 74. - № 5. - С. 58-62.
5. Баббиты оловянные и свинцовые. Технические условия. ГОСТ 1320-74 // ИПК издательство стандартов. - 2001. - 9 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ НА СТРУКТУРУ ЗАГОТОВКИ, СИНТЕЗИРОВАННУЮ WAAM-МЕТОДОМ

Киричек А.В., Макаренко К.В., Котлярова И.А., Илюшкин Д.А., Зенцова Е.А.

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», Брянск, Россия; makkon1@yandex.ru

Изучено влияние регулируемого охлаждения на процессы структурообразования, протекающие в стали 08Г2С, при синтезе заготовки аддитивным WAAM-методом. Регулирование охлаждения производили посредством специально разработанного водоохлаждаемого стола, на котором выращивали заготовки. Регулирование интенсивности охлаждения осуществляли путем изменения расхода воды. Представленные результаты позволили выбрать наиболее рациональный режим охлаждения, обеспечивающий наиболее мелкозернистую микроструктуру с позиции соотношения Холла-Петча.

Аддитивные технологии, основанные на послойном синтезе материала, позволяют получать уникальные по конфигурации изделия с требуемыми функциональными характеристиками. Одним из наиболее интенсивно развивающихся методов аддитивных технологий является метод WAAM (Wire Arc Additive Manufacturing (перев. с англ.: аддитивная технология проволоочной электродуговой наплавки, или упрощенно: аддитивная электродуговая наплавка)) [1, 2]. Технология WAAM-метода базируется на сварочном процессе и использует электрическую дугу в качестве источника тепла для расплавления металла, подающегося в зону горения дуги. По классификации данный метод относится к классу аддитивных технологий DED (Direct Energy Disposition (перев. с англ.: прямой подвод энергии и материала)) [3]. Высокоэнергетическое воздействие электрической дуги приводит к интенсивному разогреву ранее синтезированных нижележащих слоев заготовки, что, как следствие, способствует структурным изменениям в сплаве заготовки. Температурное воздействие с экстраполяцией на соответствующие диаграммы состояния сплавов, применяемых в качестве «строительного материала» при синтезе заготовки, позволяет спрогнозировать процессы структурообразования в зоне термического влияния [4]. Использование принудительного охлаждения для целенаправленного управления процессами структурообразования позволяет получать в синтезируемой заготовке требуемые свойства непосредственно в процессе синтеза [5]. При этом важно определить взаимосвязи процессов структурообразования с температурными изменениями, возникающими в процессе синтеза заготовки.

Цель данной работы заключается в изучении влияния регулируемого охлаждения, обеспечиваемого использованием специально разработанного водоохлаждаемого стола, на котором осуществляется синтез заготовки WAAM-методом, на процессы структурообразования, протекающие в стали 08Г2С.

Материалы и методы

Изготовление заготовок для исследований

проводили на установке АСУТ, которая использует WAAM-метод. В качестве источника питания электрической дуги использовали инверторный сварочный полуавтомат FOXWELD FoxMig 3000. Защитная газовая среда: смесь газов (80% Ar + 20% CO₂). Режим наплавки: импульсный.

Для регулирования теплоотвода применяли специально спроектированный и собранный водоохлаждаемый стол. Регулирование теплоотвода осуществляли путем изменения расхода подачи неионизированной воды для охлаждения стола. Для регулирования теплоотвода в процессе синтеза использовали три режима охлаждения: с расходом воды – 3 л/мин; с расходом воды – 5 л/мин; без охлаждения.

Ключевые параметры режима синтеза представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры режима синтеза заготовок

№	Параметр	Значение
1.	I – ток, А	175
2.	U – напряжение, В	19,6
3.	V _{пр} – скорость подачи проволоки, м/мин	5,64
4.	V _{по} – скорость подачи исполнительного органа (ИО), мм/мин	1000
5.	A _{осц} – амплитуда, мм	55
6.	Шаг осцилляции, мм	5
7.	V _{осц} – скорость осцилляции, мм/мин	42
8.	n – количество слоев	30
9.	L – длина рабочего хода фидстока, мм	41325
10.	T _{подл} – температура подложки в режиме синтеза, °С	271 / 273 / 275
11.	Длина слоя, мм	57,5
12.	Время перехода между слоями, мин:сек	0:50
13.	Высота подъема сопла на первом слое, мм	14,7
14.	Подъем ИО на слой, мм	2,2
15.	Марка материала проволоки	Св-08Г2С
16.	Диаметр проволоки, мм	1,2
17.	Марка материала подложки	Ст3
18.	Размеры подложки (Д×Ш×В), мм	150×100×10
19.	Q – расход охлаждающей жидкости, л/мин	3/ 5/ без охл
20.	t _{сум} – время синтеза образца, час:мин:сек	1:13:16
21.	Расход материала за 1 секунду, кг/сек	0,000836
22.	Мощность источника, Вт	3430
23.	Энергия, затраченная за 1 секунду, Дж	3430
24.	Температура стола в установившемся режиме синтеза, °С	50/ 52/ 85
25.	Температура образца после завершения синтеза, °С	395/ 402/ 410

Примечание: Параметры № 10, 19, 24 и 25 переменные, изменяются в зависимости от условий охлаждения, все прочие постоянные.

Замер температуры заготовок в процессе синтеза проводили тепловизором Fluke TiX660.

Схема синтеза для всех трех заготовок использовалась идентичная (рис. 1). Размеры заготовок (длина × ширина × высота) 57,5×55×65 мм.

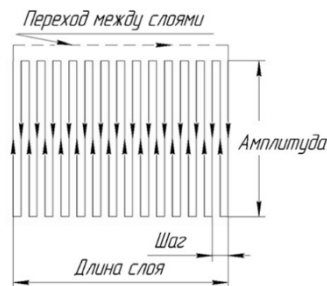


Рис. 1. Схема аддитивного синтеза заготовок

Пример синтезированной заготовки представлен на рис. 2.



Рис. 2. Фотография заготовки для режима охлаждения с расходом воды – 5 л/мин

Образцы из заготовок вырезали в двух направлениях: вдоль движения горелки при наплавке слоя и поперек. Кроме того, были отобраны образцы по высоте заготовки. Система маркировки образцов для металлографического анализа представлена в табл. 2.

Таблица 2. Маркировка образцов для металлографического исследования

Уровень отбора образца	Режим охлаждения заготовок		
	3 л/мин	5 л/мин	без охлаждения
Нижний (от подложки)	1031	1051	б/о
Средний	1032	1052	
Верхний	1033	1053	

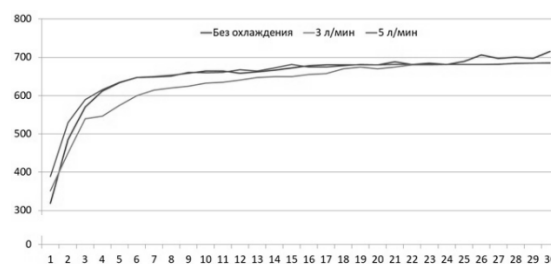
Примечание: если образец вырезан в продольном направлении в конце маркировки используется буквенное сочетание ПР, если в поперечном направлении, то ПП.

Микроструктуру образцов изучали на двух микроскопах: Leica DVM6A и Leica DM IRM. Шлифы для металлографических исследований травили 4 %-ным спиртовым раствором азотной кислоты.

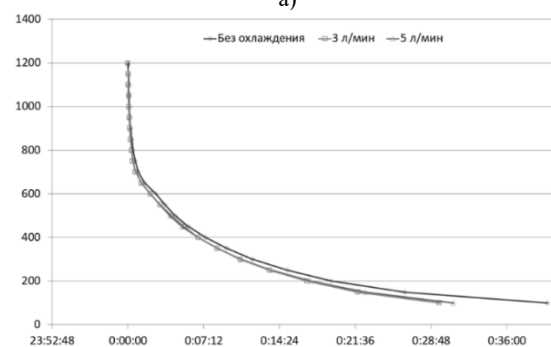
Результаты и их обсуждение

Результаты температурных измерений подложки, стола и заготовки представлены на рис. 3 и 4. Из анализа изменения максимальной температуры после синтеза каждого слоя (рис. 3, а) следует, что наиболее низкие показания температуры наблюдаются при охлаждении 3 л/мин. В этом есть

противоречие, очевидно, что при большем расходе воды (5 л/мин) должно быть более интенсивное охлаждение, однако для данного режима оно в начальных слоях (до 4 слоя включительно) максимальное, и даже выше, чем без охлаждения. Кроме того, из анализа рис. 3, б следует, что скорости охлаждения при расходе воды 3 и 5 л/мин фактически одинаковые. Это можно объяснить тем, что лимитирующим звеном в системе является теплопроводность на границе подложки – поверхность стола, и она зависит не от интенсивности расхода воды при охлаждении.



а)



б)

Рис. 3. Результаты замера температур при аддитивном синтезе заготовок: а – изменение максимальной температуры после синтеза каждого слоя; б – график охлаждения образцов до 100 °C

В подтверждение данного факта анализ замера температур в установившемся режиме для подложки (рис. 4, а) при расходе воды 3 и 5 л/мин приблизительно одинаковый и незначительно превышает эти показатели для режима без охлаждения. Замер температуры для стола еще более четко подтверждает правильность выдвинутой гипотезы для режимов охлаждения 3 и 5 л/мин, температуры 50 и 52 оС, соответственно (рис. 4, б), а без охлаждения стол был нагрет до температуры 85 оС. Это свидетельствует о том, что охлаждение стола работает, но изменение скорости расхода не обеспечивает улучшение теплопроводности. Парадоксальная ситуация наблюдается при замерах температуры на основании заготовки в момент завершения ее синтеза (рис. 4, в), самая низкая температура зафиксирована для заготовки, охлаждаемой с расходом воды 3 л/мин – 375 оС, более высокие значения для расхода 5 л/мин, – 402 оС, самые большие значения без охлаждения стола – 410 оС.

Парадоксальность результатов замера основания заготовки свидетельствует о том, что при большем расходе воды теплопроводность в системе уменьшилась, что свидетельствует о происходящих изменениях на границах элементов системы.

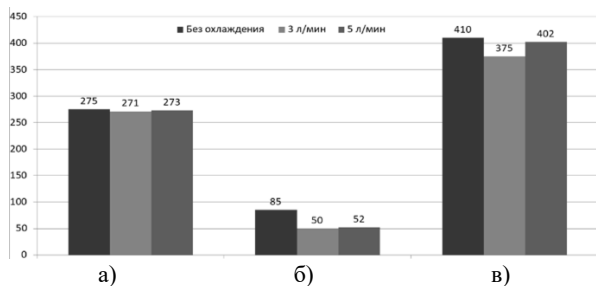


Рис. 4. Замеры температуры в установившихся режимах синтеза: а – подложки; б – стола; в – основания заготовки в момент завершения синтеза

Объяснить наблюдаемые результаты можно следующим образом, исходя из следующей предпосылки очевидно, что в процессе эксплуатации стола в его теплопроводности происходили изменения. В качестве причин можно выдвинуть следующие гипотезы: во-первых, коробление стола могло привести к образованию зазора между подложкой и его рабочей поверхностью; во-вторых, в охлаждающих каналах стола могла образоваться накипь или ржавчина, которые снизили коэффициент теплопроводности. Локальный разогрев поверхности стола и его внутреннее охлаждение потоком жидкости способствует короблению стола под действием термических напряжений, что приводит к возникновению зазора между подложкой и столом, и, в итоге, к уменьшению теплопроводности.

Типичные микроструктуры образцов из стали 08Г2С на различных уровнях при разных режимах охлаждения представлены на рис. 5.

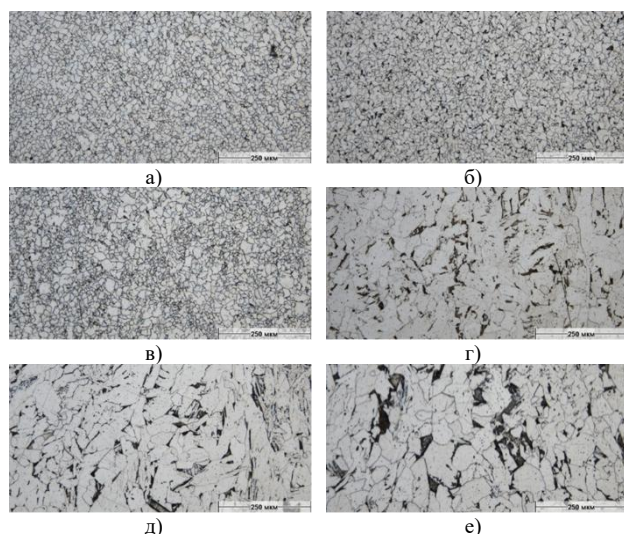


Рис. 5. Типичные микроструктуры образцов на разных уровнях и с разными режимами охлаждения, $\times 100$: а – 1031 ПП; б – 1031 ПР; в – 1052 ПП; г – 1053 ПП; д – 1053 ПР; е – б/о ПП

Критерием оценки качества микроструктур считали наиболее благоприятное сочетание минимальной величины зерна с изотропностью. Именно такое сочетание обеспечивает наиболее высокий уровень механических свойств сплавов с позиции зависимости типа Холла-Петча. Оптимальные микроструктуры были получены в заготовке, синтезируемой в условиях охлаждения с расходом воды 3 л/мин (рис. 5, а и б). Наиболее мелкодисперсная, однородная и равноосная микроструктура была выявлена в образцах нижней части, вырезанных из заготовок, охлаждаемых с расходом воды 3 л/мин и в середине заготовки, полученной с расходом 5 л/мин при охлаждении (рис. 5, в). Структура заготовки, синтезированной с режимом охлаждения 3 л/мин, более однородная по высоте, чем микроструктура заготовки, охлаждаемой по режиму 5 л/мин, в нижней и верхних частях которой сохранились паттерны, свойственные первичной литой структуре (рис. 5, г и д). Эта микроструктура по морфологии и размерно-топологическим характеристикам сопоставима с отдельными зонами заготовки, синтезированной без охлаждения (рис. 5, е).

Заключение

Как показали исследования, принудительное охлаждение при синтезе заготовок WAAM-методом, несмотря на технические сложности реализации, является эффективным инструментом управления процессом структурообразования.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, работа «Проведение фундаментальных научных исследований» в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки РФ по проекту №FZWR-2024-0003 (№ 075-00150-24-03) «Разработка технологической стратегии и теоретико-экспериментальное исследование ключевых элементов технологии аддитивного синтеза из металлической проволоки деталей 3DMP-методом и волнового термомеханического упрочнения синтезируемых деталей машин».

1. Kerber E., Knitt H., Fahrenholz-Heiermann J. L., Ergin E., S. Brell-Cokcan, Dewald P., Sharma R. Variable Layer Heights in Wire Arc Additive Manufacturing and WAAM In-formation Models // Machines. 2024. 12, 432. – 16 p.
2. Andrade D.G., Tankova T., Zhu C., Branco R., Simoes da Silva L., Rodrigues D.M. Mechanical Properties of 3D Printed CMT-WAAM 316 LSi Stainless Steel Walls // Journal of Constructional Steel Research. 2024. 215, Article 108527. – 16 p.
3. Канищев М.В., Ульев Л.М. Введение в аддитивные технологии. Т. 1. Обзор основных технологий 3D-печати – М.: Издательский Дом НИТУ «МИСиС», 2023. – 352 с.
4. Colin C. Microstructures of Metallic Materials from Additive Manufacturing // Additive Manufacturing of Metal Alloys 2: Microstructures, Post-processing and Use Properties. – Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2023. P. 1 – 98.
5. Макаренко К.В., Вдовин А.В., Федук А.Г., Зенцова Е.А., Новиков М.А., Киричек А.В. Влияние скорости охлаждения на размерно-топологические характеристики микроструктуры стали 08Г2С, полученной по технологии аддитивной аргоно-дуговой наплавки // Металловедение и термическая обработка металлов. 2025. № 7 (841). С. 30 – 41.

ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ НА СТРУКТУРУ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СТАЛИ ПРИ РЕВЕРСИВНОМ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ

Козлов Д.А.¹

¹ Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; koslov74@mail.ru

Исследовано изменение интенсивности изнашивания сталей, прошедших ионную имплантацию. Дано сравнение с материалами, прошедшими газовое азотирование.

Значительное количество современных машин и механизмов работает в различных условиях трения и изнашивания, поэтому проблема повышения износостойкости имеет большое значение. Применение ионной имплантации для повышения износостойкости является перспективным. Суть метода заключается во внедрении положительно заряженных частиц (ионов) в поверхностные слои обрабатываемого материала, в результате чего происходит изменение структуры поверхностных слоев и придание новых свойств обрабатываемой поверхности. В результате процесса внедрения в тонком поверхностном слое может быть получена достаточно высокая концентрация атомов вводимой примеси. При этом внедряемые ионы претерпевают многочисленные упругие соударения с атомами решетки, в имплантированном слое образуется большое количество радиационных дефектов, как правило, на 2–3 порядка превосходящих число имплантированных атомов [1]. Важная особенность метода ионной имплантации состоит в том, что этот метод не ограничен диффузионными константами, благодаря чему он дает положительные результаты и тогда, когда обычные способы легирования либо вообще не пригодны, либо встречают определенные трудности [2].

Одним из наиболее распространенных элементов, применяемых при имплантации для повышения износостойкости, является азот.

В данной работе исследовали влияние ионной имплантации азота на триботехнические характеристики различных пар трения конструкционных материалов. Испытывали пары трения « α -Fe – сталь 20X» и «ШХ15 – сталь 40X».

В паре трения « α -Fe – сталь 20X» в первом случае образец α -Fe подвергался ионной имплантации азотом, а во втором – традиционному газовому азотированию. Сталь 20X в обоих случаях проходила цементацию и последующую закалку.

В паре трения «ШХ15 – сталь 40X» ионной имплантации подвергался образец из стали 40X. В качестве сравнения для испытания в паре трения со сталью ШХ15 была взята сталь 38ХМЮА, подвергнутая азотированию.

Испытания на износостойкость проводили на машине трения при возвратно-поступательном движении одного образца относительно другого. В качестве смазочной среды использовали СОЛИДОЛ.

Все образцы перед испытаниями предварительно прирабатывались при давлении 0,2

МПа. Приработкой достигалось равномерное распределение следов износа по всей поверхности трения. Далее ступенчато повышали давление. Величины давления составляли 1,25; 2,5; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 40 МПа. На каждой нагрузке длительность испытаний составляла 3,5 часа.

Результаты исследований

На рисунке 1 приведена микроструктура армко-железа после ионной имплантации азота. После имплантации на поверхности армко-железа образовался слой γ' -фазы (Fe_4N) толщиной $9\div 10$ мкм и слоя азотистого мартенсита толщиной около 25 мкм. Слой γ' -фазы разделяется по толщине на две примерно равные части – у самой поверхности более светлый, у основания – более темный.

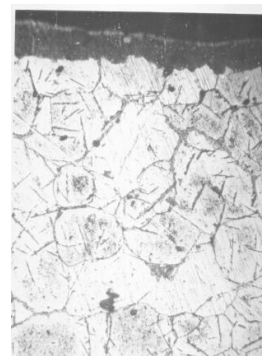


Рис.1. Микроструктура поверхностного слоя армко-железа после ионной имплантации

Под слоем γ' -фазы расположен диффузионный слой с убывающим по мере приближения к сердцевине содержанием азота. В верхней части диффузионного слоя, на расстоянии около 25 мкм располагаются продукты распада азотистого аустенита. Твердость в этой части изменяется от 60...62 до 45 HRC. Далее под этим слоем располагается слой феррита с иглами нитридов. По изменению микроструктуры можно сделать вывод, что глубина проникновения азота составляет более 50 мкм.

На образцах армко-железа, прошедших стандартное газовое азотирование при температуре 950°C в течение 12 часов, также исследована микроструктура. Для этого после азотирования был сделан косой шлиф. Результаты исследования микроструктуры образцов свидетельствуют об образовании упрочненного слоя, аналогичного по структуре слою, образовавшемуся после ионной имплантации. Поверхностные слои представляют

собой $\gamma'(\text{Fe}_4\text{N})$ и $\epsilon(\text{Fe}_2\text{N})$ -нитриды толщиной приблизительно 9 мкм. Ниже располагается слой продуктов распада азотистого аустенита толщиной 5...7 мкм с твердостью приблизительно 43 HRC, далее расположена зона толщиной около 150 мкм, содержащая иглы нитридов.

В случае традиционного газового азотирования слой нитридов имеет несколько большую толщину и дополнительно содержит ϵ -нитрид в отличие от слоя, полученного ионной имплантацией. Слой азотистого мартенсита имеет большую толщину и твердость в слое после ионной имплантации. При газовом азотировании наблюдается проникновение азота и образование нитридных игл внутри зерен на большую глубину, чем при ионной имплантации.

В стали 45 после ионной имплантации в течение 1 часа в поверхностном слое формируется ϵ -фаза (Fe_2N). Толщина слоя составляет порядка 1...2 мкм. При этом диффузионный слой по структуре четко не выявляется. При дальнейшем увеличении времени имплантации до 2 часов в поверхностном слое помимо ϵ -фазы формируются нитриды железа γ' -фазы (Fe_4N). Толщина слоя возрастает до 2...3 мкм. При этом происходит формирование диффузионного слоя нитридов в виде игл. Температура образцов во время ионной имплантации составляла порядка 350...400 $^{\circ}\text{C}$.

Средние значения интенсивностей линейного износа образцов армко-железа после ионной имплантации и газового азотирования соответственно составляют $0,44 \times 10^{-9}$ и $0,78 \times 10^{-9}$. При этом износостойкость контрольных образцов из стали 20Х при работе в паре с армко-железом, прошедшим ионную имплантацию, выше по сравнению с образцами армко-железа после азотирования. Средняя величина интенсивности линейного износа контрольных образцов при работе с образцами армко-железа после имплантации составляет $2,24 \times 10^{-9}$, а при работе с образцами после азотирования $6,47 \times 10^{-9}$.

Испытания пары трения «ШХ15-сталь 45» показали, что износостойкость стали 45 в паре трения с шарикоподшипниковой сталью практически такая же, как и у стали 38МФЮА, прошедшей газовое азотирование. При этом

необходимо подчеркнуть, что при нагрузках ближе к 40 МПа сталь 45 после ионной имплантации показала лучшую износостойкость в сравнении со сталью 38МФЮА.

Так же, как и при испытании пары « α -Fe – сталь 20Х», интенсивность изнашивания контртела из стали ШХ15 при работе в паре со сталью 45 после имплантации (при нагрузке более 10 МПа) меньше, чем при работе в паре со сталью 38ХМЮА.

Заключение

Установлено, что в результате ионной имплантации азота в армко-железо образуется двухслойная структура. В верхнем слое происходит формирование нитридов ϵ – и γ' -фазы. Ниже располагается слой феррита с иглами нитридов толщиной более 50 мкм.

Ионная имплантация стали 45 позволяет получить слой, состоящий из нескольких зон.

Износостойкость армко-железа после имплантации практически соответствует износостойкости армко-железа после традиционного газового азотирования.

Износостойкость стали 45 после ионной имплантации выше, по сравнению со сталью 38ХМЮА.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0020, FFGU-2024-0021.

1. Гусева М.И. Ионная имплантация в металлах // Поверхность. Физика, химия, механика. - 1982. - №4. - С. 27-49.
2. Гусева М.И. Технологические аспекты ионной имплантации в металлах. // Металлы. - 1993. - №3. - С. 141-150.
3. Кукареко В.А., Кушнеров А.В. Влияние предварительной термической обработки на износостойкость стали 40Х13, модифицированной ионами азота // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2022. - Т.18. - №2(206). - С.61-65.
4. Чудина О.В., Приходько В.М., Лужнов Ю.М. Структурные аспекты поверхностного упрочнения деталей, работающих в условиях износа // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2022. - №9(213) – С.396-404.
5. Куксенова Л.И., Герасимов С.А., Лаптева В.Г. Износостойкость конструкционных материалов. М.: Изд-во МГТУ им.Баумана, 2011. - 237 с

СТАТИСТИЧЕСКАЯ БИНАРНАЯ МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Конев Е.М.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия (E-mail:7653475@mail.ru)

Цель

Разработка структурированного способа моделирования накопления повреждений в процессе эксплуатации механических систем, основанный на цепях Маркова и представлении модели нагруженным орграфом в виде бинарного вопросника.

Введение

При построении статистических моделей накопления повреждений рассматривается физическая ситуация, когда изделие функционирует циклически во внешней среде, во время циклов происходят необратимые изменения, они аккумулируются до тех пор, пока это изделие уже не может удовлетворительно функционировать, то есть наступает его отказ. К процессу накопления необратимых изменений могут быть отнесены усталостный износ, рост усталостных трещин, ползучесть и т.п.

Для построения модели кумулятивных повреждений используем теорию цепей Маркова. Эти модели объединяют основные источники разброса, встречающиеся в физических процессах кумулятивных повреждений [1,2].

Рассмотрим последовательность исходов эксперимента по нагружению изделия до выработки на отказ $\{h_1, h_2, \dots, h_n\}$, где h_j ($j=1 \div n$) - взаимоисключающие исходы, образующие полную группу событий H . Результат эксперимента (событие h_j) есть некоторое состояние процесса.

Вид матрицы перехода системы [1] говорит о том, что реально можно рассмотреть не слишком большое число шагов j , а также о том, что так называемое (формально введенное подобие физического процесса) единичное накапливающееся повреждение физического смысла не имеет. Даже если рассматривать рост единичной трещины (наращивание ее длины после определенного случайного числа циклов нагружения), то от такой модели, трудоемкой с инженерной точки зрения, для решения практических задач помощи недостаточно [3].

Предлагаемый подход может быть формализован графом состояний в виде бинарного вопросника (БВ), которому соответствует матрица состояний.

Считается, что модель в виде графа, учитывающая влияние практически любых факторов, влияющих на систему, является более общей для описания технической системы.

Бинарный вопросник представляется в виде дерева, где внутренние вершины $q \in Q$

соответствуют задаваемым вопросам (тестам), висячие вершины $h \in H$ представляют гипотезы о результатах эксперимента (состоянии объекта).

Путь от корневой вершины q_0 до любой гипотезы имеет одинаковую длину, что обеспечивает равномерное (почти префиксное) кодирование.

Время функционирования изделия до момента отказа определяется в основном плотностью нагружения, которая определяет вероятность наступления удара, а показателем исхода эксперимента служит безусловная вероятность, что сила удара выше критического уровня $[p^*]$, при котором происходит отказ.

Математическую постановку задачи синтеза модели сформулируем следующим образом [4]. Требуется построить нагруженный орграф $G(D, H)$, у которого

$$D = Q \cup H, \quad d = h \in H \Rightarrow |\Gamma_h| = \emptyset, \quad \sum p(h) = 1, \\ d = q \in Q \Rightarrow |\Gamma_q| = a = 2, \quad Q \cap H = \emptyset, \quad |\Gamma_{q_0}^{-1}| = \emptyset, \\ (1)$$

с учетом условия $p(h) \geq [p^*]$,
где $[p^*]$ вероятность отказа.

Разработка алгоритма

Из (1) следует, что G — это дерево, содержащее N висячих вершин $h \in H$ (гипотез) с нулевой полустепенью исхода и $(N - 1)$ внутренних вершин $q \in Q$ (вопросов) с полустепенью исхода 2, одна из которых q_0 (корневая) имеет нулевую полустепень захода. Априорные вероятности появления гипотез $p(h)$ выражаются через плотность их распределения.

Решение поставленной задачи сводится к установлению смысла вопросов q и определению их множества Q , с помощью которого строится бинарный вопросник. С алгоритмической точки зрения вопрос означает реализацию решающего правила S о направлении его исхода («да», «нет»), а сам орграф представляет собой процедуру последовательного расщепления текущего подмножества гипотез $H(q)$, начиная с исходного $H(q_0)$, на два класса исходов $H_0(q)$ и, таких, что $H_0(q) \cup H_1(q) = H(q)$, $H_0(q) \cap H_1(q) = \emptyset$. На каждом шаге (ранге r) этого процесса происходит уменьшение мощности $H(q)$ и продолжается он до тех пор, пока $|H(q)|$ не станет равной 1, то есть пока не произойдет идентификация события.

Вопросы $q \subset Q$ задаются о текущем состоянии системы, ее параметрах, условиях эксплуатации и истории нагружения, они отражают физические

процессы, приводящие к накоплению повреждений ("превышает текущая нагрузка критическое значение для усталостного разрушения?", "обнаружена трещина размером более X мм?", "превышает температура эксплуатации допустимый предел?", "превышает общее время эксплуатации установленный ресурс?").

Решающее правило S определяет, как отвечать на вопросы в зависимости от наблюдаемых данных. Гипотезы $h \in H$ представляют возможные состояния системы, включая состояние отказа. В бинарном случае их два: "исправно" и "отказ".

БВ можно представить так называемой анкетой B – матрицей из нулей и единиц в ячейках на пересечении номера вопроса (теста) и ответа решающего правила о направлении к следующему уровню (рангу r) орграфа. Анкета называется полной, если она описывает все случаи исходов вопросов по направлению к каждой из висячих вершин (гипотез), своего рода код эксперимента.

Бинарный вопросник можно использовать для определения вероятностей переходов в цепи Маркова. Ответы на вопросы (тесты) позволяют уточнить текущее состояние системы и оценить вероятность перехода в другое состояние (включая состояние отказа) в виде матрицы.

В результате воздействия шумов каждый раз при проведении одного и того же опыта (теста) с фиксированным входом на выходе будут различающиеся результаты, так как вероятности правильного исхода вопросов станут меньше единицы. Вопрос должен представлять собой сложный эксперимент по выработке решения о направлении исхода в соответствии с решающим правилом.

Разработка алгоритма

Бинарный вопросник будет применяться неоднократно N раз, для правильного решения задачи требуется обеспечить гарантированную апостериорную вероятность $\pi(h_j)$ для каждой j -й гипотезы. Это требование с учетом ограничения $p(h) \geq [p_a]$, где $[p_a]$ заданный уровень надежности распознавания, запишем следующим образом:

$$\sum_{j=1}^N \pi(h_j) = \sum_{j=1}^N \prod_{q_i \in \mu(q_0, h_j)} p(q_i) p_r(h_j) \leq 1 - p_a \quad (2)$$

Из (1) с учетом (2) следует, что длины маршрутов $|\mu(q_0, h_j)|$ (число дуг в пути от корневой вершины q_0 до висячей h_j) должны быть одинаковы, а вероятности правильных исходов вопросов $p(q_i)$ надо максимизировать.

Отсюда вытекает, что БВ должен быть компактным [4], то есть идентификация любой гипотезы не может произойти раньше $(R_k - 1)$ ранга (рангом вершины называют число дуг, соединяющих её с корнем вопросника).

Компактной называется логически полная анкета, число строк которой R_k связано с мощностью множества тестов $|T_k|$ неравенством Крафта

$$R_k = |T_k| \leq [\log_2 N] \quad (3)$$

где символ $[\circ]$ означает выделения целой части числа сверху.

Однако реализовать по B компактный вопросник в общем случае не удастся. Поэтому представим его в виде искусственной структуры – прадерева $G_0(Q_k \cup H, r)$, каждый узел которого (вопрос $q \in Q_k$) на ранге r , $r = 0 \div R_k$ представляет собой реализуемый по B вопросник неполной идентификации:

$$G_{q,r}(T \cup H_{q,r}, \Gamma), H_{q,r} = H \setminus \bigcup_{q_v \in \mu(q_0, q)} H_q(q_v), \\ |H_{q,r}| = [N/2^r], \quad (4)$$

задача которого состоит в определении направления исхода вопроса $S = 0 \vee 1$.

В зависимости от свойств поданкеты $B_{q,r}$ длина кода $\ell_{q,r}$ будет меняться от 1 (один тест, расщепляющий сразу $H_{q,r}$ на два исхода: $H_{q,r} \cup H_{q,r}^s = H_{q,r}$) до $\ell_{q,r}^{\max} = [\frac{N}{r+1}]/2$, что соответствует вырожденному случаю условной стратегии – последовательному выделению классов единичной мощности ($|H_{q,r}(t_i)| = 1$).

На предпоследнем ранге $r = R_k - 1$ всегда существует $[N/2]$ элементарных БВ полной идентификации, разделяющих одним тестом всего две висячие вершины (гипотезы).

Тесты подвержены ошибкам, интенсивность которых характеризуется матрицей вероятностей их исходов той же размерности, что и анкета $P = \|p(t, h)\|$, $P \in [0, 1]$.

Её получают либо методом статистического моделирования, либо по результатам натурных испытаний. Повысить вероятность правильного исхода вопроса $p(q_i)$ можно лишь одним путем – $n_{q,r}$ кратным резервированием узла. Тогда решение о направлении исхода в любой вершине q должно приниматься в результате статистического анализа исходов решающего правила S каждым из $n_{q,r}$ каналов $G_{iq,r}$, $i = 1 \div n_{q,r}$.

Введем понятие цены $i_{q,r}$ -го канала $C_{iq,r}$ как суммы вероятностей ошибочных исходов цепочки тестов длиной $l_{q,r}$:

$$C_{iq,r} = \sum_{l=1}^{l_{q,r}} [1 - p(t_l)] \quad (5)$$

и сформулируем критерий оптимизации стохастического БВ в следующем виде:

$$G^*(T \cup H, \Gamma): \begin{cases} C_G = \sum_{r=0}^{R_k} \sum_{q=1}^{2^r} \sum_{i_{q,r}=1}^{n_{q,r}} C_{iq,r} \rightarrow \min, \\ \sum_{j=1}^N \pi(h_j) \leq \varepsilon. \end{cases}$$

(6)

Таким образом оптимизируемым параметром является длина выходного кодового слова

$\mathcal{L} = \sum_r \sum_q n_{q,r} l_{q,r}$, которая определяет характеристики вычислителя, в том числе потребную емкость памяти, а смысл оптимизации сводится к тому, чтобы максимально использовать одни и те же тесты с высокой вероятностью исхода в различных кодах.

Процедура принятия решения в узле реализует правило мажоритарного машинного голосования:

$$S \Leftrightarrow m_s \geq \left\lfloor \frac{n_{q,r}+1}{2} \right\rfloor, \quad (7)$$

где случайная величина m_s (число завершений распознавания с признаком s) подчинена биномиальному распределению $B_i(n, p)$, $n = n_{q,r}$, а p принимает значение $p_{i_{q,r}}$ для каждого $i_{q,r}$ -го опыта, $i_{q,r} = 1, n_{q,r}$. Здесь вероятность $p_{i_{q,r}}$ характеризует надёжность $i_{q,r}$ -го канала и определяется выражением:

$$P_{i_{q,r}} = \prod_{l=1}^{l_{i_{q,r}}} p(t_l), \quad l_{i_{q,r}} = 1 \div \ell_{q,r}^{\max} \quad (8)$$

Выходным параметром алгоритма является массив значений $\{n_{q,r}\}$, $q = 1 \div (N-1)$, $r = 0 \div R_k$, каждый элемент которого рассчитывается путем решения уравнения:

$$p\left(m_s \geq \left\lfloor \frac{n_{q,r}+1}{2} \right\rfloor\right) = e^{\frac{1}{R_k-r+1}} = \sum_{j=m_s}^{n_{q,r}} (-1)^{j-m_s} C_{m_s}^{j-1} \sum_{i_{q,r}=1}^{j-1} C_{j-1}^{i_{q,r}-1} P_{i_{q,r}}, \quad (9)$$

где левая часть есть гарантированная вероятность определения исхода в узле q ранга r . Однако уравнения (7), (8) в общем случае не разрешимы относительно $n_{q,r}$ до тех пор, пока не определена структура прадрева в целом $\{\ell_{q,r}\}$, что и является конечной целью задачи. Поэтому решать её приходится традиционным в таких случаях методом последовательных приближений.

Построим субоптимальный БВ методом корневого вопроса [4], согласно которому текущий тест для построения кода $i_{q,r}$ -го канала выбирается путем поиска на множестве T такой строки $b_{i_{q,r}}^t$ поданкеты $B_{q,r}^1$ размером $|T| \times |H_{q,r}^1|$, суммарная функция предпочтения которой Φ по обоим исходам максимальна:

$$t^1 = \operatorname{argmax} [\Phi_{i_{q,r}^0}(t^1) + \Phi_{i_{q,r}^1}(t^1)], \quad (10)$$

где

$\Phi_{i_{q,r}}^s(t^1) = (b_{i_{q,r}}^{1-1} \oplus b_{i_{q,r}}^1) \sum_{h \in H_{q,r}^1} p(t^1, h)$, $\oplus$ — сложение по модулю 2, а верхний индекс 1 означает порядковый номер искомого теста в кодовой цепочке $i_{q,r}$ -го канала, задающий текущее множество гипотез $H_{q,r}^1$, подлежащее расщеплению этим тестом t^1 . Функция $\Phi_{i_{q,r}}^s$ достигает абсолютного максимума тогда,

когда оба ее сомножителя принимают значения:

$$(b_{i_{q,r}}^{1-1} \oplus b_{i_{q,r}}^1) = |H_{q,r}^1|, \quad \sum_{h \in H_{q,r}^1} p(t, h) = |H_{q,r}^1|. \quad (11)$$

Это означает, что уже на первом шаге ($\ell = 1$) найдена такая строка $b_{i_{q,r}}^1$ в анкете $B_{q,r}^1$, которая полностью повторяет заданную структуру расщепления множества $H_{q,r}$ на два класса $H_{q,r}^0$ и $H_{q,r}^1$, а вероятности исходов всех гипотез, принадлежащих этим классам, равны 1. То есть построен оптимальный код единичной длины.

С целью сокращения вариантов перебора и уменьшения вычислительных затрат на одну итерацию значения матрицы P осреднены до уровня $\tilde{P}_t$. Эта величина является интегральной характеристикой системы измерений и в значительной степени зависит от параметров измерительной аппаратуры.

Функционально алгоритм построения стохастического БВ по критерию (1) можно описать следующим образом. Исходными данными являются мощность множества тестов $|T|$, мощность множества гипотез $|H|$, оцененное значение $\tilde{P}_t$.

Набрать анкету B и проверить её на логическую полноту. Практически для этого достаточно, чтобы в анкете не было одинаковых столбцов.

1. Положить $i_{q,r}^1 = 1$ для всех q, r .
2. Выполнить цикл ПОКА $r \leq R_k$.
3. Выполнить цикл q ОТ 1 ДО 2^r .
4. Построить в соответствии с (2.10) $G_{i_{q,r}}$.
5. Рассчитать согласно (8), (9) $P_{q,r}$.
6. Если $P_{q,r} < \varepsilon^{1/R_k-r+1}$, то увеличить $i_{q,r}$ на 1 и перейти к пункту 6.
7. Конец работы алгоритма.

Заключение

Модель учитывает множество факторов, влияющих на отказ, имеет наглядную структуру, возможность адаптации к различным типам систем.

Вместе с тем инженерные аспекты реализации метода требуют дополнительных мероприятий.

Предложенный подход, основанный на цепях Маркова и бинарном вопроснике, предлагает статистический структурированный способ моделирования накопления повреждений, позволяет реализовать многофакторную модель и отличается простотой вычислительных процедур в отличие от других, например аналитических, методов.

1. Кельберт М. Я., Сухов Ю. М. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Т. II: Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов и их приложения. М.: МЦНМО, 2009. - 585 с.: ил.
2. Богданов Дж., Козин Ф. Вероятностные модели накопления повреждений: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. - 344 с.
3. Р.С. Лучкин. Проблемы надежности в технике. Учеб. пособие – Тольятти. Изд-во ТГУ, 2013. - 106 с.
4. Аржененко А.Ю., Чугаев Б.Н. Оптимальные бинарные вопросники. – М.: Энергоатомиздат, 1989. - 128с.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ НА ТРИБОМЕТРЕ ПО СХЕМЕ ВАЛ-ВТУЛКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ АНТИФРИКЦИОННОГО СТЕКЛОЭПОКСИДНОГО МАТЕРИАЛА

Константинов Е.О., Шалюхин К.А., Коровушкин В.В.

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; egorkonst1228@yandex.ru

В статье описано экспериментальное определение коэффициента трения с использованием трибометра для моделирования условий работы опорных узлов лопаток направляющего аппарата гидротурбин. В качестве объекта исследования выступила пара трения, состоящая из стеклоэпоксидной втулки и вала из нержавеющей стали марки 12X18H10T. Представлена методика оценки износостойкости для пары трения. Также в работе приведено программное обеспечение (ПО) для автоматизации и сбора данных (LabVIEW).

Введение

В современной энергетике гидротурбины играют ключевую роль как экологически чистый и эффективный источник получения механической энергии. Особое значение в конструкции гидротурбин имеет направляющий аппарат, который не только обеспечивает подвод потока к рабочему колесу, но и регулирует расход воды в зависимости от нагрузки и скорости вращения гидроагрегата.

Надежность работы направляющего аппарата во многом определяется качеством взаимодействия его основных элементов, в частности опор лопаток [1,2].

Коэффициент трения в опорах лопаток напрямую влияет на эффективность работы всего механизма поворота направляющего аппарата. Повышенное трение приводит к увеличению энергозатрат на управление турбиной, ускоренному износу деталей и снижению точности регулирования потока воды [3].

Износостойкость материалов опор является определяющим фактором долговечности и надежности работы направляющего аппарата [4].

Для исследования процессов трения и износа в условиях, максимально приближенных к реальным, был разработан специализированный трибометр с программным обеспечением на базе LabVIEW. Данное оборудование позволяет проводить комплексное моделирование взаимодействия элементов опорного узла, определять оптимальные сочетания материалов и режимы работы, что способствует повышению эффективности и надежности гидротурбинного оборудования.

Материалы и методы

Исследования проводятся на трибометре (рис.1), моделирующем условия работы подшипника скольжения лопатки направляющего аппарата гидротурбины. Внутренний диаметр и длина наружной втулки (антифрикционный стеклоэпоксидный материал) составляют 30 мм при контактном давлении 25 МПа. Площадь контакта определялась как произведение диаметра и длины контактирующих поверхностей.



Рис. 1 Трибометр в сборе

Подробная схема стенда приведена в статье [5].

Методика эксперимента предусматривала следующие параметры: средняя скорость скольжения до 0,1 м/с, угол возвратно-вращательного движения 52°. В качестве материалов использовались: для контробразца (цапфы) — сталь марки 12X18H10T (ГОСТ 5632–2014) с шероховатостью поверхности Ra 0,8 мкм; для образца (втулки) — стеклоэпоксидный антифрикционный материал с включениями фторопласта-4, рис. 2. При необходимости возможны испытания альтернативных материалов.

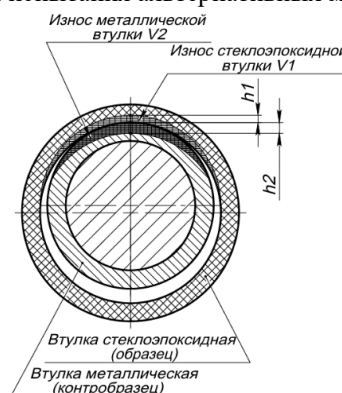


Рис. 2 Схема объемного износа образца и контробразца

Испытания проводятся при контактном давлении в диапазоне 2,5–25 МПа, с использованием воды в качестве смазочного

материала (также возможны испытания в условиях сухого трения). Испытания завершают по превышении коэффициента трения $f = 0,15$ или по достижении заданного времени испытания.

Измерение коэффициента трения $f_{тр}$ осуществляется с помощью датчика момента и системы сбора данных, а расчет производится по формуле

$$f_{тр} = \frac{T}{N \cdot r}, \quad (1)$$

где T – момент трения, Н·м;

N – сила прижима образца к контробразцу, Н;

r – радиус трения, м.

Оценка износостойкости проводится путём расчёта линейной и объёмной интенсивностей изнашивания. Линейная интенсивность изнашивания J_h определяется по формуле

$$J_h = \frac{\Delta h}{L}, \quad (2)$$

где Δh – высота изношенного слоя;

L – путь трения.

Объёмная интенсивность изнашивания J_V рассчитывается по формуле

$$J_V = \frac{V}{L}, \quad (3)$$

где V – объем исследуемого материала.

Интенсивность изнашивания по данной методике рассчитывается для образца и контробразца. Исходя из полученных интенсивностей изнашивания для образца и контробразца вычисляют износостойкость контактирующих материалов в данной паре трения.

Для проведения испытаний по вышеизложенной методике была разработана управляющая программа на графическом языке программирования LabVIEW, рис 3–4.

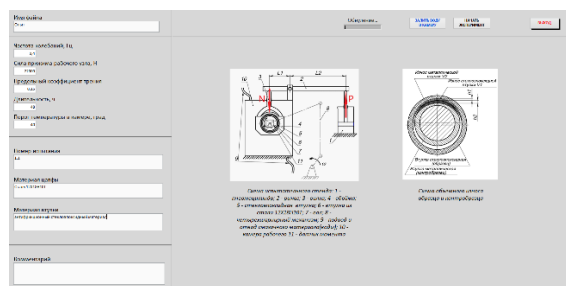


Рис. 3 Панель задания параметров испытания

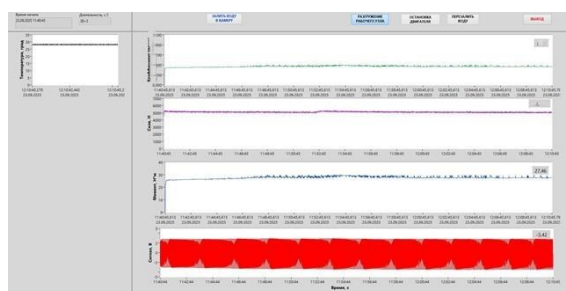


Рис. 4 Панель слежения за ходом испытания

ПО для данного трибометра позволяет собирать данные о коэффициенте трения в моделируемом узле, силе прижима узла, температуре в камере с жидкостью, уровне жидкости. Также трибометр оснащен датчиками протечки, которые позволяют автоматически останавливать испытание и сливать воду из камеры в водоотвод при аварии.

Управляющая программа также позволяет проводить тарировку датчика момента, рис. 5.

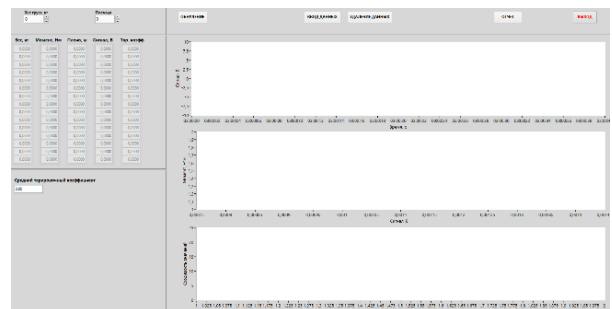


Рис. 5 Панель тарировки

Заключение

В статье описано экспериментальное определение коэффициента трения $f_{тр}$ с использованием датчика момента трибометра и формулы 1 при моделировании работы опорных узлов лопаток направляющего аппарата гидротурбин.

Показана методика расчета износостойкости исследуемой пары трения (антифрикционная стеклоэпоксидная втулка, цапфа из стали 12X18H10T) заключающаяся в определении линейной J_h и объёмной J_V интенсивностей изнашивания втулки и цапфы.

Приведен интерфейс управляющей программы, написанной на графическом языке программирования LabVIEW. Данная программа позволяет автоматизировать проведение испытаний и сбор данных.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0022.

1. Брызгалов, В. И. Гидроэлектростанции: учебное пособие / В. И. Брызгалов, Л. А. Гордон. – Красноярск: ИРЦ КГТУ, 2002. – 541 с.
2. Патент на полезную модель № 34975 U1 Российская Федерация, МПК F03B 3/18. Направляющий аппарат гидротурбин: № 2003127547/20: заявл. 16.09.2003: опубл. 20.12.2003 / А. Л. Руденко, А. И. Байков, Л. М. Данилова; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Гидроэз". – EDN XYXOEI.
3. Венисов Д.В., Стекольников С.С., Широков А.В. Автоматизация проектирования и расчета направляющего аппарата гидротурбины // Вестник Самарского университета. Естественная серия. 2021. Т. 27, № 4. С. 22–29.
4. Штерн. Е.П. Справочник по эксплуатации и ремонту гидротурбинного оборудования / Е.П. Штерн, М.И. Гальперин, А.Ф. Дмитрихин и др.; под ред. Штерн Е.П. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 368с.
5. Константинов, Е. О. Разработка машины трения для испытаний подшипников скольжения из стеклоэпоксидного антифрикционного материала / Е. О. Константинов, М. В. Прожега // Трибология - машиностроению: Труды XV Международной научно-технической конференции, Москва, 12–13 ноября 2024 года. – Москва: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2024. – С. 118-120.

ПРОГРАММНО-АПАРАТНЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ИСПЫТАНИЙ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ

Коровушкин В.В., Шалюхин К.А., Константинов Е.О.

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; korovushkin00@mail.ru

В данной работе рассматривается комплекс программных решений, использующих среду программирования LabVIEW, направленных на автоматизацию испытаний смазочных материалов в условиях трения качения. Кроме того, изложена методика проведения испытаний и выполнены теоретические расчеты коэффициента трения. Разработана система управления, обеспечивающая возможность регулирования скорости вращения двигателя, а также система сбора данных, которая осуществляет мониторинг и запись показаний измерительных приборов.

Введение

Современные технологии требуют все более точных и надежных методов испытаний материалов, особенно в таких критически важных областях, как машиностроение и автомобильная промышленность.

Смазочные материалы играют ключевую роль в снижении трения и износа, что непосредственно влияет на эффективность и долговечность механизмов. Неправильный выбор или неэффективное использование смазки может привести к серьезным последствиям. Поэтому их свойства должны быть проверены в лабораторных условиях.

В связи с этим, автоматизация процессов испытаний смазочных материалов становится актуальной задачей.

Также автоматизация может включать в себя внедрение компьютерных алгоритмов для анализа данных. Это позволяет не только ускорить процесс обработки информации, но и выявлять закономерности, которые могут быть неочевидны при ручном анализе.

Материалы и методы

Для эффективной отработки методики испытаний смазывающей способности различных пластичных смазочных материалов (ПСМ) в Институте машиноведения Российской академии наук (ИМАШ РАН) был разработан специализированный стенд. Этот стенд предназначен для проведения испытаний ПСМ на воздухе при комнатной температуре [1].

Кроме того, стенд оснащен датчиками температуры, для учета влияния нагрева подшипника во время работы на смазочные свойства ПСМ. Это критично для анализа смазывающей способности ПСМ, так как отклонения могут существенно повлиять на результаты.

Внешний вид оборудования приведен на рисунке 1.



рис. 1. Испытательное оборудование

Для проведения испытаний используется упорный шариковый подшипник качения 8104. На одно из его колец наносят фиксированное количество смазочного материала. Методика эксперимента предусматривает следующие параметры: частота вращения подшипника 50 об/мин, сила на подшипнике 2910 Н, при комнатной температуре.

Пример режима испытания на воздухе приведен в таблице 1.

Таблица 1. Режим испытания ПСМ

Параметр	Значение
Частота вращения подшипника, об/мин	50
Осевая сила на подшипник, Н	2910
Удельное давление по Герцу, ГПа	1,34
Среда	Воздух

Эксперимент завершается при резком увеличении коэффициента трения, если вышеуказанное не наблюдается, то прекращение работы наступает после 240 часов.

Измерение коэффициента трения $f_{тр}$ осуществлялось с помощью тензодатчика и системы сбора данных, а его расчет производится по формуле:

$$f_{тр} = \frac{F_{тр}}{N}, \quad (1)$$

где $F_{тр}$ – сила трения, Н;

N – сила на подшипнике, Н.

Ресурс подшипника качения, заправленного испытуемыми ПСМ, оценивался по показателю относительного ресурса (R), который вычислялся

как отношение числа оборотов (циклов) подшипника до его остановки к массе нанесенного ПСМ, измеренной в миллиграммах. [2]

$$R = \frac{n}{m}, \quad (2)$$

где n – число оборотов,
 m – масса нанесенного ПСМ, мг.

Для каждого образца ПСМ выполняется три испытания. На основании полученных результатов вычисляется среднее значение коэффициента трения и относительного ресурса.

С целью оценки противоизносных свойств была разработана методика для измерения износа колец подшипника [3]. Линейный износ определяется с использованием следующей формулы:

$$h = H_0 - H_1, \quad (3)$$

где H_1 – глубина дорожки качения после испытаний, мкм,

H_0 – глубина дорожки качения до испытаний, мкм.

Измерения глубины дорожки качения проводили в четырех сечениях колец, как показано на рисунке 1. Для определения глубины этой дорожки качения использовался лазерный интерферометр «KEYENCE»

Для реализации испытаний по описанной методике была создана управляющая программа на языке программирования LabVIEW. Графический интерфейс данной программы отображен на рисунке 2–3.

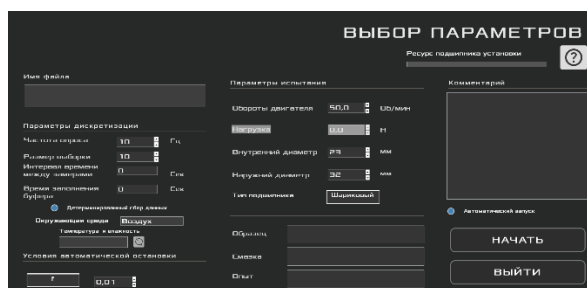


Рис. 2 Окно программы с выбором параметров испытания

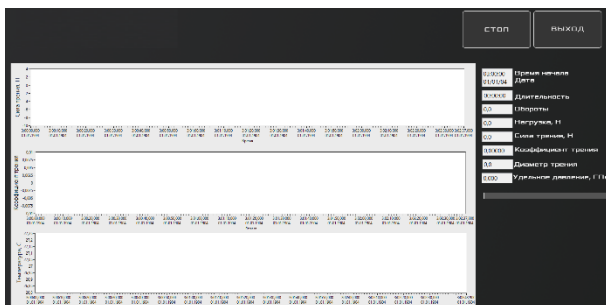


Рис. 3 Окно программы испытания

Программное обеспечение позволяет автоматически рассчитывать коэффициент трения по показаниям с датчиков и при аварийном режиме останавливать работу оборудования.

Также написана подпрограмма для тарировки

датчика силы, интерфейс которой представлен на рис. 4.

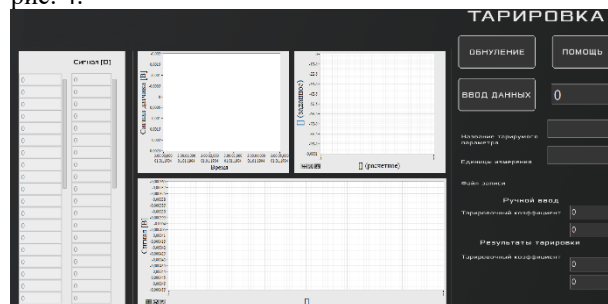


Рис. 4 Окно программы тарировки

Разработан и внедрен модуль постобработки, который позволяет выполнять обработку собранных данных, фильтровать помехи, и по результату построенных графиков создает отчет. Интерфейс модуля представлен на рис. 5.

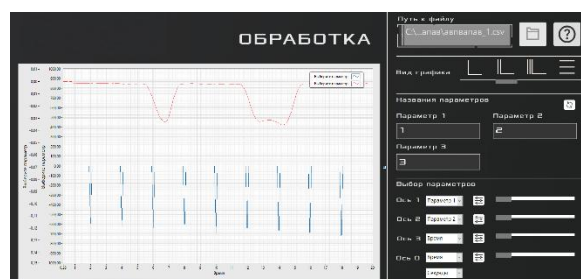


Рис. 5 Окно обработки данных

Заключение

В статье представлена методика выполнения эксперимента и вычисления коэффициента трения, а также осуществлен расчет относительного ресурса ПСМ.

Описан интерфейс управляющей программы, созданной с использованием графического языка программирования LabVIEW, которая позволяет автоматизировать процесс испытаний и сбор данных.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0022.

1. Прожега М.В., Решиков Е.О., Смирнов Н.Н. Исследование ресурса и смазочных свойств пластичных смазочных материалов для подшипников качения при работе в космических условиях. Том: 42, № 6, 2021 г., с. 660-669.
2. Исследование влияния вида трения движения на поведение противоизносных присадок / М. В. Прожега, Е. О. Константинов, Н. Н. Смирнов [и др.] // Трение и износ. – 2025. – Т. 46, № 1. – С. 5-14. – DOI 10.32864/0202-4977-2025-46-1-5-14. – EDN TSOSOS.
3. Исследование противоизносных свойств пластичных смазочных материалов в условиях трения качения и скольжения / М. В. Прожега, Е. О. Константинов, В. В. Коровушкин [и др.] // 60 лет химмотологии - основные итоги и направления развития : Сборник трудов I Всероссийской научно-технической конференции. – Москва: ФАУ "25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России", 2024. – С. 162-164. – EDN ATYLOE.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Корнеев А.А.

Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина, Москва, Россия, vso3@yandex.ru

Предлагаемые технические решения позволяют сформировать на поверхности защитные покрытия с заданными характеристиками во время технического обслуживания, ремонта или эксплуатации деталей простыми доступными для массового применения методами с использованием материалов и технических средств отечественного производства. Проведенные исследования показали высокую эффективность предложенных методов формирования композиционных покрытий.

В Российском государственном университете им. А. Н. Косыгина в течение многих лет проводятся работы по исследованию и разработке многофункциональных покрытий для деталей узлов трения и элементов конструкции технологического оборудования предприятий легкой промышленности.

Выполняемые работы в основном направлены на формирование покрытий на локальных участках рабочих поверхностей деталей, которые испытывают максимальное воздействие внешних факторов, таких как трение и (или) агрессивная среда.

Предлагаемые технические решения позволяют сформировать на поверхности защитные покрытия с заданными характеристиками во время технического обслуживания, ремонта или эксплуатации деталей простыми доступными для массового применения методами с использованием материалов и технических средств отечественного производства (рис. 1).



Рис. 1. Разрабатываемые методы формирования многофункциональных покрытий

Одно из направлений работ является создание композиционных покрытий с использованием многокомпонентных полимерных материалов холодного химического отверждения. В качестве матрицы чаще всего используются эпоксидные смолы с отвердителем. Вводимые в состав различные по размерам и структуре наполнители позволяют обеспечить необходимые эксплуатационные характеристики: твердость, износостойкость, антифрикционные или фрикционные свойства [1,2].

Толщина покрытий варьируется от нескольких десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров, в зависимости от поставленных задач.

С помощью данного метода также можно проводить работы по восстановлению первоначальных геометрических размеров деталей узлов трения или элементов конструкций технологического оборудования, таких как направляющих, желобов, поверхностей рабочих столов, рукояток инструмента, изношенных посадочных поверхностей и т.п.

Для получения полимерного покрытия на поверхности детали также можно использовать растворы фторорганических соединений, получивших название эпиламы. При испарении растворителя они способны образовать тонкую полимерную пленку, защищающую рабочую поверхность детали во время эксплуатации от износа и коррозии [3].

Введение в вышеупомянутые составы химические соединения металлов переходной валентности (медь, олово, никель, хром, серебро) позволяет реализовать во время трения деталей с этими покрытиями режим металлоплакирования, одну из форм «эффекта безызносного трения».

Для нанесения металлического покрытия на локальные участки рабочих поверхностей деталей из металла и керамики с успехом применяется технология холодного газодинамического напыления. Широкий спектр выпускаемых отечественной промышленностью металлических порошков позволяет получать покрытия с различной пористостью, толщиной и свойствами [4].

Проводимые исследования показали возможность существенного улучшения эксплуатационных характеристик деталей при совместном использовании вышеперечисленных способов нанесения покрытий.

При выполнении научных исследований было предложено использовать низкотемпературную плазму для формирования защитного полимерного покрытия на локальных участках деталей из металлических и неметаллических материалов (дерево, пластмасса, картон, ткань).

Использовались плазмотроны, в которых в качестве плазмообразующего вещества использовалась вода. Работы проводились с плазмотронами мощностью от 1,5 до 2,5 квт, что позволяло для их питания использовать обычную

электросеть.

В качестве исходных материалов использовались порошки различных полимеров, которые вводились в зону пониженной температуры струи плазмы. Поток плазмы захватывал частицы полимерного материала, доводил их до жидкого состояния и во время касания с поверхностью детали на ней образовывалось качественное покрытие. В качестве исходного материала можно использовать порошковые краски, широкая номенклатура которых выпускается отечественной промышленностью.

Для повышения износостойкости трущихся деталей был предложен метод фрикционного плакирования в технологических средах [5].

В отличие от классического метода, где в качестве инструмента использовался пруток из медного сплава (латунь, бронза), нами применялся инструмент из эластичного материала (резина, фетр). При этом противоизносное покрытие образовывалось из входящих в состав рабочей среды химических соединений металлов (медь, олово и т.п.). В некоторых узлах трения сами трущиеся детали выполняли функцию инструмента и при движении на них формировалось износостойкое покрытие (например, подшипник качения, зубчатые колеса редуктора).

Для исследования трибологических характеристик сформированных покрытий необходимо придерживаться определенной схемы исследований.

Она состоит из трех уровней. На первом уровне проводятся лабораторные испытания с применением универсальных машин трения, работающим по различным схемам испытаний. Их цель - быстро и дешево сравнить несколько разных покрытий или технологий нанесения между собой. Отсеять явно неудачные варианты и выбрать несколько наиболее перспективных вариантов. На втором уровне проводятся стендовые испытания с реальными деталями или с их точными копиями. Их цель - оценить поведение отобранных покрытий в условиях, максимально приближенных к реальным, но все еще в лабораторных условиях. Лучшие варианты используют на третьем уровне испытание. Это натурные испытания на реальном оборудовании. Их цель - окончательная проверка работы покрытия в реальном узле или механизме.

Такой подход позволяет экономить время и деньги, а также минимизировать риски в случае ошибки.

При планировании испытаний обязательно нужно учитывать тип контакта, наличие или отсутствие смазки, скорости и нагрузки в узле трения. К основным контролируемым параметрам можно отнести силу трения, износ и температуру в узле трения.

Исследования покрытий на износостойкость проводились на машине трения по схеме "блок-кольцо" (рис. 2).

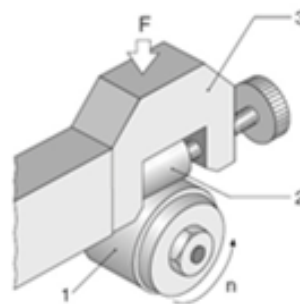


Рис. 2. Схема испытаний покрытий
1 – вращающееся кольцо; 2 – неподвижный блок; 3 – рычаг нагружения

В качестве образцов использовались вращающееся кольцо с наружным диаметром 40 мм и неподвижный блок 14x14x14 мм. Покрытия наносились в зависимости от решаемых задач либо на кольцо, либо на блок. Для смазывания (если требовалось) использовались жидкие и пластичные смазочные материалы. Испытания проводились вначале в режиме ступенчатого нагружения до появления задиров или разрушений покрытия. А далее с выявленной рабочей нагрузкой уже проводились износные испытания.

Проведенные исследования показали высокую эффективность предложенных методов формирования композиционных покрытий на рабочих поверхностях деталей из различных материалов, возможность их широкого использования на предприятиях легкой промышленности и других отраслях народного хозяйства.

1. Иванов В. А. Применение композиционных материалов при восстановлении сетевых трубопроводов / В. А. Иванов, А. Б. Тулинов // Промышленный сервис. – 2019. – № 1(70). – С. 18-23.
2. Тулинов А. Б. Применение металлополимерных композитов для устранения дефектов горного оборудования / А. Б. Тулинов, М. С. Островский, В. А. Иванов // Горное оборудование и электромеханика. – 2013. – № 3. – С. 27–31.
3. Бойко В. М. Возможности применения нанопокровтий на основе эпикамов для повышения функционального качества поверхности изделий / В.М. Бойко, Р.А. Физулаков // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – № 8(80). – С. 44–48.
4. Прокопенко А.К., Лохманов В.Н., Афанасьев В.В. Формирование поверхностных слоев деталей машин с заданными характеристиками физическими методами / Монография. - М.: ИИЦ МГУДТ, 2011. -119 с.
5. Корнеев А. А. Формирование модифицированного поверхностного слоя трущихся деталей технологического оборудования фрикционно-химическим способом / А. А. Корнеев, В. Л. Береснева // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 4: Промышленные технологии. – 2025. – № 2. – С. 26-31.

МЕХАНИЗМ IN SITU ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ТИТАНА

Корольков О.Е., Столяров В.В.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; 41zh1k@mail.ru

Обсуждается механизм воздействия импульсного тока низкой скважности в процессе пластической деформации биомедицинского крупнозернистого титана Grade 4. Выполнены механические испытания на растяжение с контролем температуры и микроструктурный анализ методом оптической микроскопии образцов, деформированных без тока и с током по схемам, отличающимся последовательностью включения/отключения тока. Один из образцов был испытан без тока после предварительного нагружения с током. Демонстрируется практически полное восстановление прочностных свойств материала, предварительно слабо деформированного с током низкой скважности, при повторном растяжении без тока. Результаты исследования могут быть использованы для формования титана при температурах ниже порога начала рекристаллизации с сохранением исходных структуры и механических свойств.

Цель

В последнее время внимание исследователей привлекает электропластический эффект (ЭПЭ), который проявляется при пластической деформации в сопровождении электрического тока [1, 2] и заключается в повышении пластичности металла при снижении усилий на процесс формоизменения заготовки. Считается, что одним из механизмов ЭПЭ является взаимодействие электронов проводимости с кристаллическими дефектами, например дислокациями, границами зерен и дисперсными частицами вторых фаз [2].

Одной из важных, но недостаточно изученных проблем является механизм структурообразования в процессе деформации, сопровождаемой током. Возникает вопрос: является ли наблюдаемое снижение напряжения течения следствием необратимого изменения структуры под действием тока или ЭПЭ обусловлен электронно-дислокационным взаимодействием, по аналогии с тепловым действием, т.е. является in situ эффектом. Важность ответа на этот вопрос связана с необходимостью достижения высокой деформируемости при сохранении исходной, специально сформированной, микроструктуры. Достаточно широко распространено мнение, что микроструктура материала не сохраняется в процессе ЭПЭ.

Целью настоящей работы было сравнительное исследование особенностей деформационного поведения и механических свойств крупнозернистого титана Grade 4 до, в процессе и после воздействия импульсного тока.

Материалы и методы

Материалом исследования был выбран технически чистый крупнозернистый титан Grade 4 в виде прутка диаметром 5 мм после отжига при 800 °C в течение 1 ч. Химический состав сплава в соответствии с сертификатом, % (мас.): 0,01 N; 0,04 C; 0,012 H; 0,42 Fe; 0,36 O; Ti – основа.

Из прутка вытачивали цилиндрические образцы с рабочей частью диаметром 2 мм и длиной 10 мм. Испытания на растяжение выполняли с использованием горизонтальной разрывной

машины ИР-5081/20 при скорости движения захвата 0,8 мм/мин ($1,3 \cdot 10^{-3}$ с $^{-1}$) в условиях комнатной температуры. Образец изолировали от захватов машины вставками из стеклотекстолита. Электрический ток подводился к образцу от генератора импульсного тока (рис. 1). Выбранные плотности тока удовлетворяли критерию возникновения ЭПЭ: $j > j_{кр}$, где $j_{кр}$ – амплитудная и критическая плотности тока [3].

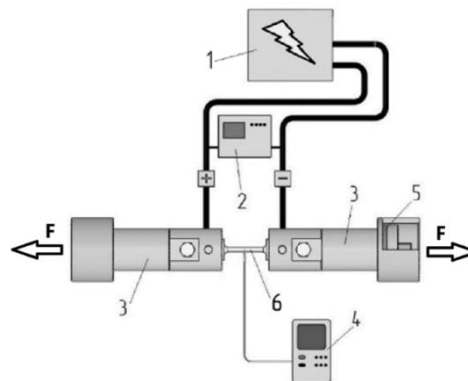


Рис. 1. Схема подключения генератора импульсного тока к захватам испытательной установки:

1 – генератор импульсного тока; 2 – осциллограф; 3 – захваты; 4 – цифровой термометр; 5 – изоляция; 6 – образец

Температуру (Т) образца в процессе растяжения контролировали по показаниям цифрового термометра UNI-T UT320 с хромель-алюмелевой термопарой с точностью $\pm 2^\circ\text{C}$, а амплитудную плотность тока, длительность импульса (τ) и скважность (Q) – с помощью цифрового осциллографа Instrustar ISDS 205A. Микроструктуру исследовали в продольном направлении в шейке и рабочей зоне образца с применением оптического микроскопа Dr. Focal RSMM-5. В этих же зонах определяли микротвердость, используя прибор MicroVicky VH1010; нагрузка на индентор составляла 0,98 Н.

Результаты и их обсуждение

Кривые напряжение–деформация, полученные при растяжении титана в различных условиях,

приведены на рис. 2. Номера кривых соответствуют номеру проводимых экспериментов.

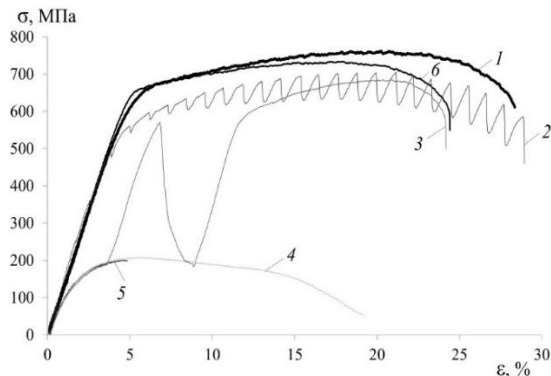


Рис. 2. Кривые напряжение–деформация: 1 – без тока, $T = 25^{\circ}\text{C}$; 2 – Пропускание единичных длинных импульсов ($j = 400$; $\tau = 1$ мс; $Q = 5000$; $T = 70^{\circ}\text{C}$); 3 – пропускание коротких импульсов ($j = 60$; $\tau = 100$ мкс; $Q = 10$; $T = 320^{\circ}\text{C}$); 4 – с током ($j = 60$; $\tau = 100$ мкс; $Q = 10$; $T = 320^{\circ}\text{C}$); 5 – с током до $\varepsilon = 4\%$ ($T = 320^{\circ}\text{C}$), далее разгрузка испытательной машины; 6 – повторное испытание образца №5 без тока, до разрушения ($T = 25^{\circ}\text{C}$)

Кривая 1, имеет типичный для отожженного технически чистого титана вид, характеризуемый наличием протяженного участка равномерного удлинения и слабого деформационного упрочнения. Механическое поведение титана при деформировании без тока принято за исходное. На кривой 2, соответствующей эксперименту 2, в котором был использован ток высокой скважности, наблюдаются типичные скачки напряжения вниз. Их амплитуда возрастает с 5 до 90 МПа по мере увеличения деформации. Наименьшая амплитуда скачков отмечена на участке упругой деформации и вызвана dilatометрическим эффектом – тепловым расширением титана [3]. На участке деформационного упрочнения причинами высокоамплитудных скачков напряжения являются образование и повышение плотности свободных дислокаций [4]. На этапе шейкообразования амплитуда скачков повышается, что обусловлено увеличением плотности тока в результате уменьшения поперечного сечения образца. После каждого снижения напряжение течения восстанавливается до значения, несколько превышающего предыдущее, что свидетельствует о деформационном упрочнении. Однако полного восстановления напряжения течения, до значений, соответствующих эксперименту 1, при этом не наблюдается. Поэтому можно полагать, что в конкуренции механизмов деформационного упрочнения и электроимпульсного разупрочнения в эксперименте 2 последние преобладают (хотя и не существенно). В эксперименте 3 (кривая 3) использовали ток низкой скважности, который вызывал повышение температуры и вводился в интервале $\varepsilon = 0-4\%$ и $\varepsilon = 7-9\%$. После обоих выключений тока (при $\varepsilon = 4$ и 7%) отмечено повышение напряжения течения на 386 МПа. Оно

снижается на такую же величину при включении тока. Общее разупрочнение сравнимо с экспериментом 2. Можно отметить, что при выключении тока при $\varepsilon = 4$ и 9% наблюдается тенденция к восстановлению исходных значений напряжения течения (см. кривые 1 и 3), при этом восстановление предела прочности составляет почти 90%. Сильное снижение напряжения течения, наблюдаемое в эксперименте 3, только частично связано с вкладом теплового эффекта тока, поскольку известно, что даже нагрев до 320°C не вызывает столь значительного снижения напряжений в титане [5]. Как показано ранее [6], снижение напряжений объясняется заметно большим вкладом ЭПЭ [5]. Изменение параметров тока не повлияло как на характер деформационного упрочнения, так и на пролонгированную стадию деформационного поведения материала в шейке. На кривой 4, соответствующей эксперименту 4 – растяжению с током низкой скважности до разрушения, отмечается короткая стадия деформационного упрочнения, вызванная быстрой локализацией деформации в шейке, на которую приходится большая часть пластической деформации. Предел прочности и относительное удлинение до разрушения снижаются относительно испытания без тока на 73 и 6% соответственно. Такое деформационное поведение отмечалось в работе [6] и является типичным для титана при испытании с током низкой скважности. В эксперименте 5 (кривая 5) – растяжение с током до $\varepsilon = 4\%$ (до начала образования шейки), после чего растяжение прекращалось, получен предел прочности, близкий к пределу прочности в эксперименте 4. Ход кривой 5 практически полностью повторяет ход кривых 3 и 4, что свидетельствует о высокой воспроизводимости условий растяжения и однородности структуры исходного образца. В эксперименте 6, являющегося по сути продолжением эксперимента 5, когда после разгрузки было проведено повторное испытание без тока до разрушения (кривая 6). По сравнению с растяжением без тока получено заметное увеличение предела текучести, незначительное снижение предела прочности (на 28 МПа) и удлинения до разрушения (на 4%) вследствие накопления предварительной малоцикловой пластической деформации, вызываемой током. Действительно, импульсный ток частотой 1000 Гц способен вызывать циклическое изменение растягивающих напряжений небольшой амплитуды и способствовать «микроусталости». Таким образом, даже с учетом предварительного деформационного упрочнения можно утверждать, что деформация с импульсным током различной скважности ($Q = 10$ и 5000) слабо или практически не влияет на прочность материала. Таким образом, из анализа деформационных кривых следует, что комбинация внешних воздействий (пластической деформации, теплового воздействия тока и потока

электронов проводимости) и их последовательность (включение-выключение) значимо влияют на напряжения течения и относительное удлинение только в процессе растяжения. Выключение тока практически полностью восстанавливает напряжения течения до уровня, соответствующего исходному состоянию. Этот факт позволяет предполагать, что при выбранных параметрах и схемах электроимпульсного воздействия при деформировании ЭПЭ проявляется *in situ* при отсутствии структурных изменений. Все режимы тока вызывают разупрочнение различной интенсивности и незначительное снижение пластичности. Наименьшее снижение прочностных характеристик без потери пластичности получено при максимальной скважности тока (эксперимент 2), а наиболее сильное снижение прочности – при минимальной скважности, максимальной температуре образца, наибольшей среднеквадратичной (эффективной) плотности тока и наибольшем времени воздействия тока (эксперимент 4).

Микроструктура (рис. 3) исходного (до растяжения) отожженного титана Grade 4 состоит из равноосных зерен средним размером 100 мкм, границы зерен преимущественно прямолинейные, большеугловые, рекристаллизационного типа. Разброс размера зерен от 50 до 200 мкм свидетельствует о сильной неоднородности зеренной структуры, связанной с незавершенностью рекристаллизации.

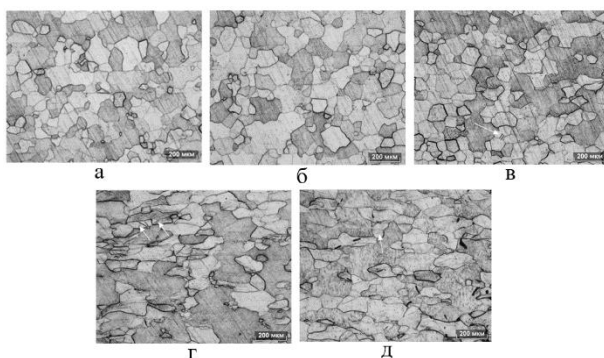


Рис. 3. Микроструктура титана Grade 4 в исходном состоянии (а) и после растяжения в рабочей зоне (б, в) и зоне разрушения (г, д): б, г – растяжение без тока (эксперимент 1); в, д – повторное растяжение без тока после предварительного нагружения с током (эксперимент 6). Двойники деформации показаны стрелками

Для установления возможных структурных изменений, вызванных электропластическим эффектом, выполнено сравнение микроструктур в рабочей зоне и зоне шейки образцов, испытанных по режимам 1 и 6. Следует отметить, что при предварительном нагружении образца в эксперименте 6 ток был выключен в момент достижения максимального напряжения течения до образования шейки. Это позволило избежать повышения плотности тока и, соответственно, температуры образца в момент образования шейки.

Установлено, что микроструктура образцов в рабочей зоне представлена равноосными зёрнами средним размером 70 и 100 мкм в случае испытания без тока (эксперимент 1) и с током (эксперимент 2), соответственно (рис. 3, б, в). В образце, деформированном в сопровождении тока, отмечается большая однородность микроструктуры по размеру зерен, в ряде зерен присутствуют редкие двойники деформации и выделения дисперсных частиц вторых фаз. Возможно, фрагментация структуры, стимулированная током, вызвана образованием малоугловых границ. В зоне разрушения этих образцов микроструктура представлена сильно деформированными, вытянутыми в направлении растяжения зёрнами (рис. 3, г, д). Наблюдаются признаки начала динамической рекристаллизации в виде мелких зерен на границах крупных зерен. В большинстве зерен образца, предварительно нагруженного с током, отмечается интенсивное образование дисперсных частиц второй фазы, которые в титане Grade 4 могут относиться к соединению Ti_2Fe . В образце, испытанном без тока, такие частицы отсутствуют.

Заключение

Анализ деформационного поведения крупнозернистого титана Grade 4 при растяжении с током и без тока позволяет заключить, что воздействие тока на снижение напряжения течения является обратимым: оно восстанавливается практически до исходного уровня при прекращении действия тока. Иными словами, механизм ЭПЭ относится к *in situ* механизму. Под действием импульсного тока происходит слабая фрагментация зерен в рабочей зоне образца. В зоне разрушения обнаружено интенсивное выделение дисперсных частиц, что сопровождается заметным повышением микротвердости.

Результаты исследования могут быть использованы для формирования титана при температурах ниже порога начала рекристаллизации с сохранением исходных структуры и механических свойств.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Научноёмкие технологии создания машин будущего» Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Москва, Россия).

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0023

1. Song Y., Wu W., Yu Y., Lin H. Effects of Electric and Magnetic Treatments on Microstructures of Solid Metals: A review // Chinese Journal of Mechanical Engineering. 2023. V. 36. Art. N 139. DOI:10.1186/s10033-023-00961-y.
2. Kim M., Yoon S., Park S., Jeong H., Park J., Kim K., Jo J., Heo T., Hong S., Cho S.H., Kwon Y., Choi I., Kim M., Han H.N. Elucidating the origin of electroplasticity in metallic materials // Applied Materials Today. 2020. V. 21. Art. N 100874. DOI:

- 10.1016/j.apmt.2020.100874.
3. Conrad H. Electroplasticity in metals and ceramics // *Materials Science and Engineering*. 2000. V. 287. I. 2. P. 276–287. DOI: 10.1016/S0921-5093(00)00786-3.
4. Ruskiewicz B.J., Grimm T., Ragai L., Mears L., Roth J.T. A review of electrically-assisted manufacturing with emphasis on modeling and understanding of the electroplastic effect // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2017. V. 139. Is. 11. Art. N 110801. DOI: 10.1115/1.4036716.
5. Titanium Alloys – Physical Properties // *AZO Materials* [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1341> (дата обращения: 25.07.2025).
6. Korolkov O. E., Pakhomov M. A., Stolyarov V.V. The electroplastic effect in titanium alloys under tension // *Inorganic Materials*. 2023. V. 59. N 15. P. 92–100. DOI: 10.1134/S0020168523150050

ПРИНЦИП НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ И ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

Короткевич С.В.^{1*}, Буяновский И.А.², Плескачевский Ю.М.³

Е-mail: korotsv@tut.by

¹ РУП «Гомельэнерго», г. Гомель, РБ

² [ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, г. Москва, РФ](#)

³ [БелГУТ, г. Гомель, РБ](#)

Показано использование принципа наименьшего действия, инвариантных критериев и цифровых технологий в машиностроении.

Введение

Простота и ясность понимания сущности, рассматриваемой проблемы, являются основными понятиями, проходящие красной линией в процессе мышления человека разумного (*homo sapiens* – HS) [1]. Искусственный интеллект (ИИ) является инструментом, который позволяет сократить время и энергозатраты HS для решения конкретной задачи. Минимум совершения работы для достижения цели или количество операций в единицу времени – мощность ИИ. Таким образом, приходим к принципу наименьшего действия (ПНД) и, или энергетической выгоды (ЭВ). С другой стороны, свойства симметрии пространственно-временного континуума, определяет существование инвариантов из принципа наименьшего действия в процессах, протекающих в физике, биологии, химии, медицине и т.д. [2]. Тогда ПНД и наличие инвариантов должны быть фундаментом развития, в том числе и в ИИ. Решение задач с использованием кубитов в квантовом компьютере экономит время и энергозатраты, так как на их решение с использованием битов и серверов требуется сотни лет [3]. Моделирование сильнонеравновесных состояний, наблюдаемых при длительном трибонагружении (рис. 1, область III), с использованием лагранжевого формализма или конфигурационного интеграла для систем, состоящих из атомов приповерхностного слоя металла толщиной до сотни мкм, возможно только с использованием квантового компьютера. Квантовый компьютер – система, состоящая на сегодняшний день из десятков (50) и тысяч (5000) атомов, находящихся в определённых, как правило, криогенных условиях для снижения различных внешних воздействий и шумов. ПНД является фундаментальным принципом, описывающим, как кинетику структурных преобразований поверхности металлов при локализованном внешнем воздействии трибонагружением [4], так и квантовые системы. Например, принцип неопределённости Гейзенберга [5]. Вместе с тем последнее не подменяет применение принципа суперпозиции, квантовой неупорядоченности и т.д. [3]. ПНД или принцип Ферма используется для определения пути передачи цифровых пакетов с минимальными временными затратами в области

связи и в цифровых технологиях построения корпоративных сетей передачи данных (например на основе технологии SD-WAN (самонастраиваемых сетей)). В таком случае нас ждут открытия, обусловленные наличием инвариантов и в области цифровых технологий. Осталось осознать, что под этим понимать в области ИИ и цифровых технологий. Главное для HS не потерять красную нить, а именно: простоту и ясность мышления, так как это основные правила для руководства ума [6].

Целью настоящей работы является использование ПНД и цифровых технологий для разработки инвариантных критериев, управления и прогнозирования ресурса эксплуатации узлов трения.

Материалы и методы. Материалы и методы исследований описаны в работе [4].

Результаты

Приведём примеры разработанных инвариантных критериев в трибологии, с которыми может работать ИИ для расчёта и прогнозирования ресурса эксплуатации узлов трения, например, опор качения и скольжения.

Пример 1. Определена асимметричная кинетическая зависимость между плотностью дислокаций и интенсивностью изнашивания [4]. Увеличение плотности дислокаций до некоторого критического значения обуславливает упрочнение поверхностного слоя, что определяет снижение интенсивности разрушения. Последнее справедливо для каждого из структурно-масштабных уровней деформации: нано, микро-, мезо- и макроуровня поверхностного слоя никеля. Выполняется соотношение [4]:

$$\rho \cdot I_v = \text{const} \quad (1)$$

где ρ – плотность дислокаций, I_v – объёмная интенсивность изнашивания, $\text{const} \geq 0$ и зависит от времени, что обусловлено, в том числе и процессом подмазывания через 360 с зоны сопряжения трущейся пары (никель–молибден). Данный критерий справедлив для каждого цикла изменения прочностных характеристик и интенсивности изнашивания. Интенсивность изнашивания, приведенная на рис. 1, определяется через параметр

I_V из соотношения:

$$I_V = I \cdot 1 / \rho_{Ni}, \quad (2)$$

где ρ_{Ni} – плотность никеля. Приведём значение коэффициента $1/\rho_{Ni}=1,12 \cdot 10^{-4}$. Очевидно, что вид установленной экспериментально зависимости I от времени (t), приведенный на рисунке в работе [7] будет иметь точно такой же вид и для зависимости $I_V(t)$ рис. 1. Для убедительности и наглядности представления результатов показана зависимость $I(t)$, так как значения в зависимости $I_V(t)$ на четыре порядка меньше. Зависимость $I_V(t)$ точно так же как и зависимость $I(t)$ асимметрична кинетической зависимости плотности дислокаций от времени.

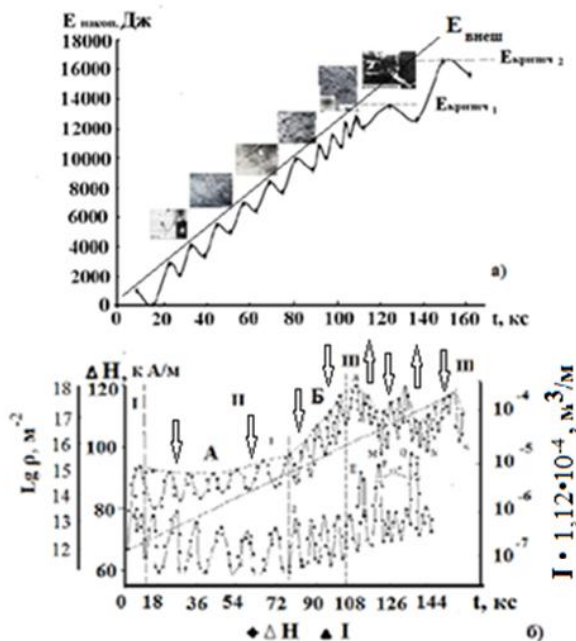


Рис. 1. Кинетика структурных изменений поверхностного слоя никеля при трибонагружении: а) – зависимость энергии внешнего воздействия $E_{внеш}$ и накопленной энергии $E_{накоп}$ от времени t ($E_{критич 1}$ и $E_{критич 2}$ – значения критической энергии для разрушения мезо- и макроуровня деформации); б) – зависимость уширения линии ФМР ΔH , плотности дислокаций ρ и объемной интенсивности изнашивания I_v от времени трибонагружения t

Инвариантный критерий описывает взаимосвязь прочностных характеристик и изнашивания, при котором увеличение плотности дислокаций и наклёп поверхности происходит до некоторой критической величины, после которой наступает процесс разрушения. Затем наклёп поверхности повторяется с уже нижележащим подповерхностным слоем. Наблюдается локализованный во времени циклический характер упрочнения и разрушения поверхностного слоя металлов. Имеет место экспериментальное подтверждение лепестковой модели разрушения для металлов при трибонагружении с точки зрения дислокационных представлений (рис. 1). [4].

Пример 2. На основе анализа экспериментальных данных воздействия нагрузочно-скоростных параметров на поверхность

металлов (границный смазочные слои (ГСС) различной функциональной природы, оксидные пленки, адсорбированная влага и т.д.) с использованием метода электрофизического зондирования разработан инвариантный критерий оценки состояния поверхности [4].

Выделяются следующие режимы состояния поверхности:

2.1. Самоорганизация поверхности раздела: $R_c/R_{ок} \gg 1$. Имеет место увеличение плотности дислокаций и упрочнение поверхности. Для ГСС данный режим наступает в области фактического давления до ≈ 35 МПа и характеризуется изменением вида связи молекул ГСС с поверхностью – переходом от физической адсорбции к более прочной хемосорбции. Изменение структуры ГСС сопровождается его утолщением и, как следствие, ростом уровня R_c . Формируется высокоразвитый рельеф поверхности металла, что приводит к уменьшению площади фактического контакта и увеличению R_c . Состояние поверхности раздела характеризуется отношением регистрируемого R_c к $R_{ок}$ – сопротивлению исходной металлической поверхности (без смазки в начальный момент времени трибонагружения) с учетом оксидной пленки. Это отношение намного больше единицы.

2.2. Динамическое равновесие поверхности раздела: $R_c/R_{ок} > 1$. В процессе формирования и механического разрушения поверхности раздела с течением времени формируется характерный для динамического равновесия оптимальный рельеф (класс шероховатости) с гофрированием поверхности металла. В этом случае толщина ГСС за счет его изнашивания несколько уменьшается по сравнению с первым режимом, но полимолекулярная структура слоя сохраняется. Для данного режима отношение $R_c/R_{ок}$ больше единицы.

2.3. Начало разрушения поверхности раздела: $R_c/R_{ок} \approx 1$. Комплекс физико-химических процессов (механо- и термодеструкция, формирование критической структуры и др.) обуславливает снижение R_c ввиду начала разрушения поверхности металла и ГСС. Можно предположить, что мономолекулярная составляющая слоя $\approx 0,5$ нм (размер поперечного сечения молекул углеводородов) сохраняется. Ввиду того что величина $R_{ок}$ соизмерима с величиной туннельной проводимости для данной толщины слоя, отношение $R_c/R_{ок}$ принимает значение порядка единицы.

2.4. Разрушение поверхности раздела (или режим с обострением, характерный, например, для селективного механизма разрушения): $R_c/R_{ок} < 1$.

Для данного режима характерно снижение регистрируемого R_c до уровня сопротивления стягивания (R_s). Отношение R_c к $R_{ок}$ становится меньше единицы. Таким образом, разработанный инвариантный критерий для оценки состояния

поверхности при динамическом нагружении узлов трения имеет вид:

$$R_c/R_{ок} >>; >; \approx; <1, \quad (3)$$

где знак «>>», «>», «≈», «<» означает окончание одного и наступление другого режима состояния ГСС и сопряжённых поверхностей металлов.

Для моделирования и прогнозирования ресурса эксплуатации узлов трения используется теоретико-инвариантный метод и соотношение [8, 9]:

$$I_h = k\Phi_a^\alpha \Phi^b \Phi_y^c \Phi_{ш}^d \quad (4)$$

где множители характеризуют:

$\Phi_a^\alpha \approx f(p/HB)$ – площадь фактического контакта;

$\Phi^b \approx h/\zeta$ – относительную толщину смазочного слоя (h – толщина смазочного слоя, ζ – размер режущей абразивной частицы); $\Phi_y^c \approx \theta p/\sigma_0$ – усталостную прочность (θ – коэффициент, зависящий от коэффициента трения скольжения и напряженного состояния в контакте, p – нормальное напряжение сжатия, σ_0 – предел усталости материала при трении); $\Phi_{ш}^d \approx R_{max}/r_{ш} b_{ш}^{1/v_{ш}}$ – шероховатость в контакте (R_{max} – наибольшая высота неровностей, $r_{ш}$ – приведенный радиус неровностей, $b_{ш}$ и $v_{ш}$ – параметры опорной кривой).

Необходимо отметить, что обобщенные физические параметры изменяются в процессе фрикционного нагружения, то есть во времени. Тем не менее, по сути, они выполняют роль инвариантов (безразмерных физических величин, определяемых через отношение параметров).

Таким образом, теоретико-инвариантный метод, выраженный соотношением (5), необходимо дополнить еще двумя обобщенными параметрами:

Φ_p^e – характеризует наступление селективного механизма разрушения, при котором плотность дислокаций достигает максимального значения (для никеля $\rho \approx 10^{18} \text{ м}^{-2}$), наиболее опасного с инженерной точки зрения из-за увеличения интенсивности изнашивания на два-три порядка [5]. Индекс p обозначает наступление разрушения поверхности. Математически Φ_p^e выражается соотношением (1);

$\Phi_{ш}^f$ – характеризует состояние СМП. Индекс $ш$ обозначает поверхность. Математически $\Phi_{ш}^f$ выражается соотношением (3), умноженным на некоторый коэффициент, определяемый экспериментально в зависимости от режима состояния поверхности. Иными словами, справедливо выражение:

$$I_h = k\Phi_a^\alpha \Phi^b \Phi_y^c \Phi_{ш}^d \Phi_p^e \Phi_{ш}^f \quad (5)$$

По мере развития теоретико-инвариантного метода в отношении (5) будут вводиться новые обобщенные параметры (множители).

Заключение

Принцип наименьшего действия и разработанные инвариантные критерии могут лечь в основу развития теоретико-инвариантных подходов, позволяющих классифицировать и систематизировать, получаемую в ходе мониторинга, информацию для создания и анализа экспериментальной базы данных в области исследования поверхности раздела. Последнее позволит прогнозировать ресурс эксплуатации узлов трения, повысит надёжность управления режимами работы опор качения и скольжения непосредственно при их динамическом нагружении.

1. Павлов, И.П. Об уме вообще, о русском уме в частности / И.П. Павлов // Вестник практической психологии образования. – 2009. – № 3. – С. 12–16.
2. Ландау Л. Д. Теоретическая физика в десяти томах. Т. 1 Механика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука. – 1988. – 215 с.
3. Квантовый компьютер. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org>. – Дата доступа. 12.09.2025.
4. Короткевич, С.В. Физика принципа наименьшего действия и энергетической выгодности / С.В. Короткевич // Перспективные материалы и технологии / А. Г. Анисович [и др.], под. ред. В.В. Рубаника. – Мн.: Изд. «ИВЦ Минфина», 2025, 443 с.
5. Киттель, Ч. Квантовая теория твёрдых тел. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1967. – 492 с.
6. Декарт, Р. Правила для руководства ума / Р. Декарт. – Сочинения в 2-х томах. – Т.1. – М.: Изд. «Мысль», 1989.
7. Короткевич С.В. Автореферат диссертации на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 «Структурно-масштабные уровни деформации и свойства границ раздела в металлах» / Короткевич С.В. – Минск: БГУ, 2021. – 54 с.
8. Дроздов Ю. Н., Юдин Е. Г., Белов А. И. Прикладная трибология (трение, износ, смазка) // М.: Эко-Пресс, 2010. 604 с.
9. Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники: учебник // М.: ИНФРА-М, 2014. 336

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ КАЧЕНИЯ

Кравченко И.Н.¹, Жачкин С.Ю.², Трифонов Г.И.², Котов А.П.²

*E-mail: kravchenko-in71@yandex.ru

¹ Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

² ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия

В работе представлены результаты исследований, направленных на разработку нового метода определения коэффициента трения качения. Изучены существующие подходы к измерению этого параметра и выявлены их технические недостатки. Описан разработанный способ, обеспечивающий более высокую точность определения коэффициента трения качения. Проведена апробация метода на трех образцах, изготовленных из различных металлических сплавов. На основе полученных данных сделаны выводы и сформулированы рекомендации.

Введение

В рамках исследования проведен анализ существующих способов определения коэффициента трения качения, который является одним из ключевых параметров в механике деформируемого твердого тела и широко применяется в различных отраслях промышленности. Особое внимание уделено современным подходам к экспериментальному и теоретическому исследованию данного параметра.

Коэффициент трения качения представляет собой физическую величину, характеризующую сопротивление, возникающее при движении одного тела по поверхности другого с качением [1, 2]. Этот параметр играет большую роль в проектировании и эксплуатации различных механизмов и устройств, таких как колеса транспортных средств, подшипники, зубчатые передачи и другие механизмы, где минимизация трения является важной задачей.

Известно, что для определения коэффициента трения качения применяются различные экспериментальные методы [3, 4]. Помимо экспериментальных методов широко используются теоретические модели и численные методы, позволяющие учитывать различные факторы, влияющие на трение, такие как микроструктура поверхностей, свойства материалов, наличие смазочных материалов и ряд других параметров.

Кроме того, отметим, что одним из перспективных направлений развития способов определения коэффициента трения качения является использование методов молекулярной динамики и компьютерного моделирования [5, 6], которые с большой точностью учитывают сложные физические процессы, происходящие при трении.

Опираясь на сказанное выше, можно с уверенностью утверждать, что определение коэффициента трения качения является актуальной областью научных исследований, требует комплексного подхода и использования современных методов и технологий.

Целью исследования является разработка нового способа измерения коэффициента трения

качения, который будет характеризовать более высокую степень определения при заданных нагрузках.

Материалы и методы исследования

Существуют различные способы и устройства для определения коэффициента трения качения:

способ определения коэффициента трения качения [3], при котором наклоняют исследуемую площадку, по ней спускают из состояния покоя исследуемый цилиндр, измеряют радиус цилиндра, угол наклона площадки, записывают уравнения и подставляют в уравнения измеренные величины. При этом способе дополнительно измеряют расстояние и время движения, а также записывают уравнения, вытекающие из принципа Даламбера [7];

способ определения коэффициентов трения качения и сопротивления качению [4], включающий операции размещения испытуемого пневматического колеса на горизонтальном твердом покрытии, а также фиксации деформации пневматической части колеса.

Однако представленные способы обеспечивают существенный недостаток, приводящий к низкой точности определения коэффициента трения качения. Этот недостаток обусловлен несоответствием условий проведения измерений реальным эксплуатационным параметрам исследуемых объектов. Такое несоответствие может привести к искажению результатов, что, в свою очередь, может повлечь за собой некорректные выводы относительно эксплуатационных характеристик объекта исследования.

Учитывая данный технический недостаток, коллективом авторов в лабораторных условиях разработан новый способ по определению коэффициента трения качения.

Принцип реализации способа заключается в закреплении контртела на токарном станке и его фиксации для предотвращения угловых смещений. Образец устанавливается с возможностью свободного вращения вокруг оси и подвергается нагрузке через первую винтовую передачу,

оснащенную подшипниковым узлом и динамометрическим ключом, которая размещается в задней бабке станка. При перемещении образца вдоль оси с помощью второй винтовой передачи, установленной в суппорте, производится расчет силы, действующей на образец. Полученные данные используются для определения коэффициента трения качения.

В данной работе авторами проведена апробация данного способа, которая заключалась в измерении коэффициента трения качения для трех образцов:

- втулка из сплава МГр90/3;
- втулка из бронзы БрО10Ф1;
- втулка из бронзы БрАЖ9-4.

Измерения проводились до разрушения тела, или значительных пластических деформаций.

Базовой основой для осуществления способа являлся станок ТВ-4. Контртело устанавливали в патрон станка, после чего шпиндель станка блокировался, во избежание углового проворота. Нагружение испытываемых образцов производилось винтовой парой, размещенной в задней бабке станка, а величина нагружения задавалась динамометрическим ключом стрелочного типа. Следует отметить, что подшипниковый узел винтовой пары позволил производить нагружение образцов, обеспечивая при этом возможность линейного перемещения вдоль оси второй винтовой пары. Затем при перемещении образцов вдоль оси второй винтовой передачи, расположенной в суппорте станка, измеряли силу N , приложенную к образцу:

$$N = \frac{2M_k}{d \operatorname{tg}(\beta + \varphi)}, \quad (1)$$

где M_k – крутящий момент, прилагаемый к динамометрическому ключу, Нм; d – средний диаметр резьбы второй винтовой пары, м; β – угол подъема винтовой линии; φ – угол трения.

Далее, используя значения силы N и текущего крутящего момента трения $M_{\text{тр}}$ между образцом и контртелом, получаемым с помощью показаний динамометрического ключа, определяли коэффициент трения качения:

$$k = \frac{M_{\text{тр}} d \operatorname{tg}(\beta + \varphi)}{2M_k}. \quad (2)$$

На основании полученных аналитических зависимостей и проведенных экспериментов выявлена зависимость: с увеличением давления возрастает коэффициент трения. При этом прослеживается тенденция зависимости к гиперболической функции. График зависимости коэффициента трения от удельного давления представлен на рис. 1.

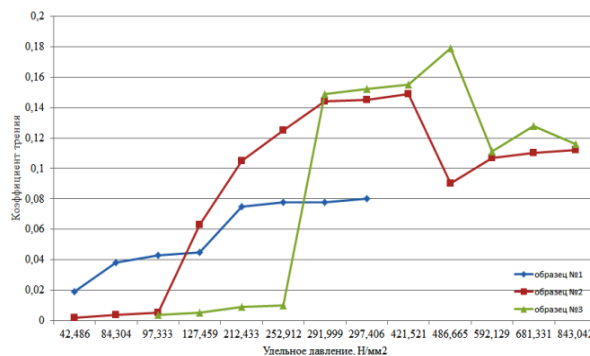


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от давления

Результаты анализа исследований (см. рис. 1) позволили выявить существенные различия в эксплуатационных характеристиках исследуемых образцов.

Образец №1 демонстрирует более стабильные показатели трения по сравнению с образцами №2 и №3, что обусловлено наличием графита, функционирующего в качестве твердой смазки. В образцах №2 и №3, где отсутствует графитовая добавка, наблюдается значительное увеличение коэффициента трения качения, что свидетельствует о дефиците смазочного материала.

Образец №1 демонстрирует высокую стабильность коэффициента трения, однако его хрупкая структура ограничивает способность выдерживать значительные давления. Напротив, образец №2, обладая высокой пластичностью, способен воспринимать значительные удельные нагрузки, но при этом характеризуется нестабильностью коэффициента трения.

Образец №3 показал оптимальные значения коэффициента трения, при этом характер изменения коэффициента трения у образца №3 аналогичен образцу №2.

Кроме того, проводились испытания на трение с изменением скорости скольжения [8, 9]. Результаты проведенных измерений и тщательного визуального анализа (рис. 2) свидетельствуют о том, что в случае образцов №1 и №3 поверхности трения подверглись процессу адаптации в ходе испытаний, что выразилось в замедленном переносе материала с контртела на испытываемое тело (вал).

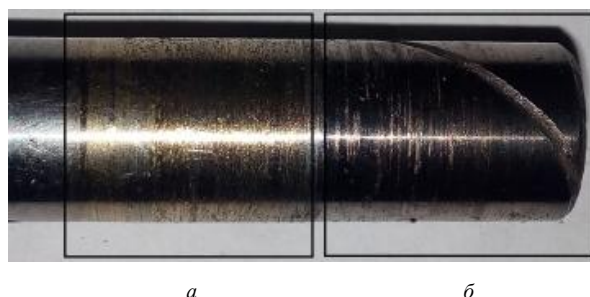


Рис. 2. Контртело после испытаний на трение:
а – образец №2; б – образец №1

Образец №2 продемонстрировал anomальное

поведение, проявляющееся в формировании задиров на поверхности трения и интенсификации процесса переноса материала с контртела на испытуемое тело. Эти наблюдения позволяют сделать вывод о существенном различии в механизме фрикционного взаимодействия между образцами, что требует дальнейшего детального исследования для выявления факторов, влияющих на эти процессы.

Заключение

1. В рамках исследования представлен анализ существующих способов по определению коэффициента трения качения и сделаны выводы об их существующих технических недостатках.

2. Разработан новый способ, отличающийся повышенной точностью определения коэффициента трения качения.

3. Проведена апробация предложенного способа, при которой исследовались три образца из различных сплавов. Определено, что из трех исследованных образцов при заданных нагрузках и условиях эксплуатации возможны пары трения стали 40Х и бронза БрАЖ9-4.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2025-0002.

1. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 528 с.

2. Тюрин С.А. Сравнительное исследование коэффициентов трения при качении и контактно-механической усталости / С.А. Тюрин, С.С. Щербаков, Л.А. Сосновский // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2005. Т. 71. № 2. С. 48–51.
3. Патент RU № 94017999, МПК G 01 М 17/00. Способ определения коэффициента трения качения / А.В. Шаров, В.Н. Надеждин, К.А. Косов. Заявл. 17.05. 1994. Оpubл. 20.03.1996.
4. Патент RU № 2467308, МПК G 01 N 19/02 Способ определения коэффициентов трения качения и сопротивлению качению / П.К. Плотников. № 2011131330/28. Заявл. 26.07.2011. Оpubл. 20.11.2012. Бюл. № 32.
5. Александров Е.Б. Сравнительный анализ различных компьютерных реализаций моделей трения в динамике систем тела / Е.Б. Александров, И.К. Гусев // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2010. № 4. Т. 6. С. 44–50.
6. Тихомиров В.П. Модель контакта и оценка молекулярной составляющей силы трения / В.П. Тихомиров, М.Г. Шалыгин, М.А. Измеров // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 6 (144). С. 20–27. DOI: 10.30987/2223-4608-2023-20-27
7. Живаго Э.Я. Решение технических задач с использованием принципа Даламбера / Э.Я. Живаго, Н.И. Михайленко // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2015. № 3 (13). С. 22–29.
8. Жачкин С.Ю. Разработка алгоритма оценки физико-механических показателей износостойкости пар сухого трения опорно-поворотного устройства воздушного судна / С.Ю. Жачкин, Г.И. Трифионов, А.В. Бакуменко // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2019. № 12. С. 194–206.
9. Быков П.А. Влияние дисперсных наполнителей на изнашивание алюмоматричных композиционных материалов / П.А. Быков, Л.И. Кобелева, И.Е. Калашников, Т.А. Чернышова // Материаловедение. 2011. № 3. С. 27–33.

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В АГРОИНЖЕНЕРИИ: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Кравченко И.Н.¹, Феськов С.А.², Артемьева А.Д.¹, Аноприенко А.К.¹, Куцова С.С.²

¹ Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН; Москва, Россия; kravchenko-in71@yandex.ru

² Брянский государственный аграрный университет, Брянск, Россия; feskovwork@gmail.com

В статье рассматриваются современные подходы к созданию цифровых двойников в агроинженерии, применяемых для оценки ресурса и износа рабочих органов сельскохозяйственной техники. Особое внимание уделено имитационному моделированию и интеграции методов искусственного интеллекта. Определены ключевые направления дальнейших исследований в области цифровизации агротехники.

Цель – обобщение и систематизация современных подходов к построению цифровых двойников в агроинженерии с акцентом на оценку износа, прогнозирование ресурса и повышения адаптивности конструкций машин.

Введение

Надежность рабочих органов сельскохозяйственной техники напрямую влияет на эффективность агропроизводства [1]. Износ деталей, работающих в абразивной почвенной среде, приводит к снижению качества обработки и росту эксплуатационных затрат [2]. Традиционные методы оценки ресурса и технического состояния таких компонентов часто не учитывают реальных условий эксплуатации и динамики нагрузок [3].

В последние годы внимание исследователей привлекает концепция цифрового двойника — виртуальной модели, отражающей структуру, поведение и износ реального объекта в процессе эксплуатации [4, 5]. В таких отраслях, как авиация, энергетика и промышленное машиностроение, подобные модели доказали свою эффективность для прогнозирования отказов, оптимизации конструкций и сопровождения изделий на протяжении жизненного цикла [6].

В агроинженерии цифровые двойники применяются пока фрагментарно [7]. Наиболее перспективными являются задачи, связанные с моделированием абразивного износа, динамометрическим контролем нагрузок, прогнозированием ресурса и выбором материалов [8]. Интеграция методов машинного обучения и сенсорных систем позволяет перейти от эмпирических наблюдений к предиктивной аналитике, что особенно актуально в условиях высокой вариативности почвенных факторов [9].

Материалы и методы исследования

Для обобщения современных подходов к построению цифровых двойников в агроинженерии проведен анализ научных публикаций, охватывающих период с 2017 по 2025 гг. [10–14]. Рассматривались работы, посвященные виртуальному моделированию, абразивному износу, испытаниям почвообрабатывающих деталей и применению искусственного интеллекта в технической диагностике. В обзор включены

отечественные и зарубежные источники, отражающие как теоретические модели, так и практические наработки.

Цифровой двойник в данном контексте трактуется как интеграция имитационных алгоритмов, полевых измерений и адаптивных моделей, позволяющих воспроизводить поведение физического объекта в условиях эксплуатации. В процессе анализа выделено четыре ключевых научно-методических направления, формирующих структуру цифровых двойников рабочих органов, представленных ниже.

1. Имитационные испытания

Используются лабораторные установки с абразивной средой, имитирующей реальные условия трения. На основе закона Амонтона–Кулона формируются карты распределения нагрузок и определяются зоны риска повышенного износа. Такие модели позволяют ускоренно исследовать поведение детали в контролируемых условиях.

2. Натурные измерения

Полевые динамометрические испытания позволяют зафиксировать пространственные характеристики нагрузок на рабочие органы в реальных условиях. С применением тензометрии определяются векторы и моменты сил, действующих на элементы машин, что уточняет параметры цифровой модели.

3. Учет свойств почвы и материалов

В модели включаются физико-механические характеристики почвы (влажность, гранулометрия, абразивность) и свойства материала детали (твердость, износостойкость, наличие упрочняющих покрытий). При этом используются номограммы, связывающие тип почвы с выбором оптимального материала.

4. Прогнозирование ресурса

С использованием данных о нагрузках и геометрии износа формируются карты интенсивности изнашивания, и рассчитывается остаточный ресурс детали. На этом этапе возможна интеграция искусственного интеллекта (табл. 1): регрессионные модели, нейронные сети и анализ временных рядов повышают точность предсказаний.

Результаты и обсуждение

Анализ современных публикаций показывает, что наибольшее развитие в агроинженерии получили имитационные модели абразивного износа и полевые методы динамометрирования рабочих органов.

Таблица 1. Основные подходы к построению цифровых двойников в агроинженерии

Подход	Краткое описание
Имитационные испытания	Лабораторное моделирование трения и износа, построение карт нагрузок.
Натурные измерения	Полевые динамометрические испытания с фиксацией нагрузок и моментов.
Свойства почвы и материалов	Учет абразивности, влажности почвы и износостойкости материала детали.
Прогнозирование ресурса	Построение карт износа, расчет остаточного ресурса, применение ИИ.

Данные направления обеспечивают базовую структуру цифрового двойника и позволяют учитывать нагрузки и геометрию изнашиваемых деталей. Тем не менее, полученные модели часто требуют индивидуальной калибровки и не всегда обладают универсальностью при смене типа почвы или режима эксплуатации.

Существенную роль играет блок, связанный с учетом свойств почвы и материалов. На практике это позволяет адаптировать модель под конкретные условия, выбирать технологию упрочнения и формировать карту применимости материалов. Однако здесь сохраняется высокая зависимость от локальных почвенных факторов, что затрудняет стандартизацию подхода.

Интеграция цифровых двойников с системами мониторинга и искусственным интеллектом пока находится на начальной стадии. В ряде публикаций рассматриваются нейросетевые алгоритмы и методы временных рядов, однако большая часть моделей требует значительных объемов обучающих данных, которые сложно собрать в сельскохозяйственной отрасли.

К основным ограничениям на текущем этапе можно отнести:

- отсутствие отраслевых стандартов на цифровые модели в сельхозмашиностроении;
- высокую вариативность почвенных условий;
- недостаточную автоматизацию сбора и анализа эксплуатационных данных.

Несмотря на это, цифровые двойники представляют собой перспективный инструмент для повышения долговечности рабочих органов, снижения затрат на замену и ремонта, а также принятия инженерных решений в процессе проектирования сельскохозяйственной техники.

Заключение

Проведенный обзор показал, что технология цифровых двойников обладает высоким потенциалом применения в агроинженерии, в частности для оценки ресурса и износа рабочих органов почвообрабатывающих машин. Наиболее развиты направления, связанные с имитационным моделированием, полевыми нагрузочными испытаниями и выбором материалов с учетом почвенных условий.

Установлено, что включение цифровых моделей в процесс проектирования и эксплуатации позволяет повысить точность прогноза ресурса и принимать обоснованные инженерные решения. Интеграция методов искусственного интеллекта открывает перспективы перехода от статических схем к динамическому обновлению цифровых двойников в режиме реального времени.

Ограничениями остаются необходимость стандартизации подходов, дефицит эксплуатационных данных и высокая вариативность почвенных условий. В дальнейшем целесообразно сосредоточить усилия на унификации методик и разработке цифровых платформ, адаптированных к задачам сельскохозяйственного машиностроения.

Финансирование работы

Работа финансировалась за счет средств федерального бюджета в рамках FFGU-2024-0024 по результатам исследований, выполненных с использованием оборудования ЦКП ИМАШ РАН.

1. Алехин Е.А., Токарев К.В., Гончаренко В.В. Износ рабочих органов почвообрабатывающих орудий: причины, последствия и пути решения // Профессия инженер. Сборник статей XIII Всероссийской молодежной научно-практической конференции, посвященной 80-летию Победы в Великой отечественной войне. Орел, 2025. С. 9–12.
2. Миронов Д.А. Технологические методы повышения ресурса и работоспособности быстроизнашиваемых рабочих органов // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2021. Т. 68. № 4 (45). С. 118–123.
3. Михальченко А.М., Феськов С.А. Повышение долговечности деталей рабочих органов почвообрабатывающих орудий импортного производства (опыт Брянского ГАУ) // Вестник Брянской ГСХА. 2023. № 2 (96). С. 62–68.
4. Савраскина А.С. Цифровые двойники: современный способ мониторинга систем и процессов // Вызовы цифровой экономики: импортозамещение и стратегические приоритеты развития. Сборник статей V Юбилейной Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. Брянск, 2022. С. 672–676.
5. Черномаз О.А., Куприянова И.А. Цифровые двойники: преимущества и недостатки // Решетневские чтения. Материалы XXV Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х частях. Под общей редакцией Ю.Ю. Логинова. Красноярск, 2021. С. 178–179.
6. Осмонбаев М.Б. Цифровые двойники: прошлое, настоящее и будущее // Цифровизация в социально-экономических системах. Сборник статей II-й научно-практической конференции. Москва, 2025. С. 106–111.

7. Бутовченко А.В. Использование цифровых технологий при моделировании сельскохозяйственных процессов // Актуальные проблемы науки и техники. Материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. Ответственный редактор Н.А. Шевченко. Ростов-на-Дону, 2023. С. 733–734.
8. Мясенко В.И. Разработка цифровой модели рабочего органа земледельческого орудия // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2020. Т. 14. № 4. С. 57–62.
9. Погоньшев В.А., Погоньшева Д.А., Хвостенко Т.М., Ковалев Я.С. Цифровые двойники как инструмент проектирования элементов машин и оборудования в АПК // Вестник образовательного консорциума среднерусский университет. Информационные технологии. 2024. № 1 (23). С. 8–12.
10. Колобов М.Ю., Думкина М.Ю., Колобова В.В. Исследование износа конструкционных материалов в условиях абразивного изнашивания // Надежность и долговечность машин и механизмов. Сборник материалов XVI Всероссийской научно-практической конференции. Иваново, 2025. С. 395–398.
11. Мясенко В.И. Построение алгоритма цифрового двойника рабочего органа земледельческого орудия // Информационные технологии, системы и приборы в АПК. АГРОИНФО-2021. Материалы 8-й Международной научно-практической конференции; под ред. В.В. Альта. Новосибирск - Краснообск, 2021. С. 16–22.
12. Ефремова В.Н., Овсянникова О.В. Факторы, влияющие на трение почвы о металл при обработке почвы // Итоги научно-исследовательской работы за 2021 год. Материалы Юбилейной научно-практической конференции, посвященной 100-летию Кубанского ГАУ. Отв. за выпуск А.Г. Коцаев. Краснодар, 2022. С. 336–338.
13. Мясенко В.И., Маринов Н.А. Пространственное динамометрирование рабочих органов почвообрабатывающих орудий // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2017. №5. С. 22–26.
14. Мясенко В.И. парное моделирование трибологического процесса абразивного износа почворезущих деталей // Трение и износ. 2023. Т. 44. № 4. С. 369–375.

ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПОСРЕДСТВОМ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА ОБОРУДОВАНИЯ

Краско А.С.^{1,2}, Кружкова М.С.¹, Пупукин С.А.¹

¹РТУ МИРЭА, Москва, Россия; psa0601@mail.ru

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

В статье рассматривается методика выбора рационального состава технологического оборудования для производственных участков машиностроительных предприятий. На примере детали «Вилка» показана последовательность выбора фрезерных станков для изготовления группы деталей. Разработан алгоритм, повышающий технико-экономические показатели производства при проектировании и организации производственных участков.

Введение

Задача проектирования производственных участков машиностроительных предприятий включает определение оптимального парка технологического оборудования, особенно металлорежущих станков с ЧПУ, для минимизации затрат при соблюдении качества продукции и запланированных объемов выпуска. Несмотря на важность данной проблемы, формализованной методологии подбора оборудования на текущий момент не существует, что обуславливает необходимость разработки соответствующей методики [1-3].

Проблема выбора оптимального состава оборудования производственного участка и постановка задачи

Разработка формализованного метода выбора оптимального состава металлорежущих станков сталкивается с проблемой разнообразия моделей, различающихся техническими характеристиками и стоимостью. Необходимо минимизировать затраты и сроки окупаемости, обеспечивая требуемое качество, производительность и экономичность производства. Алгоритм должен учитывать специфику продукции, производственные условия, экономический расчет и реализуемость решений. Основные критерии включают программу выпуска, количество операций, размеры и точность деталей, максимальную загрузку и минимальное число единиц оборудования [4,5].

Пример выбора оптимального состава оборудования производственного участка для изготовления детали «Вилка»

В качестве примера наглядно проиллюстрируем выбор состава технологического оборудования для механической обработки детали «Вилка» в условиях среднесерийного производства (Объем выпуска; $N = 45\,000$ шт./год).

Дифференциация поверхностей детали и определение их вида (модуля)

Для обеспечения формализации и создания структурированных таблиц, необходимо систематизировать информацию о поверхностях детали. Для этого каждая поверхность нумеруется.

Далее необходимо определить модуль каждой поверхности по таблице, которая представляет собой систематизированный справочник, содержащий данные для определения модуля поверхности на основе анализа научно-технической литературы [6] и использовании специализированных онлайн-сервисов по выбору инструмента.

Назначение модулей поверхностей необходимо для определения группы оборудования по числу управляемых осей, а также для возможности дальнейшей оптимизации процесса выбора инструмента, расчёта режимов резания и определения последовательности операций.

Определение количества технологических переходов для каждой поверхности

Количество технологических переходов, а также методы обработки для каждой поверхности определяются с помощью коэффициента уточнения [7]. Полученные результаты, а также модули поверхностей формируются в таблицу.

Определение вида технологической базы для каждой поверхности

Для составления маршрута обработки детали необходимо определить вид технологической базы для каждой поверхности детали.

Для приближенного определения базирующих поверхностей используются выражения из справочной литературы [8].

Выбор инструмента, расчёт режимов резания, необходимой мощности и коэффициентов загрузки оборудования для каждой поверхности

Выбор инструмента и расчёт режимов резания, таких как частота вращения шпинделя (n), мощность (P), минутная подача (S_m) и штучное время обработки поверхности (T) осуществляются с использованием веб-систем подбора инструментов для каждой обрабатываемой поверхности для каждого технологического перехода.

Затем для каждого перехода рассчитывается коэффициент загрузки оборудования (K) всего годового объёма выпуска изделий (N).

Составление графа взаимосвязи поверхностей

Для определения последовательности обработки поверхностей детали составляется граф взаимосвязи поверхностей каждой детали.

Составление вариантов маршрутов обработки

Наиболее трудоемкой частью разрабатываемой методики является составление вариантов маршрутов обработки. При составлении вариантов маршрутов обработки необходимо соблюдать следующие принципы: 1) возможно только однократное использование черновых баз; 2) предпочтительно использование конструкторских баз в качестве технологических; 3) в качестве технологических баз необходимо использовать в первую очередь наиболее протяженные поверхности, лишаящие заготовку наибольшего количества степеней свободы (двойные направляющие и установочные базы); 4) максимальная концентрация технологических переходов; 5) постоянство баз.

Составление вариантов маршрутов обработки можно описать с помощью алгоритма, представленного на рис. 1.

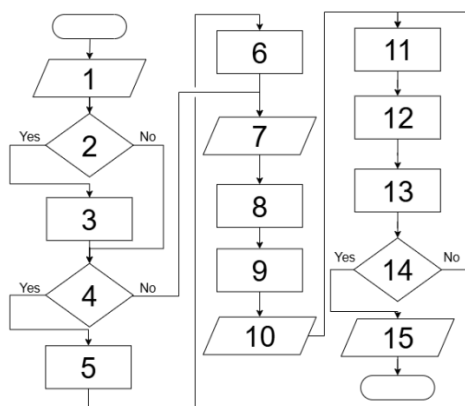


Рис. 1. Алгоритм составления графа маршрутов обработки

Каждый блок данного алгоритма представлен в виде графического элемента и отражает конкретный этап при формировании графа маршрута обработки. Состав блоков: блок 1. Определение номера, модуля, вида базы и размеров всех поверхностей. Блок 2. Условие: «Есть двойные направляющие базы?». Блок 3. Выбор наибольшей из двойных направляющих $L_a = \max(L_d)$. Блок 4. Условие: «Есть установочные базы?». Блок 5. Выбор наибольшей из установочных $L_b = \max(L_u)$. Блок 6. Выбор поверхностей в качестве направляющей или двойной опорной базы. Блок 7. Сформированные комплекты баз вида [двойная направляющая] и/или [установочная + (двойная опорная или направляющая)], составляется таблица 5. Блок 8. Определение доступных для обработки поверхностей при базировании на каждый комплект баз на технологическом оборудовании с разным числом управляемых осей. Блок 9. Исключение невязанных поверхностей с базирующими

и обрабатываемыми. Блок 10. Составление таблицы [комплект баз / обрабатываемые поверхности]. Блок 11. Выбор столбца, в котором присутствует обработка основной конструкторской базы. Блок 12. Запись вариантов первого перехода при установке за комплект баз, соответствующем выбранному столбцу таблицы на технологическом оборудовании с разным числом управляемых осей. Блок 13. Формирование продолжения маршрута обработки с выбором следующего комплекта баз для обработки оставшихся поверхностей. Блок 14. Условие: «Завершены все этапы обработки?». Блок 15. Граф маршрутов обработки.

В итоге получен общий граф, который представляет собой последовательность операций, представленную комбинацией базирующих и обрабатываемых поверхностей, записанных их номерами, а также получаемый коэффициент загрузки оборудования при выполнении указанной операции. Операции разделяются по этапам механической обработки на черновые, получистовые и чистовые.

После составления маршрута обработки необходимо преобразовать граф в таблицу.

Объединение вариантов маршрутов обработки для разных деталей

Большое количество вариантов маршрутов обработки детали создает множество их возможных комбинаций. Основным критерием при сравнении полученных комбинаций является коэффициент загрузки оборудования, значение которого не должно превышать коэффициент использования, но должно быть больше минимального коэффициента загрузки

При предварительном выборе оптимальных вариантов маршрутов обработки необходимо учитывать следующие критерии: 1) коэффициент загрузки должен находиться в интервале ($\min K \leq K \leq \max K$); 2) количество единиц оборудования должно стремиться к минимальному значению ($N_c \rightarrow \min$).

При применении электронных таблиц были выведены логические формулы, которые упрощают перебор всех возможных вариантов и выводят в таблицу варианты объединенных маршрутов обработки.

В соответствии с полученными данными по коэффициенту загрузки для каждого варианта маршрута обработки принимаем некоторые маршруты в качестве вариантов для дальнейшего экономического сравнения.

Обобщенный алгоритм выбора оптимального состава технологического оборудования (см. рис. 2), представляет собой последовательность выполнения следующих действий: блок 1. Исходные данные: годовой объем выпуска (N), номенклатура деталей (H). Блок 2. На каждой детали каждой поверхности присваивается номер и определяется её модуль. Блок 3. Номер и модуль

каждой поверхности. Блок 4. Для каждой обрабатываемой поверхности определяется метод обработки и количество технологических переходов по коэффициенту уточнения (ϵ). Блок 5. Методы обработки каждой поверхности. Блок 6. Рассматриваются возможности использования каждой поверхности детали в качестве технологической базы. Блок 7. Определение вида технологической базы для каждой поверхности. Блок 8. Выбор режущего инструмента, режимов резания, штучного времени обработки поверхности (Т) и коэффициента загрузки (К) для каждой поверхности. Блок 9. Режущий инструмент, режимы резания, Т и К для каждой поверхности. Блок 10. Составление графа, на котором показана размерная взаимосвязь поверхностей и взаимосвязь по допускам взаимного расположения. Блок 11. Граф взаимосвязей поверхностей. Блок 12. Составление графа возможных вариантов маршрутного технологического процесса. Блок 13. Граф маршрутов обработки детали. Блок 14. Объединение вариантов маршрутов всей номенклатуры деталей. Блок 15. Выбор вариантов маршрутных технологических процессов по критериям выбора оборудования. Блок 16. Варианты объединённых маршрутов обработки. Блок 17. Экономическое сравнение и окончательный выбор оборудования [9]. Блок 18. Модели технологического оборудования.

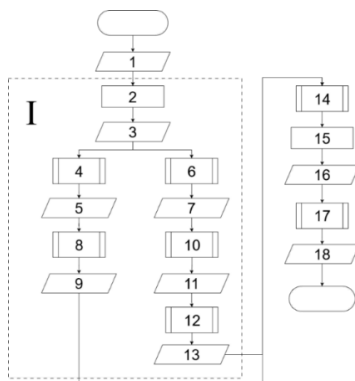


Рис. 2. Обобщённый алгоритм выбора оптимального состава технологического оборудования производственного участка
I – блоки, выполняемые для каждой детали

Заключение

Разработан алгоритм выбора оптимального состава оборудования производственного участка, учитывающий технические, экономические и организационные факторы. Инструмент значительно повышает эффективность планирования производственных участков.

Перспективное развитие включает: 1) внедрение методов машинного обучения для ускорения обработки данных. 2) Разработку критериев отбора оптимальных решений (актуально для двух корпусов — более 10 млн комбинаций)

Практическое применение алгоритма возможно при: 1) проектировании новых участков. 2) Модернизации существующих производств. 3) Оптимизации производственных процессов.

Внедрение алгоритма обеспечит существенное сокращение временных и финансовых затрат на принятие решений по оснащению производственных участков.

1. Рябов, С. А. Выбор оборудования для реализации технологических процессов в условиях различной серийности производства: учебное пособие; ГУ КузГТУ. Кемерово, 2008. 3 с.
2. Насыров, Ш. Г. Проектирование и организация специализированных цехов и участков в машиностроении: учебное пособие. Лань, 2019. 28 с.
3. Rubayet Karim, C. L Karmaker. Machine Selection by AHP and TOPSIS Methods. American Journal of Industrial Engineering. Vol. 4, No. 1, 2016, pp 7-13.
4. Мазурин, Э. Б. Методика выбора оборудования для предприятий с единичным типом производства / Э. Б. Мазурин, Е. В. Савенко // Инновации в менеджменте. – 2021 – № 4(30). – С. 24-29.
5. Лазаренко Г. П. Выбор модели металлорежущего станка: формализованный подход // Машиностроение и компьютерные технологии. 2013 №12. – С. 10-28.
6. Базров Б. М. «Модульная технология в машиностроении». — М.: Машиностроение, 2001, 37 с.
7. Аверченков, В. И. Технология машиностроения: сборник задач и упражнений: учебник — 2-е изд., испр. и доп. — Москва: ИНФРА-М, 2006. 119 с.
8. Старостин В. Г., Лелюхин В. Е. Формализация проектирования процессов обработки резанием. — М.: Машиностроение, 1986. - 136 с.
9. Лазаренко Г. П. Сравнительный анализ металлорежущих станков при технологическом проектировании // Машиностроение и компьютерные технологии. 2013 №03. — С. 1-16.

ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ПРИ СИМУЛЯЦИИ ОПЕРАЦИЙ КОНТРОЛЯ В ПРОМЫШЛЕННОЙ РАДИОГРАФИИ

Кувшинников В.С., Ковшов Е.Е., Сударев А.В., Корчагин В.Д.

Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторский институт монтажной технологии – Атомстрой», Москва, Россия; KovshovEE@atomrus.ru

Проанализированы предпосылки применения симуляционных средств при подготовке специалистов по неразрушающему контролю. Рассмотрено применение цифровых двойников при симуляции операций промышленного радиационного контроля. Представлены подходы к формированию радиационного изображения на основе дискретных моделей цифровых двойников объектов контроля, детекторов и оснастки. Приведены примеры приложения цифровых двойников к решению практических задач неразрушающего контроля.

Введение

Современный этап технологического развития промышленности, определяемый парадигмами Индустрии 4.0 и NDE 4.0, характеризуется глубокой интеграцией цифровых технологий в производственные и контрольные процессы. Важнейшим аспектом этого развития является внедрение иммерсивных и интерактивных средств виртуальной реальности как для подготовки персонала, что позволяет значительно снизить временные и материальные затраты на обучение, так и в составе систем-ассистентов при планировании, подготовке, непосредственном выполнении практических работ, а также инспекции их результатов. Особую актуальность данное направление приобретает в подготовке специалистов по радиационным видам неразрушающего контроля, где традиционные методы подготовки сопряжены с высокими рисками и материальными затратами, что приводит к снижению пропускной способности учебных центров, сокращению времени практических занятий и способствует дефициту компетентных кадров.

В качестве ключевого элемента при создании аутентичных виртуальных тренажеров промышленной радиографии выступает система цифровых двойников объектов контроля, источников излучения и детекторов. Углубленные модели двойников позволяют перейти от простого ознакомления с конструкцией объектов к реализации методик контроля, проведению виртуальных испытаний и экспериментов. Виртуальный опыт формирует у обучаемого понимание связи между параметрами экспонирования и качеством итогового изображения, а также развивает умение уверенно действовать за счет навыка, выработанного в виртуальной среде в ходе координированной активности с умственной и физической составляющими. Задача симуляции формирования радиационного изображения является вычислительно сложной, что стимулирует поиск ресурсно-эффективных алгоритмов, балансирующих между физической достоверностью моделей, основанных на методах Монте-Карло, и производительностью аппаратно-

оптимизированных решений с использованием преимуществ графических процессоров.

Цель

Рассматриваемый виртуальный симулятор радиационного контроля использует комплекс цифровых двойников объектов, материалов и процессов для симуляции операций радиографического контроля (РК). При моделировании факторов, влияющих на качество изображения, предпочтение отдается наиболее важным с точки зрения анализа результатов контроля в рамках действующих стандартов, правил и норм [1]. Целью исследования является комплексирование подходов к симуляции формирования результатов радиационного вида неразрушающего контроля при решении образовательных и симуляционных задач на основе редуцированных алгоритмов.

Материалы и методы

В связи с незаменимостью и высокой востребованностью радиационного вида неразрушающего контроля в энергетической, нефтегазовой, авиационной и космической отраслях, в строительстве и машиностроении, потребность в специалистах различной квалификации, обладающих уверенными теоретическими знаниями и практическими компетенциями, остаётся на высоком уровне. В числе наиболее распространенных и важных для производства видов неразрушающего технического контроля есть акустический (ультразвуковой), оптический (визуальный и измерительный контроль), контроль проникающими веществами (капиллярный) и радиационный (радиографический и гаммаграфический). Радиационные виды неразрушающего контроля в контексте практического применения и, в особенности, обучения практической деятельности, выделяются уровнем опасности для жизни и здоровья персонала, а также состояния окружающей среды. Применение средств симуляции процесса РК востребовано в связи с ограничениями на возраст допускаемых до практики учащихся и на квалификацию специалистов, выполняющих контролирующие функции в ходе обучения, а также дороговизной

оборудования, со сложностью и продолжительностью процедур оформления документов при организации действующей лаборатории РК, пригодной в том числе для образовательных целей, что приводит к необходимости командирования будущих специалистов и препятствует формированию эффективных учебных программ, грамотно сочетающих теорию и практику.

При создании симулятора промышленного РК в первую очередь ставилась задача формализации технологического процесса контроля. Процесс выполнения РК был условно разделен на четыре этапа, представленных на рис. 1.



Рис. 1. Этапы симуляции практики выполнения радиационного контроля

Важнейшим элементом программной системы, важным как для обучения, так и для других потенциальных практических приложений математической модели, является возможность получения результатов РК в визуальной форме, отражающих ключевые параметры выполнения контроля в форме, пригодной для анализа и фиксации в ходе симуляции соответствующих операций технологического процесса. Для реализации требуемых функций системы сформирован перечень цифровых двойников окружения, интерактивных объектов и аппаратуры, объектов контроля, оснастки, а также материалов, источников, детекторов и других. Цифровые двойники связаны между собой и объединены в единую структуру, диаграмма сущностей (ERD) и связей которой приведена на рис. 2.

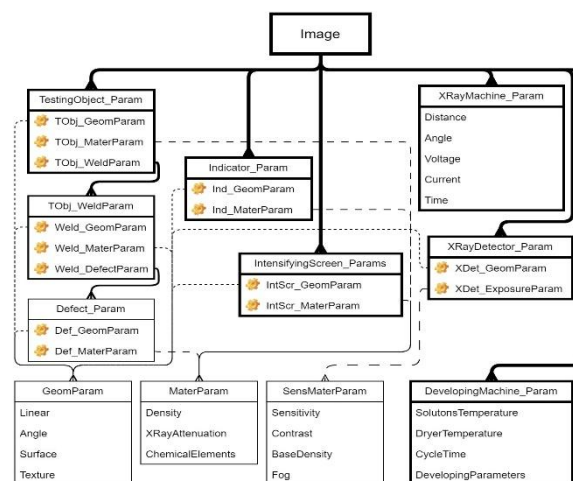


Рис. 2. ERD цифрового двойника изображения

Разработан набор 3D-моделей широкой номенклатуры объектов, используемых в практике промышленного РК (рис. 3).

Среди цифровых двойников можно выделить:

- Цифровые двойники помещений
 - Промышленная лаборатория
 - Промышленное помещение
 - Промышленная площадка
 - Строительная площадка
- Цифровые двойники объектов контроля
 - Образцы сварных соединений
 - Элементы промышленных объектов
- Цифровые двойники оснастки
 - Индикаторы чувствительности
 - Ограничительные метки
 - Маркировка
 - Мерительный пояс
 - Образцы имитаторы вогнутости и выпуклости корня сварного шва
- Цифровые двойники материалов
 - Материалы объекта контроля
 - Материалы чувствительного слоя детектора
 - Материалы фильтров и усиливающих экранов
- Цифровые двойники источников
 - Рентген-аппараты постоянного потенциала, полупериодные и импульсные [2]
 - Гаммаграфические
- Цифровые двойники детекторов
 - Плоскопанельные цифровые
 - Кассеты с пленками
 - Гибкие детекторы



Рис. 3. 3D-модели промышленных объектов

Цифровой двойник изображения формируется с применением конвейера обработки графической информации. При моделировании источника излучения учитывается тип источника и режим работы (для рентген-аппаратов), а также размер фокусного пятна [3], наличие фильтров и значения углов раствора рабочего пучка излучения. Ослабление излучения в толще материала объекта контроля рассчитывается с учетом спектрального распределения фотонов рентгеновского излучения или соответствующих гамма-линий гамма-источников [4]. Оценка интенсивности прошедшего излучения, действующего на участок детектора с координатами x, y выполнена, как

$$I(x, y) = \sum_i R(E_i) D(E_i) E_i e^{-\sum_j \mu_j(E_i) d_j(x, y)}, \quad (1)$$

где $I(x, y)$ – интенсивность излучения в пикселе с координатами x, y ; $R(E_i)$ – отклик (response) детектора; $D(E_i)$ – расчет числа излучаемых фотонов с энергией E_i ; $\mu(E_i)$ – значение линейного коэффициента поглощения для частиц с энергией E_i ; $d_j(x, y)$ – длина пути от излучателя до пикселя с координатами x, y в толще j -го материала.

Как и в практической деятельности, в виртуальной среде специалист может установить параметры экспонирования произвольно, опираясь на соответствующий выбранной схеме контроля допустимый согласно нормативной документации [1] диапазон значений для фокусного расстояния, угла экспонирования, напряжения на аноде и настроить другие параметры в соответствии с личными расчетами. На рис. 4 проиллюстрирован эпизод оценки качества радиографического изображения, полученного перерасчетом для разного напряжения на аноде трубки.

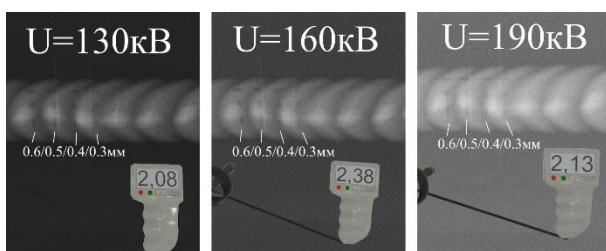


Рис. 4. Анализ качества результатов РК, выполненного при различных расчетных параметрах

На фрагментах изображений указаны напряжения и толщины предопределенных двойников несплошностей. Важным элементом с точки зрения практики и обучения РК выступает симуляция экспонирования на детектор выпуклой или вогнутой формы [5]. Благодаря математической модели центрального проецирования на детектор изогнутой формы цифровой двойник детектора позволяет симулировать РК для всех схем контроля, приведенных в основной нормативной документации [1]. При этом цифровой двойник изображения передает соответствующие искажения формы и градиенты оптической плотности.

Результаты и их обсуждение

Разработанная виртуальная среда с комплексом цифровых двойников объектов позволяет включить практическую часть ознакомления с технологическими объектами РК в программы обучения профильных учебных заведений высшего и среднеспециального образования, минуя возрастные ограничения. Сотрудникам крупных строительных объектов предоставляется возможность на ранних этапах обучения закреплять теоретические знания практическими действиями без необходимости командирования на весь срок занятий. Применение цифровых двойников технических объектов контроля произвольной формы и любых твердых материалов позволяет смоделировать процесс выявления дефектов любой «сложности», выполнить предварительный анализ схем контроля, параметров и режимов экспонирования с целью их верификации. Симулятор позволяет в короткие сроки выполнить дообучение специалистов РК под специфические для текущего объекта условия контроля.

В настоящее время практические занятия в виртуальной среде симулятора «VR-Радиография» применяются при обучении специалистов в профильном учебном центре. Кроме того, промышленные виртуальные сценарии включены в программу соревнований на конкурсах профессионального мастерства (рис. 5): REA Skills, AER Skills, PetroChem-Skills, Atom Skills, XI Международный чемпионат высокотехнологичных профессий "Hitech-2024", Чемпионат профессионального мастерства города Москвы «Московские мастера» 2025.

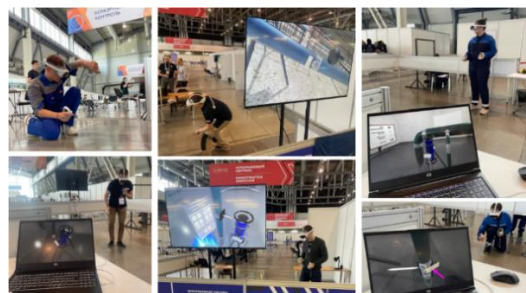


Рис. 5. Практика применения виртуальной среды в виде этапа конкурсов профессионального мастерства

В настоящее время математические модели цифровых двойников успешно применяются для балансирования и расширения набора данных, используемого для обучения моделей искусственного интеллекта различного назначения [6].

1. ГОСТ Р 50.05.07-2018 Система оценки соответствия в области использования атомной энергии. Оценка соответствия в форме контроля. Унифицированные методики. Радиграфический контроль. М.: Стандартинформ, 2018. 36 с.
2. Новокрещенов В., Прохоров Н. Радиационный контроль на предприятии: учебное пособие для вузов. 2-е изд., испр. и доп. М.: ЛитРес, 2025.
3. Смирнов А. В., Косарина Е. И., Демидов А. А., Суворов П. В. Критерии оптимального режима неразрушающего контроля методом цифровой радиографии // Контроль. Диагностика. 2024. Т. 27, № 7. С. 4–14. DOI:10.14489/td.2024.07.pp.004-014
4. Ковшов Е. Е., Кувшинников В. С. Симуляция физических свойств материала объекта контроля в VR-тренажере промышленной радиографии // Контроль. Диагностика. 2023. Т. 26, № 2(296). С. 4–12. DOI 10.14489/td.2023.02.pp.004-012.
5. Ковшов Е. Е., Кувшинников В. С. Формирование изображения объекта контроля на гибком детекторе в среде симулятора промышленной радиографии // Контроль. Диагностика. 2024. Т. 27, № 3(309). С. 23–34. DOI 10.14489/td.2024.03.pp.023-034.
6. Корчагин В. Д., Кувшинников В. С., Ковшов Е. Е. Критериальный анализ моделей обработки данных радиационного неразрушающего контроля // International Journal of Open Information Technologies. 2024. Т. 12, № 4. С. 23–31.

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛА ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТОДАМИ ТРИБОТЕХНОЛОГИЙ

Куксенова Л.И.¹, Савенко В.И.², Козлов Д.А.¹

¹ Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; lkukc@mail.ru

² Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия

С позиций формирования структурно-механического состояния поверхностного слоя конструкционного материала рассмотрены наиболее распространенные для узлов трения методы триботехнологий: создание износостойкой структуры в результате контролирующего воздействия физико-химических факторов в условиях контактной деформации в поверхностно-активной смазочной среде в парах трения медный сплав – сталь (реализация явления избирательного переноса); формирование покрытий на поверхности пар трения сталь – сталь методом фрикционно-механического натирания медного сплава; создание тонких покрытий из мягких металлов в условиях применения металлоплакирующих смазочных материалов.

Конструирование, эксплуатация и ремонт трибосопряжений является многоплановой проблемой, успешное решение которой создает условия для обеспечения надежности, долговечности и безопасности эксплуатации машин и механизмов. Практика показала, что одной из составляющих решения этой проблемы является применение триботехнологий, в которых особое место принадлежит смазочному материалу.

Особенности структурно-механического состояния материала поверхностного слоя при реализации явления избирательного переноса

Изменение структуры и характеристик механических свойств поверхностной пленки меди при трении пар медный сплав – сталь связано с характером напряженно-деформированного состояния материала в зоне контактного взаимодействия. С целью сравнительного анализа напряжений и деформаций, возникающих в приконтактной зоне материала, было оценено распределение остаточных напряжений в поверхностных слоях после реверсивного скольжения по его поверхности микровыступа, моделирующего шероховатость контртела. На рис. 1 приведены эпюры компонент тензора остаточных напряжений в случаях испытаний в поверхностно-активной (а) и неактивной смазочной среде (б) [1].

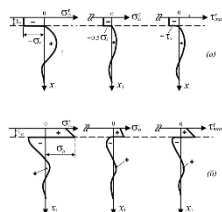


Рис.1. Распределение остаточных нормальных (σ_{ii}^r) и касательных ($\tau_{max}^r = 0.5 \cdot \sigma_{22}^r$) напряжений в образцах при трении в поверхностно-пластифицирующей (а) и поверхностно-упрочняющей (б) смазочных средах

Результаты расчетов показали, что остаточные напряжения, возникающие при деформации в поверхностно-активной смазочной среде, носят сжимающий характер, а в неактивной –

растягивающий. Сжимающие остаточные напряжения формируют приповерхностный слой с градиентными структурными характеристиками.

Результаты экспериментальных исследований пар трения медный сплав – сталь в условиях избирательного переноса свидетельствуют о двух основных параллельно идущих процессах структурно-фазовых превращений в поверхностном слое: понижение плотности дислокаций в зоне деформации, обеспечивающее эффект пластифицирования; формирование стационарного макроскопического диффузионного потока атомов легирующих элементов и их переход в смазочную среду, что приводит к созданию поверхностной пленки меди. В результате формируется особое структурно-механическое состояние поверхностного слоя, которое приводит пару трения в практически безызносное состояние [2].

Физико-химическая природа структурно-фазовых превращений поверхностного слоя состоит в том, что деформирования медного сплава в активной среде возникают диффузионные потоки атомов легирующих элементов, стимулирующие релаксацию возникших остаточных напряжений. Происходит расслоение деформированного материала, которое закономерно влияет на предел текучести его приповерхностного модифицированного слоя. Основываясь на экспериментально установленной зависимости $\sigma_s \approx C^{1/2}$ и учитывая выполняющееся в экспериментах по избирательному переносу соотношение $\Delta C)/C \rightarrow 1$, можно получить, что $|\Delta \sigma_s|/\sigma_s \approx 50\%$ [1]. Таким образом, за счет восходящей диффузии может быть достигнуто значительное изменение предела текучести, что для случая поверхностно-пластифицирующей среды обеспечивает условия реализации положительного градиента механических характеристик – необходимого условия устойчивого режима трения и высоких антифрикционных свойств.

Наличие на межслойной границе смены знака остаточных касательных напряжений I рода, рис.1, приводит к встречному движению дислокаций с однонаправленными векторами Бюргерса в

соседних разнозначно напряженных слоев материала. Двигаясь в параллельных плоскостях скольжения, дислокации тормозятся на межслойной границе, формируя в ней малоугловую дислокационную сетку. Процесс концентрации дислокаций на межслойной границе сопровождается очисткой от них приграничных областей деформированного металла. Расчеты показывают, что размер таких областей по порядку величины совпадает с толщиной поверхностно-пластифицированного слоя, достигающей нескольких микрон.

Процесс структурно-фазовых превращений при трении может функционировать, поддерживая высокий уровень сопротивления разрушению поверхностных слоев при заданных условиях нагружения до тех пор, пока изменившиеся внешние условия (например, повышение давления, или изменение состава материалов) не переведут его в новое установившееся состояние, которое может характеризоваться несколько другими триботехническими характеристиками, но с сохранением материалом высокой износостойкости. Эти особенности трения пары в режиме избирательного переноса указывают на значимый прорыв в повышении качества конструкционных и смазочных материалов триботехнического назначения.

Фрикционно-механический метод создания покрытий на поверхностях стальных пар трения (финишная антифрикционная безабразивная обработка)

Процесс ФАБО заключается в нанесении на поверхности трения стальных и чугунных деталей тонкого слоя мягких металлов (латуни, меди, бронзы). Нанесение производится после окончательной традиционной обработки поверхностей трения. В основе создания износостойкой пленки при ФАБО лежит процесс трения, при котором особая роль принадлежит рабочей (технологической) жидкости.

На лабораторной машине реверсивного трения скольжения 77МТ-1 при средней скорости 0.1 м/с и давлении 30МПа в масле М10Г₂К испытывали пару трения сталь 50Г с медным покрытием – чугун с хромовым электролитическим покрытием. Медное покрытие наносилось на сталь в нормализованном состоянии и в состоянии закалки от температуры нагрева ТВЧ. Рис.2 иллюстрирует результаты анализа строения поверхности обрабатываемого материала. Рентгеноструктурный анализ показывает, что поверхностный микрообъем состоит из трех слоев: 1 – собственно покрытие (1,а и П,в) толщиной десятки доли микрометра; 2 – модифицированная зона (2,а и М,в) толщиной ~ 3 мкм, градиент значений физического уширения линий приповерхностного слоя стали в исходном нормализованном состоянии является отрицательным, а для образца, подвергнутого

ФАБО, – положительным; 3 – основы материала.

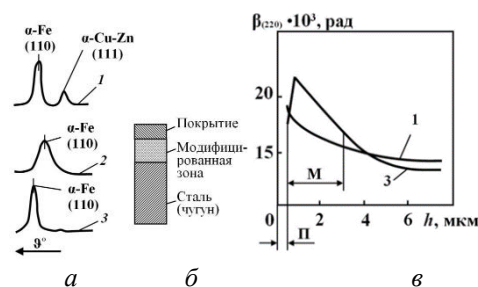


Рис.2. Фрагменты дифрактограмм стали (а): 1-покрытие; 2-модифицированная зона; 3-подложка; схема строения поверхностного слоя (б) и изменение физического уширения рентгеновских линий $\beta_{(220)}$ по глубине поверхностного слоя стали h (в)

Вид зависимости $\beta_{(220)}=f(h)$, рис.2в, (учитывая, что величина $\beta_{(hkl)}$ связана с плотностью дислокаций ρ соотношением $\rho=A[\beta_{(hkl)}]^2$) и значения микротвердости (до обработки – 41HV, после обработки – 35HV) свидетельствуют о реализации трех основных процессов под влиянием ФАБО, при которой формируется структурно-механическое состояние слоя Cu-Zn: перераспределение плотности дислокаций; механический разогрев тончайших поверхностных слоев, вызывающий процессы возврата и перераспределение дислокаций в поле циклических микронапряжений; формирование подповерхностной зоны с высокой плотностью дислокаций, рис.2в. В совокупности такой комплекс структурных превращений создает в материале положительный градиент механических свойств в отличие от трения пары со сталью в исходном нормализованном состоянии, а также после обработки ТВЧ с ФАБО, когда имеет место отрицательный градиент свойств. Следовательно, многослойный поверхностный микрообъем стали соответствует наиболее общему феноменологическому критерию качества материала триботехнического назначения – правилу знака градиента механических свойств по нормали к свободной поверхности. При положительном градиенте установившийся режим трения сопровождается более низким уровнем разрушения поверхности, чем при отрицательном. ФАБО, обеспечивая указанные выше изменения характеристик структурного состояния поверхностного микрообъема (и, следовательно, механических свойств – твердости, предела текучести, прочности и пластичности), создает предпосылки для повышения триботехнических характеристик изделий.

Технологии применения металлолакирующих смазочных материалов

С ужесточением условий эксплуатации машин получает развитие новое направление в создании смазочных материалов, основанное на научном открытии эффекта избирательного переноса с использованием в узлах трения

металлоплакирующих смазочных материалов. Сформировались новые понятия: металлоплакирующая присадка или добавка, металлоплакирующий смазочный материал, металлоплакирующая пленка. В качестве присадок используются чистые металлы (медь, олово, индий, свинец), сплавы (латуни, бронзы), неорганические соединения металлов (оксиды, соли), координационные и металлоорганические соединения [18].

Механизм смазочного действия металлоплакирующих смазочных материалов заключается в том, что в местах фактического контакта в результате восстановления или распада присадок на поверхности трения осаждается металлическая мягкая пленка, создающая положительный градиент свойств по толщине зоны контактного взаимодействия и предотвращающая разрушение поверхности. Согласно представлениям [4], предельно низкие потери на трение и износ при трении в среде металлоплакирующих смазочных материалов объясняются реализацией самоорганизующегося процесса микромодифицирования зоны контакта с формированием слоя, существенно отличающегося от исходного состояния материала. В практике триботехнических испытаний наиболее часто применяются следующие металлсодержащие присадки: МКФ-18 (ТУ 38 1011127-87), КТЦМС-1 (ТУ 3830109-88), Гретерин-3 (ТУ 38102125-87), «Валена» (ТУ 0257-001-17368431-05), Фриктол [5]. Их эффективность наблюдается как в жидких, так и пластичных смазках. Рис.3 иллюстрирует влияние присадок на износ стали в условиях реверсивного трения скольжения.

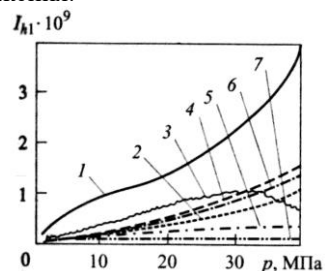


Рис.3. Зависимости износа стали ШХ15 от контактного давления в смазочной среде на основе масла И-20А: 1 – масло И-20А; 2 – масло И-20А с присадкой 0,4% МКФ-18; 3 – с присадкой 0,5% Гретерина-2; 4 – с 0,3% Гретерина-3; 5 – с 0,5% Гретерина-4; 6 – с 1% КТЦМС-1; 7 – с 1% Фриктола (присадки Гретерин отличаются технологией получения и составом ПАВ)

Испытания показали, что при трении в чистом масле И-20А стальной пары трения ШХ15 – 40Х при давлении $p > 25$ МПа наблюдаются задиры

поверхностей и повышенный износ. Используемые присадки значительно снижают уровень разрушения поверхности трения при всех давлениях. Наибольшее снижение интенсивностей изнашивания обоих образцов пары было получено при применении присадок Фриктол и Гретерин-4.

Заключение

Для узлов трения наиболее распространенными видами триботехнологий, кроме явления избирательного переноса, являются финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) и применение металлоплакирующих смазочных материалов. В результате применения триботехнологий формирующаяся на поверхности детали пленка обладает следующими характеристиками: она удерживается в зоне фрикционного контакта за счет электрических и адгезионных свойств; находится в особом структурно-механическом состоянии, обеспечивающим удержание смазочного материала и его смазочную способность в условиях граничного трения; обладает способностью самовосстановления и саморегулирования, исключая задиры и заклинивание сопряжения. Реализация триботехнологий основывается на конструкторских решениях и научно-обоснованном подборе конструкционных материалов для узлов трения, смазочных сред как технологического назначения при обработке, так и эксплуатационного.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0020, FFGU-2024-0021.

1. Савенко В.И. Роль эффекта Ребиндера в реализации режима безызносности в триботехнике // Эффект безызносности и триботехнологии. 1994. № 3–4. С. 26-38.
2. Kuxenova L. I., Savenko V. I. System-Structural Analysis of Tribological Behavior of Antifriction Materials in Friction Pairs Operating in Surfactants // Friction and Wear 2024. V.45. №5. P.294-307.
3. Комаров С.Н., Пичугин В.Ф., Комарова Н.Н. Металлоплакирующие смазочные материалы для пар трения сталь-сталь / Сб. Долговечность трущихся деталей машин под ред. Д.Н.Гаркунова. М.: Машиностроение. 1990. В.5. С.70-85.
4. Кужаров А.С., Бурлакова В.Э., Задошенко Е.Г., Кужаров А.А., Бурлов А.С., Ураев А.И., Кравчик К., Гарновский А.Д. Триботехнические возможности координационных соединений меди при трении бронзы по стали // Трение и износ. 2005. Т.26. №6. С. 628-637.
5. Куксенова Л.И., Герасимов С.А., Лаптева В.Г. Износостойкость конструкционных материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2011. - 237 с

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ СОЖ НА СИЛУ ТРЕНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ СТАЛИ 45

Кулаков О.И., Фролов А.Д., Иванов Г.Ю.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия;

МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия;

kulakov@imash.ru

В работе представлен анализ влияния концентрации СОЖ на силы резания в сравнении с индустриальным маслом И-20А, часто применяемым в качестве бюджетной СОЖ. Предложен способ экспресс-оценки свойств СОЖ для то-карной обработки на компактных машинах трения возвратно-поступательного действия.

Введение

Рациональный подбор смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) является ключевым фактором снижения силовой нагрузки и износа инструмента при обработке резанием. Традиционная оценка эффективности СОЖ требует трудоемких натурных испытаний на станках [1].

Поскольку для различных видов лезвийной обработки производители рекомендуют использовать разные концентрации рабочих растворов, актуальной задачей является их экспресс-оценка. Одним из решений является проведение модельных испытаний на машинах трения с соответствующим подбором контактных пар.

В данной работе исследуется влияние концентрации СОЖ на фрикционно-износные характеристики пары трения, моделирующей взаимодействие в зоне резания.

Материалы и оборудование

Для проведения испытаний СОЖ была использована возвратно-поступательная машина трения ПРУ (ИМАШ РАН), представленная на рис. 1.



Рис. 1. Машина трения ПРУ

Количество циклов испытаний измерялось с помощью счётчика импульсов ОВЕН СИ-10, температура в испытательной камере контролировалась измери-телем-регулятором ОВЕН ТРМ-1 и датчиком ТСП-100П. Для измерения силы трения использо-вался специально

изготовленный тензометрический датчик-образцедержатель, подключенный к крей-товой измерительной системе LCard LTR-EU-8.

Амплитуда движения подвижного образца составила 80 мм (размах 160 мм), нагрузка на подвижный образец – 5 кгс/см² при рабочей площади порядка 1 мм². Скорость движения составила 8,3 см/сек (50 циклов/мин). Испытания проводились при температуре в камере 120 °С.

Для каждой пары образцов проводилось 3000 циклов испытаний. Подвижные образцы устанавливались в тензометрический держатель, при этом линия контакта находилась на оси держателя (рисунок 2).

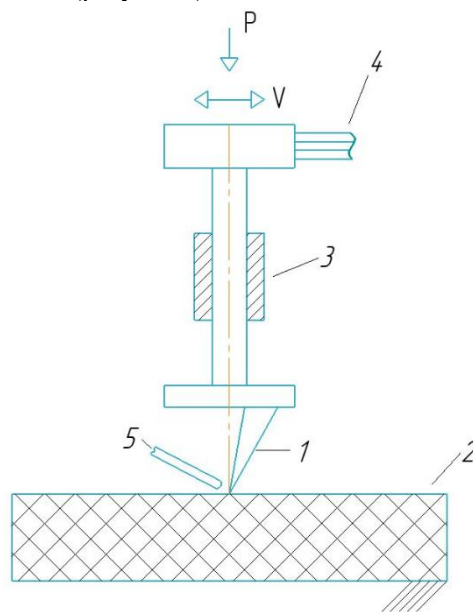


Рис. 2. Тензометрический держатель;
1 - Имитатор резца; 2 - Неподвижный образец; 3 - Тензометрический держатель имитатора резца; 4 – Траверса; 5 - Трубка подачи СОЖ

Подвижные образцы-имитаторы режущей пластины были изготовлены фрезерованием из Р6М5, неподвижные – из стали 45. В качестве базового аналога СОЖ использовалось индустриальное масло И-20А ГОСТ 20799–88. Испытания также проводились в условиях постоянной подачи СОЖ марки Синапол при концентрациях 1,5%, 3%, 6%. Для разбавления концентрата использовалась дистил-лированная вода при температуре 20 °С.

Дополнительно после разведения СОЖ полученные составы перемешивались с помощью ротационной мешалки РМ-1 в течение 2 часов. Применялась капельная система смазки, при этом смазка поступала непосредственно в зону трения. Массовый износ подвижных образцов измерялся с помощью весов ВЛР-200. Запись силы трения на обратном ходу не производилась.

Дополнительно с помощью микротвердомера MicroVicky VN1010 было измерено среднее значение микротвердости полученного соединения на подготовленном микрошлифе. Микротвердость перемешанного материала в зоне сварного шва составила 138 HV 0,1 при микротвердости основного материала 210 HV 0,1.

Заметное снижение микротвердости можно объяснить выгоранием углерода при длительном термическом воздействии.

Результаты

Результаты измерения массового износа образцов и средней силы трения приведены в табл. 1. Значения износа и средние значения коэффициента трения весьма близки в заданных условиях. Установлено, что масло И20А показало худший результат. Оптимальным сочетанием свойств обладает СОЖ с концентрацией 1,5% (по износу и силе резания). Установлено, что повышение концентрации СОЖ в данных условиях приводит к заметному уменьшению сил трения, но также к налипанию продуктов износа на подвижный образец, т.е. в натурных условиях – к налипанию стружки на резец.

Таблица 1. Результаты испытаний

СОЖ	Износ, мг	Ср. F. тр., гс
И-20А	2,17	294
Синапол 1,5%	0,62	271
Синапол 3%	0,67	269
Синапол 6%	-2,31	218

Выводы

Полученные результаты схожи с результатами, полученными в работе [2]. Подтверждено, что применение индустриального масла И-20А является нецелесообразным в качестве СОЖ. Установлено, что в моделируемых условиях разумно применение СОЖ с концентрацией 1,5%–3%, при этом измеренная разница по износу и силе трения пренебрежимо малы. При дальнейшем увеличении концентрации СОЖ до 6% наблюдается налипание продуктов износа на имитатор резца при одновременном снижении сил резания. Для получения более четкой картины требуется проведение механических испытаний.

Данное исследование было проведено в связи с доведением РТУ МИРЭА Государственного задания № 075-00701-24-07 от 03.04.2024г. и заключением дополнительного соглашения к Соглашению о предоставлении субсидии из федерального бюджета на финансовое обеспечение выполнения государственного задания на оказание государственных услуг (выполнение работ) от 05.04.2024г. №075-03-2024-077/8 по теме «Исследование методов пассивации поверхностей в процессах механической обработки и эксплуатации» (шифр «Наука»)

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Наукоемкие технологии создания машин будущего» Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Москва, Россия).

1. Метод прогнозирования снижения силы резания при токарной обработке заготовок из конструкционных сплавов с применением СОЖ / А. Г. Кисель, Ю. В. Титов, Г. Б. Тодер, Д. Ю. Белан // Вестник машиностроения. – 2020. – № 10. – С. 50-54.
2. Кулаков, О. И. Исследование влияния концентрации СОЖ на коэффициент трения / О. И. Кулаков, А. Д. Фролов, Г. Ю. Иванов // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении: Научные труды VIII Международной научной конференции, Москва, 19–20 ноября 2024 года. – Москва: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2024. – С. 132-133. – EDN NDONLG.

О ВЫБОРЕ РЕЖИМА ИНЕРЦИОННОЙ СВАРКИ СТАЛИ 45

Кулаков О.И., Фролов А.Д., Иванов Г.Ю.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; glebobobo@mail.ru

В работе исследована инерционная сварка трением для стальных деталей из стали 45. Целью работы являлся подбор параметров, обеспечивающих формирование качественного сварного соединения. В результате испытаний были определены эффективные параметры, позволяющие добиться стабильного результата. Металлографический анализ подтвердил высокое качество соединения: на микрофотографиях видна четкая зона стыка без дефектов, а при большом увеличении наблюдается гомогенная структура в области сварного шва.

Введение

В современной промышленности высоко востребованы надежные методы неразъемного соединения деталей. Один из таких методов — сварка трением. При этом процессе одна деталь (обычно цилиндр или труба) вращается вокруг своей оси и под давлением прижимается ко второй, неподвижно закрепленной детали. Особенностью метода является то, что материалы не плавятся, а формируется полностью гомогенное соединение. Для обеспечения высокой прочности соединения необходима точная настройка параметров: скорости вращения, давления и маховой массы [1].

Процесс сварки протекает следующим образом. Деталь разгоняется до заданной скорости и прижимается к неподвижной заготовке. Спустя несколько секунд в зоне контакта начинается пластическая деформация, и металл равномерно выдавливается по окружности будущего шва. Последующая резкая остановка вращения и охлаждение металла приводят к образованию гомогенного соединения [2].

Инерционная сварка трением — это разновидность сварки трением, при которой остановка вращения происходит не по команде управления станком, а за счет затвердевания металла в стыке и сил трения. Данный способ считается одним из наиболее простых и экономичных видов сварки трением.

Метод наиболее чувствителен к точности выбора параметров. Если при других видах сварки трением незначительное завышение скорости или давления может не повлиять на результат, то при инерционной сварке это приведет к полному отсутствию соединения.

Ключевую роль в инерционной сварке играет маховая масса. При сварке деталей малого диаметра ее недостаток приводит к преждевременной остановке вращения, в результате чего не достигается температура, необходимая для пластической деформации. Избыток же маховой массы приводит к тому, что площадь соединения оказывается недостаточной для гашения инерции вращения, что вызывает разрыв шва [3].

Таким образом, основной целью данной работы является поиск оптимальных параметров для качественной инерционной сварки стальных деталей малого диаметра

Материалы и методы

В исследовании использовались образцы из стали 45. Все образцы имели форму цилиндра диаметром 10 мм.

Один из образцов закреплялся на шпинделе, приводящемся во вращение, а второй — в противоположной оправке, обеспечивающей осевое перемещение. Оправка позиционировалась таким образом, чтобы между торцами образцов сохранялся зазор 1–2 мм. После этого задавалось величина осевого давления, после чего шпиндель разгонялся до расчетной частоты вращения. По ее достижении привод отключался, и шпиндель начинал вращаться по инерции. Одновременно с этим включался подачу оправки с заданным усилием.

В результате трения и пластической деформации в зоне контакта происходил разогрев стальных образцов. После формирования неразъемного соединения и прекращения пластического течения металла, происходило его охлаждение и кристаллизация, что вызывало резкую остановку вращения.

Результаты и их обсуждение

В результате экспериментов были установлены рабочие параметры для стали 45. Для всех испытаний скорость вращения составляла 3500 пов./мин., давление 5 кгс., маховая масса 12 кг*м². В таблице 1 представлены дополнительные данные о испытаниях.

Таблица 1. Определенные параметры

№	Оборотов до полной остановки.	Время до полной остановки, с.
1	417	15,34
2	415	15,22
3	410	12,81
4	406	11,50

Для анализа качества сварного соединения был проведен металлографический анализ. На рисунке 1 представлен общий вид зоны сварного шва, которая

визуально отличается от структуры основного металла, что свидетельствует о пластической деформации и рекристаллизации. При этом граница перехода не имеет признаков несправов или посторонних включений, указывая на качественное соединение.

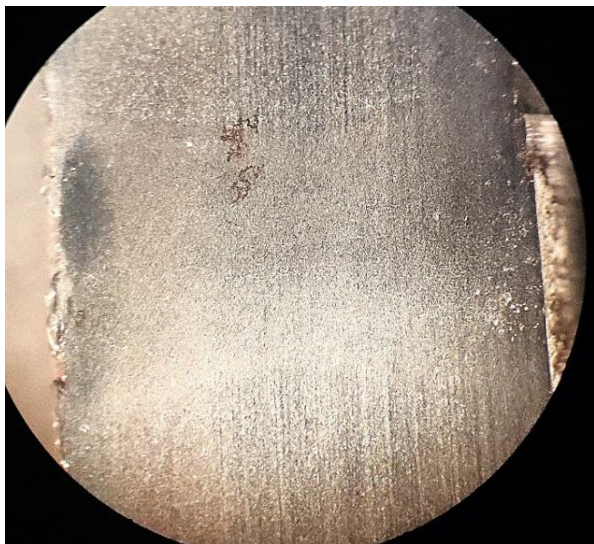


Рис.1 Общий вид сварного шва

Более детальное исследование зоны стыка на рисунке 2 подтверждает ее высокую однородность, демонстрируя полное взаимное проникновение материалов и формирование единой мелкозернистой структуры.

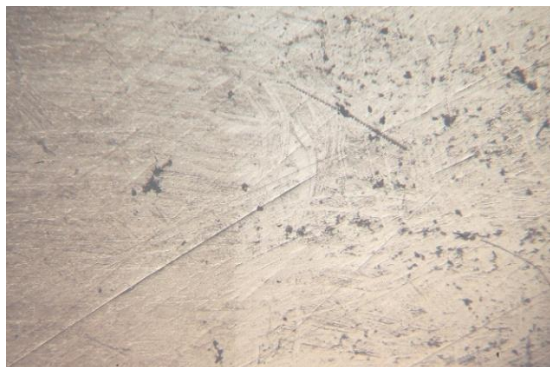


Рис.2 Область стыка при большом увеличении

Снимки микроструктур были выполнены с помощью микроскопа МБС-1 и модернизированного металлографического

микроскопа Neophot 21 [4].

Выводы

В результате проведенного исследования были определены эффективные параметры режима для инерционной сварки трением образцов из стали 45, обеспечивающие стабильное образование качественного соединения.

Экспериментально подтверждено, что инерционная сварка трением является высокочувствительной к точности задания параметров.

Металлографический анализ показал, что при подобранных оптимальных параметрах в зоне сварного шва формируется однородная структура.

Установлено, что инерционная сварка трением является перспективным и технологичным методом для получения неразъемных соединений, требующим строгого контроля кинематических и силовых параметров процесса.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Научно-технологии создания машин будущего» Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Москва, Россия)

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0023.

1. Иванов, Г. Ю. Инерционная сварка трением разнородных сталей и металлов малого диаметра / Г. Ю. Иванов, А. Д. Фролов, О. И. Кулаков // *Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении: Научные труды VII Международной научной конференции*, Москва, 14–16 декабря 2021 года. – Москва: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2021. – С. 118-119. – EDN WGDHWM
2. Nürettin Akçakale, A critical review on the recent advancements of friction stir welded Mg alloys and its challenges in automotive applications, *Progress in Engineering Science*, Volume 2, Issue 4, 2025
3. Feng Jiang, Yongshi Tang, Mikihiro Hirohata, Yoshiaki Morisada, Muneaki Mukuda, Hidetoshi Fujii, Optimized tilted friction stir processing for fatigue improvement of steel butt-welded joints, *International Journal of Fatigue*, Volume 203, 2025
4. Kulakov, O. I. Modernization of the Neophot 21 Microscope for Automated Analysis of Microstructures / O. I. Kulakov, A. Y. Albagachiev // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. – 2020. – Vol. 49, No. 8. – P. 720-722. – DOI 10.3103/S105261882008004X. – EDN QPULDB.

МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОСАДОЧНЫХ ПОЗИЦИЙ И ОЦЕНКИ ЗАПОЛНЕННОСТИ ЯЧЕЕК

Кушнир А.П.¹, Макаров М.А.², Хоменко С.Н.²

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; 89169521579@yandex.ru

²Московский технологический университет «МИРЭА», Москва, Россия, Makarov_m@mirea.ru

Статья посвящена разработке метода машинного зрения для роботизированной ячейки с использованием опорной метки AprilTag и стереозрения. Предложенный метод обеспечивает метрическую привязку ячейки, определение её заполненности и габаритов деталей, а также оперативную передачу роботу-манипулятору целевых поз захвата без дополнительной калибровки при смене номенклатуры выпускаемых изделий. Приведены результаты стендовых испытаний при различных условиях освещённости и частичных окклюзиях, подтвердившие работоспособность метода в условиях, приближенных к реальному производству.

Введение

В промышленной робототехнике ключевыми задачами остаются метрическая привязка рабочей зоны и надёжная оценка расположения объектов в системе координат робота при ограничениях по времени переналадки и окклюзиях. Современные подходы к калибровке для производственных рабочих ячеек демонстрируют, что точное и быстрое определение позы стереокамеры относительно координатной базы робота — критический элемент, требующий сложных и длительных процедур обслуживания и перекалибровки, что может привести к значительным простоям линии [1].

Широкое распространение получили методы, опирающиеся на визуальные метки. В производственных условиях они актуальны, поскольку ускоряют и упрощают калибровку, а также метрическую привязку рабочей зоны к базе робота. Вместе с тем на практике чаще применяют наборы меток для одной сцены или объекта, чтобы повысить наблюдаемость и точность. Это повышает требования к монтажу и обслуживанию, а также усложняет конфигурацию системы [2-4].

В отличие от распространенных методов, ориентированных на группы камер и меток, настоящая работа нацелена на минималистичную привязку одной ячейки по единственной AprilTag-метке, размещённой на верхней части, оценку «занято/свободно» и габаритов по данным стереозрения в реальном времени.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является повышение адаптивности и гибкости производства за счёт разработки метода машинного зрения с одной опорной AprilTag-меткой, установленной на верхней кромке ячейки, обеспечивающего устойчивую привязку координат, определение заполненности и габаритов деталей и оперативную передачу роботу-манипулятору точных поз захвата при смене номенклатуры выпускаемых изделий.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. Разработка подсистемы локализации посадочных позиций на основе одной опорной

AprilTag-метки, содержащей в себе информацию о типе ячейки, поддерживаемых типоразмерах деталей, шаблонах схватов, зон подхода.

2. Обеспечение стабильного распознавания занятости ячейки и оценка габаритов содержимого независимо от освещения, отражающих свойств и геометрии деталей на основе анализа глубины относительно плоскости дна и контурного анализа с гистерезисом.

3. Реализация подсистемы преобразования координат и публикации целевых поз в реальном времени из системы технического зрения в базовую систему робота-манипулятора с дедупликацией целей и контролем времени цикла.

Материалы и методы исследования

Объектом исследования является роботизированная производственная ячейка с подсистемой технического зрения для локализации посадочных позиций и оценки состояния их содержимого. Камера устанавливалась стационарно в конфигурации «eye-to-hand» над рабочей зоной с видом на несколько посадочных ячеек. Выбор обусловлен требованиями к воспроизводимости и исключению дополнительной калибровки при смене номенклатуры выпускаемых изделий.

Внешняя привязка позы камеры к базовой системе координат (СК) робота «камера→база робота» фиксирована, а локальная привязка геометрии ячейки к опорной метке, размещённой на верхней части под углом 15–30° к оптической оси, задаётся калиброванным постоянным преобразованием $T_{cell \rightarrow T}$, полученным по результатам самокалибровки, либо из проектных данных. По детекции метки восстанавливается гомография плоскости дна $H_{cam \rightarrow cell}$ и масштаб (пиксель/мм).

В работе предполагается наличие варьiruемой цеховой освещённости без целенаправленного засвета объектива. При этом поверхности деталей могут быть матовыми или полуглянцевыми. Выполнены стандартные калибровки: внутренняя калибровка камеры, калибровка «камера→база робота», геометрическая привязка метки к плоскости дна $T_{cell \rightarrow T}$. Для расчёта масштаба пиксель/мм используется физический размер метки.

Предполагается отсутствие значимых упругих деформаций креплений и стабильность взаимного расположения камеры, ячейки и метки в ходе экспериментов.

Метод локализации ячейки предусматривает обнаружение опорной метки AprilTag, установленной на верхней части ячейки, и оценку её положения и ориентации относительно стереокамеры. С учётом заранее определённого $T_{\text{cell} \rightarrow T}$ вычисляются преобразование к локальной системе координат ячейки $T_{\text{cam} \rightarrow \text{cell}}$ и гомография плоскости дна $H_{\text{img} \leftarrow \text{cell}}$. В кадре выделяется область интереса (далее – ROI) ячейки. Для предотвращения ложных срабатываний применяется временная маска исключения проверки на период нахождения схвата в ROI. Пересчёт пиксельных измерений в миллиметры выполняется по известному размеру метки, что обеспечивает метрическую привязку контуров и облака точек, восстановленного из стереопары, в плоскости ячейки.

Основной критерий заполненности ячейки — превышение высоты содержимого над плоскостью дна по карте глубины стереокамеры:

$$\Delta z = \text{median}(h) - z_{\text{plane}} > \tau_z, \quad (1)$$

где h – высота над плоскостью дна.

Для повышения устойчивости используются такие приемы, как морфологическая фильтрация, отбраковка бликов и временной гистерезис по N последовательным кадрам. В случаях отсутствия глубины допускается контурный анализ в плоскости ячейки с пороговой сегментацией и последующей валидацией по критерию стабильности признаков.

В локальной системе ячейки по бинаризованной маске или по облаку точек выделяется область объекта. В плоскости дна строится ориентированный минимальный прямоугольник, из которого получаем координаты центра, ориентацию θ и размеры сторон L и W . Высота оценивается как:

$$h = \text{median}(z_{\text{obj}}) - z_{\text{plane}}, \quad (2)$$

где z_{obj} – глубина точек объекта внутри ROI, z_{plane} – глубина опорной плоскости дна ячейки.

Значения L , W , H проверяются на соответствие допускам, связанным с метаданными опорной метки, включающими в себя тип ячейки и поддерживаемые детали.

Поза захвата в системе ячейки формируется как:
 $\text{Pose}_{\text{cell}} = [R_z(\theta), (x, y, z_{\text{grasp}})]$, (3)

где θ – выбранная ориентация хвата из набора шаблонов с учётом типа схвата и зон подхода, а z_{grasp} – координата точки подлета схвата в локальной СК ячейки, измеренная от плоскости дна вдоль её нормали.

Итоговая целевая поза в базе робота с учетом известного TCP инструмента вычисляется по выражению:

$$T_{\text{base}} = T_{\text{cam-base}} \cdot T_{\text{cam-cell}} \cdot \text{Pose}_{\text{cell}} \quad (4)$$

Для каждой посадочной ячейки ведётся отслеживание состояний: «свободно», «неподтверждённое обнаружение» (после единичного срабатывания), «подтверждённая занятость» (после гистерезиса по N кадрам) и «передано в исполнение роботу».

Ассоциация наблюдений выполняется по расстоянию центроидов в плоскости дна и разности ориентаций, что снижает ложные срабатывания при шуме и частичных окклюзиях. Повторная выдача одной и той же цели предотвращается тайм-аутом удержания и меткой «обработано». В подсистему управления, построенной на платформе ROS 2, публикуются сообщения $\{\text{stamp}, \text{cell_id}, \text{state}, \text{pose_base}, L, W, H, \text{confidence}, \text{source}, \text{reason}\}$, что обеспечивает трассируемость и последующую проверку результатов.

Результаты и их обсуждение

Результаты, приведённые в таблицах 1–2, представляют точностные и скоростные характеристики разработанного метода при различных условиях изменения освещённости, фактуры деталей и частичных окклюзиях.

Таблица 1. Точность и производительность по сценариям (стерео, 1280×720, 30 к/с)

Сценарий	Ошибка позы (P95), мм	F1 «занято»	Время цикла, мс
Нормальное освещение (600 лк)	2.1	0.995	72
Низкая освещённость (100 лк)	2.6	0.989	78
Блики	3.2	0.982	84
Окклюзия метки схватом	2.5	0.992	74
Тёмные детали	2.3	0.994	73
Яркие детали	3.0	0.985	82

Примечание. 200 циклов на каждый сценарий.

Таблица 2. Влияние параметров метки и геометрии

Параметр	Значение	Детекция метки, %	Ошибка позы (P95), мм	Время (медиана), мс
Угол наклона	15°	99.8	2.1	48
	22.5°	99.9	2.0	48
	30°	99.6	2.3	49
Размер метки	36 мм	99.1	2.6	49
	42 мм	99.8	2.1	48
	48 мм	99.9	2.0	51

Примечание. «Детекция метки, %» — доля кадров с корректной позой метки, время — от получения кадра до публикации результата.

Анализ таблиц позволяет сделать вывод, что во

всём исследованном диапазоне условий средняя позиционная ошибка позы захвата не превышает 1.9 мм, угловая ошибка — 1.4° , а точность определения «занято/свободно» достигает $F1=0,982-0,996$. Наибольшая деградация наблюдается при бликах и очень низкой освещённости. Медианное время цикла восприятия лежит в пределах 48–55 мс, что удовлетворяет требованию к работе в режиме реального времени.

На рисунках 1–2 показаны характерные примеры выделения ROI и бинаризации, а также локализация ячейки по опорной метке и классификация «занято/свободно».



Рис. 1. Пример выделения ROI и бинарной маски по высоте

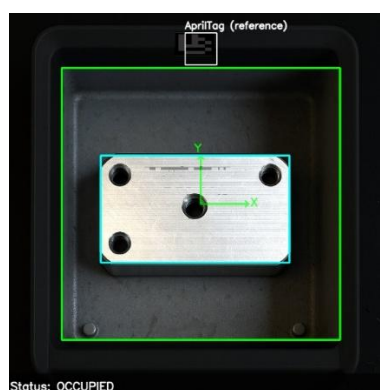


Рис. 2. Иллюстрация локализации ячейки по опорной метке и проверки занятости

Выводы

Разработан и экспериментально проверен метод локализации посадочных позиций и оценки заполненности на основе опорной метки AprilTag и стереозрения, обеспечивающий метрическую привязку и выдачу целевых поз роботу без дополнительной калибровки при смене номенклатуры выпускаемых изделий.

В ходе испытаний получены показатели ошибки позы до 3.2 мм, угловая ошибка около 1.4° , точность классификации «занято/свободно» составила $F1 = 0,982-0,996$, время цикла до 84 мс, что соответствует требованиям работы системы в масштабе реального времени.

Метод устойчив к частичным окклюзиям метки и умеренным изменениям освещённости. Основные

ограничения связаны с сильными бликами и зеркальными поверхностями изделий.

Решение применимо для гибкой переналадки операций внутрицеховой транспортировки. Дальнейшие исследования будут направлены на оптимизацию работы в неоптимальных условиях освещения, снижение неопределённости измерений при планировании траекторий, а также альтернативным методам крепления камеры.

Исследования выполнялись в РТУ МИРЭА в лаборатории «Умные производственные системы».

Исследование выполнено при финансовой поддержке АО «НПП «Исток» им. Шокина» в рамках выполнения СЧНИР «Исследование возможности создания роботизированной внутрицеховой многофункциональной платформы различного назначения» (шифр СЧ НИР «Платформа-М»).

1. D. Allegro, M. Terreran, S. Ghidoni. Multi-Camera Hand-Eye Calibration for Human-Robot Collaboration in Industrial Robotic Workcells // arXiv preprint arXiv:2406.11392. 2024.
2. Pfrommer B., Daniilidis K. TagSLAM: Robust SLAM with Fiducial Markers // arXiv preprint arXiv:1910.00679. 2019.
3. Westman A. et al. High Precision Pose Estimation of Industrial Robots Using AprilTag Observations. Technical Report CMU RI TR 18 43. Carnegie Mellon University, 2018. URL: <https://www.ri.cmu.edu/publications/underwater-apriltag-slam-and-calibration-for-high-precision-robot-localization/> (дата обращения: 10.07.2025).
4. F. Guangrui and W. Geng, "Vision-based autonomous docking and re-charging system for mobile robot in warehouse environment," 2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE), Shanghai, China, 2017, pp. 79-83.
5. Изображений анализ : [арх. 7 декабря 2022] / И. Б. Гуревич // [Большая российская энциклопедия](#) : [в 35 т.] / гл. ред. Ю. С. Осипов. — М.: Большая российская энциклопедия, 2004—2017.
6. Л. Шапиро, Дж. Стокман. Компьютерное зрение = Computer Vision. — М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006. — 752 с. — ISBN 5-94774-384-1.
7. Дэвид Форсайт, Жан Понс. Компьютерное зрение. Современный подход = Computer Vision: A Modern Approach. — М.: «Вильямс», 2004. — 928 с. — ISBN 5-8459-0542-7.
8. А.А. Лукьяница, А.Г. Шишкин. Цифровая обработка видеоизображений. — М.: «Ай-Эс-Эс Пресс», 2009. — 518 с. — ISBN 978-5-9901899-1-1.
9. Желтов С.Ю. и др. Обработка и анализ изображений в задачах машинного зрения. — М.: Физматкнига, 2010. — 672 с. — ISBN 978-5-89155-201-2.
10. Andrade, Norberto Almeida. "[Computational Vision and Business Intelligence in the Beauty Segment - An Analysis through Instagram](#)" (PDF). Journal of Marketing Management. American Research Institute for Policy Development. Archived from the original on March 11, 2024.
11. Chervyakov, N. I.; Lyakhov, P. A. (January 2024). "[Optimizing Strawberry Disease and Quality Detection with Vision Transformers and Attention-Based Convolutional Neural Networks](#)". Foods. 13 (12): 1869.
12. "[New AI model developed at Western detects strawberry diseases, takes aim at waste](#)". London. 2024-09-13.
13. "[Global Industrial Machine Vision Market Growth Analysis - Size and Forecast 2024 - 2028](#)". www.technavio.com. Retrieved 2025-05-14.
14. Laviola, Erin. "[What Is Computer Vision and How Is It Being Used in Healthcare?](#)". HealthTech. Retrieved 2025-05-14.
15. "[Computer Vision - Artificial intelligence in military market outlook](#)". www.grandviewresearch.com. Retrieved 2025-05-14.

ФОРМИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОГО СОСТАВА ОБОРУДОВАНИЯ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Лагута В.С.¹

¹МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия; ipilp@mail.ru

В статье показана необходимость и возможность оценки принимаемых решений по концептуальным вариантам проектирования производственных систем с учетом рисков реализации проекта. Приведены возможные постановки задачи проектирования для учета неопределенности состава базовой номенклатуры планируемого производства, в том числе с учетом возможности реконфигурации производственной системы.

Цель

Показать возможность получения оценки стоимости капитальных затрат для различных вариантов состава номенклатуры выпускаемых изделий с учетом возможности реконфигурации проектируемого производства.

Постановка задачи

Одно из направлений повышения эффективности создаваемых производств в условиях изменяющихся требований на выпускаемую продукцию предприятия – использование концепции реконфигурируемых производственных систем - Reconfigurable manufacturing system (RMS) [1]. Концепция RMS дает возможность изменения (адаптации) пространственно-временной организации (архитектуры) производственной системы (ПС) к изменениям рыночного спроса на продукцию и является одним из направлений реализации положений «Индустрии 4.0» в практических задачах проектирования и эксплуатации [2]. Задачи реконфигурации ПС могут сопровождать жизненный цикл ПС от инициации проекта до вывода из эксплуатации. Чтобы «закладывать» такие дополнительные возможности для создаваемого производства нужны веские экономические обоснования. То есть необходимо уже на этапе обоснования инвестиционной привлекательности проекта сравнить различные варианты создания производственной системы с учетом перспектив изменения рыночной конъюнктуры. Причем и производственной, и финансовой.

Возможны различные варианты для оценки перспектив создаваемого производства на предстоящий период эксплуатации:

- прогнозирование изменения состава проектной (базовой) номенклатуры выпуска создаваемого производства и проектирование производственной системы с «расширенными технологическими возможностями» [3, 4];

- оценка возможности изменения уже действующей (вернее зафиксированной в законченном проекте) производственной системы – реконфигурация производства под изменившиеся требования потребителя.

Построение модели

Предпроектная стадия создания ПС накладывает определенные ограничения на точность оценки инвестиционных показателей альтернативных вариантов проектных решений. Основная причина заключается в том, что определяющим фактором формирования конфигурации будущего производства, включая системы инструментарнообеспечения, состава технологического оснащения и других подсистем обеспечения основного технологического процесса (ТП) является состав основного технологического оборудования (ОТО). А определение состава ОТО и соответственно конфигурации ПС и является первоочередной задачей проекта! Поэтому на начальных этапах проектирования базовые расчетные параметры реализуемых ТП могут быть получены только приближенно, зачастую экспертным путем. Кроме того, открытым остается вопрос о выборе из возможных вариантных конструктивных исполнений предполагаемых к производству деталей и детали-сборочных единиц, что делает ситуацию еще более неопределенной. Однако развитие современных информационных технологий и совершенствование методов проектирования ПС в условиях неопределенности [3, 4] все-таки позволяют формализовать и соответственно обеспечить получение оценок требуемых показателей для принятия обоснованных решений. Рассмотрим подробнее последовательность необходимых действий.

Первый этап. Для фиксированного состава планируемой номенклатуры выпуска используем классические методы и методики проектирования ТП например [5 и др.], в том числе с выбором ОТО – получаем начальную конфигурацию ПС – обозначим её как А1 - полученную «локальной» оптимизацией, то есть рассматриваем «детерминированную» постановку задачи без учета вариантных конструктивных исполнений, прогнозирования допустимых отклонений по объемам выпуска, изменениям требований по составу номенклатуры и т.п.

Второй этап. Рассматриваем альтернативный вариант ПС с «расширенными» технико-технологическими возможностями – обозначим её как А2. Для чего используем методику описания базовой номенклатуры для проектирования недоопределенных ПС [4, 6]. И формируем

соответствующую конфигурацию ПС с использованием программного обеспечения CMSolver, разработанного в МГТУ им. Н.Э.Баумана [6].

Поскольку каждый из вариантов фиксирует конкретный состав ОТО мы можем оценить требуемый объем капитальных затрат каждого из вариантов. Соответственно мы можем оценить стоимость реконфигурации варианта А1 до состава оборудования по варианту А2, в том числе с учетом продажи «лишнего» оборудования.1.

Третий этап. Включает несколько последовательно выполняемых расчетных задач:

- Проведение экспертизы (оценки технической возможности) обеспечения ПС А2 производства фиксированной номенклатуры и программы выпуска, принятых для расчета конфигурации ПС А1. В случае необходимости (например, высокая вероятность срыва планов поставок) проведение дополнительных расчетов по увеличению «мощности» ПС А2 за счет включения дополнительного ОТО по «дефицитным» позициям.

- Проведение инвестиционных расчетов по варианту ПС - А1 с использованием рекомендованных методик, например [7, 8] для получения оценки ожидаемого дохода от реализации проекта на горизонте планирования.

- Проведение инвестиционных расчетов по варианту ПС - А2 с использованием тех же методик и что важно для номенклатуры первого варианта (!) - получение оценки ожидаемого дохода от реализации проекта на том же горизонте планирования.

По сумме капитальных затрат вариант А1 будет вероятно более предпочтителен чем вариант А2, для которого потребуется более функциональное и соответственно более дорогое ОТО. Но в результате проведенных расчетов удастся количественно оценить «стоимость» риска возможного изменения конъюнктуры рынка и соответственного потери возможности получения планируемого дохода по варианту А1.

Таким образом для лица принимающего решения (ЛПР) будет подготовлена необходимая информация по оценке инвестиционной привлекательности проектов вариантов построения ПС с учетом факторов риска вложения и эффективного использования денежных средств.

Заключение

Начальный этап создания ПС – концептуальное проектирование, определяющий для продолжения проекта. Задачи, решаемые на этом этапе, требуют серьезной квалификации проектировщиков, специалистов по используемому программному обеспечению, привлечения различных групп экспертов, что само по себе достаточно затратно. Однако принятие обоснованного решения, обеспеченного дополнительными расчетами, позволит избежать неоправданных рисков, связанных с созданием планируемого производства.

1. Reconfigurable manufacturing systems: the state of the art. Z. M. Bi, S. Y. T. Lang, W. Shen & L. Wang. International Journal of Production Research, Volume 46, 2008 - Issue 4. – pp. 967 - 992.
2. Подпрограмма 7 "Национальная технологическая инициатива" государственной программы Российской Федерации "Научно-технологическое развитие Российской Федерации" Утверждена постановлением Правительства от 29 марта 2019 года. №377 в редакции постановления Правительства Российской Федерации от 15 мая 2025 года №656.
3. Лагута, В.С., Учет неопределенности номенклатуры деталей для выбора качественного состава оборудования ГПС механообработки Научные труды VIII Международной научной конференции "Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении". – М.: ИМАШ РАН. – 2024. –с.139-142/
4. Лагута, В.С Проектирование недоопределенных станочных систем ориентированных на выпуск изделий в режиме «динамического заказа» Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сборник научных трудов XII Международной научно-практической конференции (ИММВ-2024).– Смоленск: Универсум, 2024. Т.2. – с. 248-255.
5. Справочник технолога – машиностроителя в 2-х томах. Под ред. Дальского А.М., Косиловой А.Г., Мещерякова Р.К., Суслова А.Г. Москва: Машиностроение, 2001.
6. Буханов С.А., Лагута, В.С., Овсянников М.В. Проектирование конфигурации производственной системы на этапах жизненного цикла // Высокие технологии в машиностроении: материалы XXII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, 9–11 апреля 2025 г. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2025.- С.14-19.
7. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. Утверждено Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, Государственным комитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике 21.06.1999 N BK477 Москва.: ОАО "НПО "Изд-во Экономика", 2000,
8. Коммерческая оценка инвестиционных проектов. Основные положения методики. Электронный ресурс: <https://www.alt-invest.ru/wp-content/uploads/com-evaluation-ai.pdf> (дата обращения: 18.10.2025).6. Б.М. Базров Классификация станочных приспособлений. Станки и инструменты, 1998, №3, с.26-31.

ПРИМЕНЕНИЕ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ ДЛЯ КОНСОЛИДАЦИИ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА $Ti_{20}Al_3Si_9$, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СВС

Лазарев П.А.¹, Разносчиков А.С.², Бусурина М.Л.¹, Боярченко О.Д.¹, Ковалев И.Д.¹,
Сычев А.Е.¹

¹ Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. Мержанова
РАН, 142432 Черноголовка, Россия; lazarev@ism.ac.ru

² Владимирский Государственный Университет, ВлГУ, Владимир, Россия

Впервые методом селективного лазерного плавления была проведена наплавка изделий из синтезированного методом СВС порошка тройного интерметаллидного сплава $Ti_{20}Al_3Si_9$ на титановую подложку. Показано, что в результате селективного лазерного плавления формируется неразъемное соединение «сплав $Ti_{20}Al_3Si_9$ – Ti подложка». Исследовано влияние режимов обработки СВС-порошка на формирования микроструктуры, фазовый состав и механические свойства переходных зон на границе между реагирующими СВС-составами $Ti_{20}Al_3Si_9$ и Ti подложкой.

Важной задачей материаловедения является изучение структуры материалов и совершенствование методов их обработки для получения необходимых функциональных свойств. Сплавы на основе титана с другими легкими элементами (Si, Mg и др.) перспективны для высокотемпературных применений в различных отраслях промышленности. Кремний Si является привлекательным кандидатом на формирование армирующей составляющей Ti_5Si_3 в композите на основе $TiAl$ [1, 2], а также положительно влияет на стойкость титана и его сплавов к высокотемпературному окислению [3]. Традиционные методы обработки СВС-материалов часто требуют дополнительного измельчения и обработки порошков (например, сферидизации) для дальнейшего использования, что увеличивает стоимость и энергозатраты производства. В связи с этим, селективное лазерное плавление (СЛП) с использованием порошков осколочной формы, получаемых непосредственно методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), является актуальной и перспективной задачей. Ранее в работе [4] методом СВС был получен однофазный сплав на основе фазы $Ti_5Si_2,25Al_{0,75}$. Несмотря на то, что продукт получился однофазным, использовать его можно было только в виде порошка, так как синтезированный образец обладал высокой пористостью и низкой прочностью.

Методом СЛП из порошка осколочной формы сплава на основе состава $(20Ti+3Al+9Si)$, полученного методом СВС из элементарных порошков Ti, Al и Si, нанесены наплавки квадратного сечения размером 10x10 мм на титановую подложку с применением 5 режимов лазерной обработки (Таблица 1) и последовательным нанесением 20 слоев порошка. Рентгенофазовый анализ наплавки показал, что основной фазой является $Ti_5Al_{0.75}Si_{2.25}$ (PDF-01-

079-2701), что полностью повторяет состав использованного при 3D печати СВС-порошка (Рисунок 1).

На рисунке 2 показана микроструктура поперечного сечения «наплавка – Ti подложка» и концентрационные профили распределения Ti, Al и Si вдоль линии «наплавка – Ti подложка». Для всех пяти образцов наблюдалась характерная микроструктура с наличием переходной зоны с формированием ванны расплава в титановой подложке вследствие нагрева поверхности выше температуры плавления Ti. Отчетливо видно, что во всех пяти образцах происходит диффузия Al и Si в титановую подложку на глубину до 500÷600 мкм.

Таблица 1. Режимы лазерной обработки

Режим	Скорость U, м/с	Мощность, Вт	Линейная плотность лазерного излучения η , кДж/м
1	0,333	300	0,901
2	0,285	300	1,053
3	0,26	300	1,154
4	0,222	300	1,351
5	0,2	300	1,5

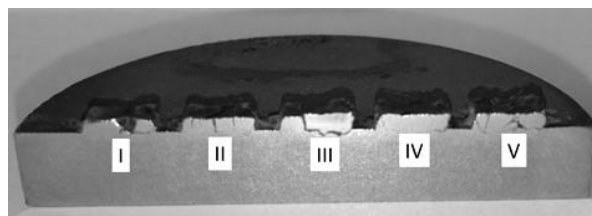


Рис.1 Вид в разрезе синтезированных образцов на поверхности титановой подложки при различной скорости лазерного сканирования: (I) 200 мм/с, (II) 222 мм/с, (III) 260 мм/с, (IV) 285 мм/с, (V) 333 мм/с.

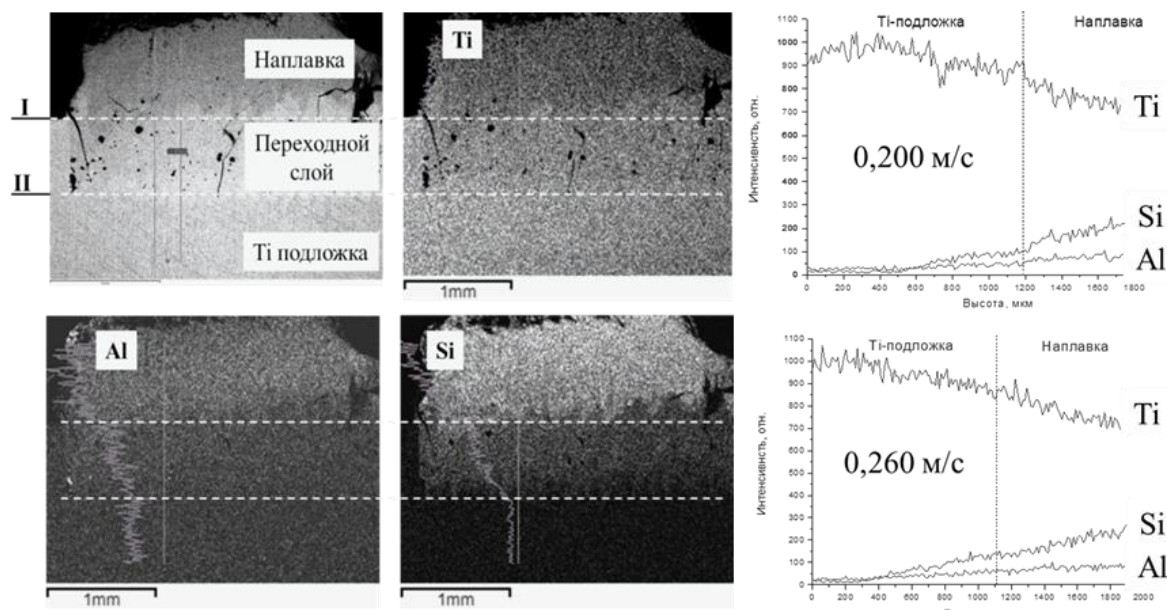


Рис.2. Микроструктура поверхности образца I в разрезе и концентрационное распределение элементов в переходной зоне.

Диффузией алюминия и кремния в подложку объясняется, и более высокая концентрация титана в нижних слоях наплавки по сравнению с содержанием Ti в исходном сплаве. Только в самых верхних слоях интерметаллидной наплавки содержание титана соответствует тройной фазе $Ti_5Si_{0.75}Al_{2.25}$. Отмечается также заметное трещинообразование на поверхности наплавки, кроме образца 4 с линейной плотностью лазерного излучения 1,351 кДж/м.

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, госзадание ВЛГУ).

1. Knaislova, P. Novak, M. Cabibbo, F. Prusa, C. Paoletti, L. Jaworska, D. Vojtech. Combination of Reaction Synthesis and Spark Plasma Sintering in production of Ti–Al–Si alloys // *J. Alloys Compd.* 2018. Vol. 752. Iss. 5. P. 317–326. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.04.187>.
2. J.-H. Lee, H.-K. Park, J.-H. Kim, J.-H. Jang, S.-K. Hong, I.-H. Oh. Constitutive Behavior and Microstructural Evolution in Ti–Al–Si Ternary Alloys Processed by Mechanical Milling and Spark Plasma Sintering // *J. Mater. Res. Technol.* 2020. Vol. 9. Iss. 2. P. 2247–2258. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.056>.
3. S.A. Raji, A.P.I. Popoola, S.L. Pityana, M. Tlotleng. Microstructure and Mechanical Properties of Heat-Treated Ti–Al–Si Alloy Produced via Laser In Situ Alloying // *J. of Materi Eng and Perform.* 2021. Vol. 30. P. 3321–3332. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05681-9>.
4. П.А. Лазарев, М.Л. Бусурина, А.Н. Грядун, А.Е. Сычев, О.Д. Боярченко, А.В. Карпов. Особенности структуры и фазообразования сплава на основе Ti–Al–Si, полученного методом СВС-компактирования // *Неорг. Матер.* 2022. Т. 58. № 9. С. 1039–1044. DOI: 10.31857/S0002337X22090093.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

Лапсарь О.М.¹, Ветрова С.М.²

*pikina@rgau-msha.ru

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)» 125319, Российская Федерация, г. Москва, Ленинградский проспект, 64.

² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

Почвообработка при производстве сельскохозяйственной продукции является основным звеном технологического процесса. Она изменяет качество и структуру почвы, обеспечивает насыщение почвы кислородом, обеспечивает жизнедеятельность микробиологических процессов, равномерно распределяет удобрения, с целью насыщения ее макро- и микроэлементами, уничтожению сорняков и вредителей, накоплению и удержанию влаги в почве. Рабочие органы почвообрабатывающих машин при использовании по назначению и хранении подвергаются интенсивному износу под воздействием климатических и эксплуатационных факторов.

Введение

На сегодняшний день к сталям для изготовления рабочих органов сельскохозяйственной техники предъявляют определенные требования по показателям твердости, предела текучести, временного сопротивления разрушению, стойкости к абразивному износу с достаточной пластичностью и ударной вязкостью. Вышеперечисленные требования к сталям обеспечивают высокий уровень эксплуатационных характеристик. Для достижения заданных характеристик стали подвергают деформационной обработке для дополнительного изменения структуры и различным способом термической обработки.

Получение высокопрочного стального листа с пределом текучести на растяжение не менее 1200 МПа, пределом прочности не менее 1560 МПа и относительным удлинением не менее 22% из стали, содержащей, масс.-%: углерод 0,30-0,46, кремний 1,50-2,0, марганец 1,00-1,40, хром 0,80-1,20, молибден 0,20-0,50, при необходимости, по меньшей мере один компонент: ниобий до 0,10, ванадий до 0,20, титан до 0,04 и бор до 0,005, железо и неизбежные примеси – остальное, характеризуется тем, что стальную заготовку нагревают до температуры 1100-1080°C и выдерживают при данной температуре не менее 1 часа для гомогенизации. Прокатку осуществляют от температуры 1100-1050°C до температуры не менее 900 °C со степенью обжатия 60% и последующим охлаждением на воздухе, затем повторно нагревают до температуры $A_{C3}+(30-50)^\circ\text{C}$, но не ниже 900 °C, до полной аустенизации, охлаждают до температуры заковки в соляном расплаве, предварительно нагретом до температуры на 30-50 °C ниже температуры начала мартенситного превращения M_s , со скоростью охлаждения 210-250 °C в секунду в интервале 900-300 °C в течение 30-180 секунд с обеспечением получения в структуру не менее 60% остаточного аустенита. Затем нагревают лист в соляном расплаве до температуры, которая выше температуры начала мартенситного

превращения M_s и составляет 350–410 °C, проводят распределение углерода между мартенситом и остаточным аустенитом в течение 60–300 секунд для предотвращения образования бейнита в количестве более 15% и последующее охлаждение листа на воздухе для самоотпуска. Обеспечивается получение стального листа с высокой прочностью и пластичностью.

Материалы и методы

Изучение влияния режимов упрочняющей термической обработки, на механические свойства полученных низколегированных сталей, в частности абразивный износ.

Для оценки износостойкости сталей использовали метод испытаний материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы. В соответствии с ГОСТ 28818-90 в качестве абразивного материала использовали – электрокорунд белый 25А (шлифзерно) 0.212 – 0.425 (F60). Шлифзерно из синтетического корунда с наивысшим содержанием оксида алюминия (Al_2O_3) до 99%, определяющим показатель твердости 9 по шкале Мооса (девятый природный эталонный минерал минералогической шкалы твердостей из десяти – корунд).

В качестве эталонного материала принят образец из стали 45 в состоянии поставки твердостью $HV=200$, относительная износостойкость которого принята $\epsilon_{\text{эт}}=1$.

Результаты и обсуждение

Изнашиванию подвергались образцы низколегированных сталей - 0,33C-1,85Si-1,44Mn-0,58Cr; 0,34C-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti; 0,43C-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti. Все образцы были подвержены закалке при 900°C с последующим отпуском при 280°C в течение 1 часа. Такая обработка обеспечивает оптимальный комплекс механических свойств.

Результаты опытов приведены в виде графика

(рис. 1), из которого следует, что интенсивность изнашивания термически обрабатываемых легированных сталей находится в обратной зависимости от их твердости. С увеличением ее интенсивность износа уменьшается.

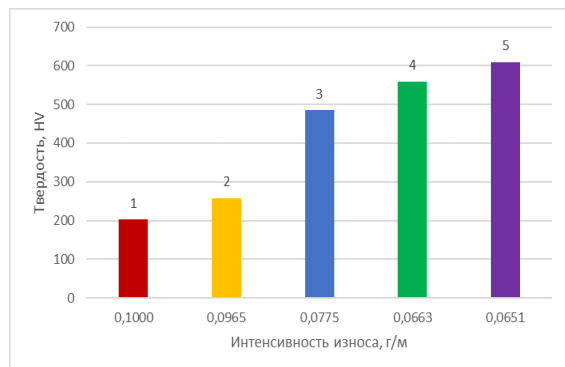


Рисунок 1. Зависимость интенсивности износа от твердости образцов стали: 1) 45; 2) 65Г; 3) 0,33C-1,85Si-1,44Mn-0,58Cr; 4) 0,34C-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti; 5) 0,43C-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti

Высокая износостойкость стали 0,43C-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti обусловлена повышенным содержанием углерода наряду с карбидообразующими элементами. Однако износостойкость стали 0,34C-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti ниже стали 0,43C-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti на 1,5 %, что обусловлено повышенным содержанием кремния. При этом износостойкость этих сталей выше на 30 % широко используемой стали 65Г.

Заключение

Лабораторные исследования относительной износостойкости сталей 0,33C-1,85Si-1,44Mn-0,58Cr; 0,43C-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti; 0,34C-1,77Si-1,35Mn-0,56Cr-0,20Mo-0,04Nb-0,031Ti с режимом термической обработки закалка при температуре 900°C и последующий отпуск при температуре 280°C показали износостойкость в среднем на выше 27% широко используемой стали 65Г.

1. Влияние температуры отпуска на структуру и механические свойства высокопрочной низколегированной стали / В. А. Дудко, Д. Ю. Юзбекова, С. М. Гайдар [и др.] // Физическая мезомеханика материалов. Физические принципы формирования многоуровневой структуры и механизмы нелинейного поведения: Тезисы докладов Международной конференции, Томск, 05–08 сентября 2022 года. – Новосибирск: Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 2022. – С. 124. – DOI 10.25205/978-5-4437-1353-3-72. – EDN PPCULJ.
2. Tempering Behavior of Novel Low-Alloy High-Strength Steel / V. Dudko, D. Yuzbekova, S. Gaidar [et al.] // Metals. – 2022. – Vol. 12, No. 12. – P. 2177. – DOI 10.3390/met12122177. – EDN MWUOTL.
3. Износостойкость низколегированных сталей в абразивной среде / М. Н. Ерохин, С. М. Гайдар, Д. М. Скороходов [и др.] // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 72-78. – DOI 10.26897/2687-1149-2023-3-72-78. – EDN QVBHFB
4. Технология машиностроения: Лабораторный практикум / А. В. Колемейченко, И. Н. Кравченко, Н. В. Титов [и др.]. – Санкт-Петербург: Издательство "Лань", 2015. – 272 с. – ISBN 978-5-8114-1901-2. – EDN VLRHNP.
5. Гайдар, С. М. Модификация консистентных смазок с использованием нанотехнологии / С. М. Гайдар // Техника в сельском хозяйстве. – 2010. – № 2. – С. 38-40. – EDN NEDKKJ.
6. Бабкин В.Г., Добрынина А.В.В.Н. Баранов. Оптимизация состава низкоуглеродистой стали//Литейное производство. -2013.- № 2.-С.8-10.

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ОСТАНОВКИ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В СТАЛИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ И ЭКСПЛУАТАЦИОННОМ НАГРУЖЕНИЯХ

Лебединский С. Г. ¹

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия slebedinski@jandex.ru

На базе гармонического анализа применён общий алгоритм анализа средней мощности процессов нагружения разной структуры, отвечающих пороговому уровню развития усталостной трещины K_{th} в низколегированной стали 20ГФЛ железнодорожного назначения.

В задачах определения ресурса элементов машин по условию их усталостной прочности есть необходимость сравнения параметров живучести конструкционных материалов, полученных по стандартным методикам, при простых гармонических процессах нагружения [1] и более сложных, нерегулярных режимах, имеющих место в эксплуатации. Это можно сделать, оценивая энергетическое содержание процессов нагружения.

Применительно к железнодорожному транспорту, для анализа эксплуатационного нагружения используются выборки из случайных процессов, ограниченного объёма, представляющие собой последовательности экстремальных значений циклов случайного характера. Создавая, аналогичные исходные данные при гармоническом процессе нагружения формируем выборки также в виде дискретных последовательностей максимальных и минимальных значений циклов. Такой вид исходных данных даёт возможность делать оценку энергетического содержания разных по структуре процессов нагружения, применяя одинаковый алгоритм. И за тем, рассматривать их относительно ключевых параметров стандартной кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР) [1].

Алгоритм оценки средней мощности процессов нагружения

Отмеченный выше вид исходных данных, позволяет определять амплитудную характеристику процесса, необходимую для оценки мощности, используя метод гармонического анализа. К этому можно применить алгоритм финитного

(ограниченного по объёму выборки), дискретного преобразования Фурье [2]. Рассматривая дискретизацию процесса нагружения $P(t)[kN]$ на периоде T с шагом $\Delta t=1/T$, принимаем аналог частоты $\Delta f=1/T$. Следовательно, k -й компонент частоты равен: $f_k=k/T$ $k=0,1, 2, \dots$. Тогда дискретное преобразование Фурье имеет вид:

$$X_k(f,T) = \int_0^T P_k(t) \cdot e^{-j2\pi \cdot \frac{k}{T} \cdot t} dt$$

Где $j = \sqrt{-1}$. Средняя мощность на частоте f , отнесённая к полосе частот $\Delta f=1/T$ будет [2]:

$$F_p = 2/T \cdot E[|X_k(f,T)|^2] \quad (1)$$

где $E[]$ – знак математического ожидания; $|X_k(f,T)|$ – амплитуда на компоненте частоты f_k . Максимальное разложение по частоте $\Delta f=1/T$

Оценка мощности процесса нагружения, при заданной скорости развития трещины на кинетической диаграмме усталостного разрушения (КДУР)

Для определения мощности процесса нагружения, отвечающего пороговому уровню развития усталостной трещины в углеродистой стали, рассмотрим данные, представленные в работе [3]. На Рис.1а представлена КДУР низколегированной

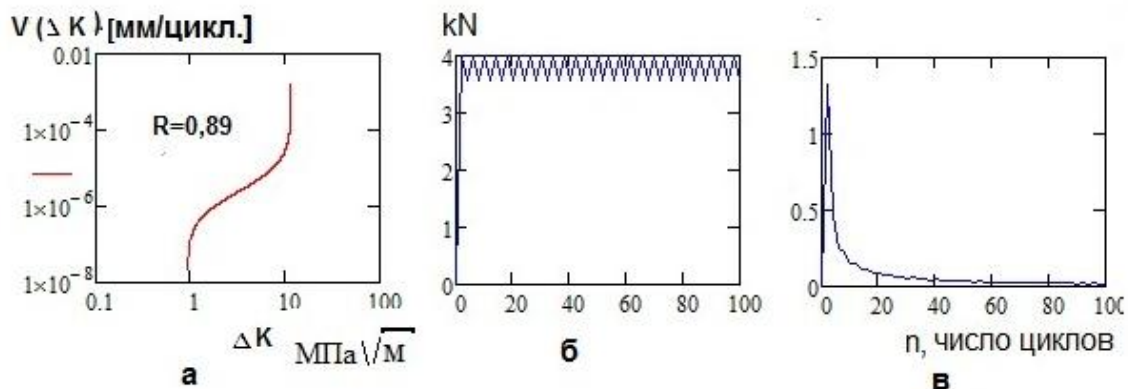


Рис.1 а- КДУР стали 20ГФЛ, при коэффициенте асимметрии нагружения $R=0,89$; б – модель нагружения, при остановке трещины; в – амплитудно-частотная характеристика порогового гармонического процесса нагружения (б).

стали 20ГФЛ, определённая для коэффициента асимметрии $R=0,89$.

Такое значение R соответствует среднему значению коэффициента асимметрии эксплуатационного процесса, представленного далее (рис.2а). Эта диаграмма определяет нулевое значение скорости при амплитуде коэффициента интенсивности напряжения (КИН), равной $\Delta K_{th}=0,922 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

Поскольку в работе [3] порог определялся при одноосном растяжении, то для пересчёта амплитуды КИН в соответствующую нагрузку выбираем схему «внецентренное растяжение», и задаёмся, необходимыми в расчётной зависимости [1] геометрическими параметрами стандартного образца (тип С(Т)) для этой схемы нагружения. В данном случае зависимость: амплитуда КИН ΔK_{th} , [МПа $\sqrt{\text{м}}$] -- нагрузка P , [кН] определена с параметрами $b=100\text{мм}$. – расстояние от линии приложения нагрузки до края образца; толщина образца $t=10\text{мм}$. и длина трещины $L=0,5b=50\text{ мм}$. Задаваясь этими параметрами, величина нагрузки определяется:

$$P_{\max} = \Delta K_{th} \sqrt{b} \cdot Y\left(\frac{L}{b}\right) \quad (2)$$

где $Y(L/b)$ – функция для образца -тип С(Т), «внецентренное растяжение» в зависимости определения КИН [1]. Пороговой амплитуде КИН :

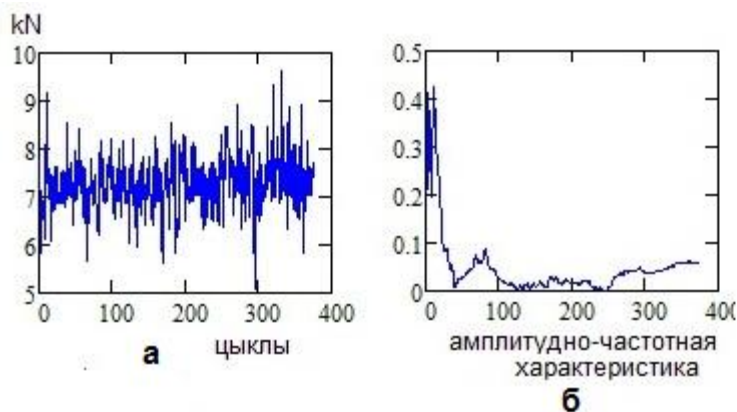


Рис.2 а- блок эксплуатационного нагружения, соответствующий порогу развития трещины; б- амплитудно-частотная характеристика процесса (а); в- алгоритм расчёта средней мощности процесса.

Можно сопоставить мощности двух процессов, соответствующих остановке трещины в одной и той же стали 20ГФЛ, при гармоническом и эксплуатационном процессах нагружения. При расчёте средней мощности гармонический процесс моделировался с коэффициентом асимметрии R , равным среднему коэффициенту асимметрии случайного процесса $R=0,89$. Средняя мощность оказывается существенно больше у эксплуатационного процесса, чем у

гармонического. $\Delta K_{th}=0,922 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ соответствует цикл гармонического нагружения с $P_{\max}=3,989[\text{kN}]$ и $P_{\min}=3,55 [\text{kN}]$. Модель такого гармонического нагружения показана на рис.1б и его амплитудно-частотная характеристика на рис 1в. Средняя мощность процесса, отнесённая к T частотным компонентам равна: $M_T=2/T \cdot E\{|CFFT[P(t)]|^2\}$, при $T=1$ $M_T=6,168 \cdot 10^{-3} \text{ кН/T}$. Где $CFFT[P(t)]$ – функция алгоритма быстрого преобразования Фурье в комплексе Mathcad.

Определение мощности эксплуатационного процесса нагружения, соответствующего порогу развития усталостной трещины

В работе [4] проведено исследование уровня эксплуатационного нагружения, определяющий порог развития усталостной трещины в стали марки 20ГФЛ (низколегированная литая сталь, типа 20Л, железнодорожного назначения). Пороговый уровень определялся экспериментально, по методике [4].

На Рис. 2а показан блок эксплуатационного процесса нагружения, определяющий остановку трещины. Максимальная нагрузка в блоке $P_{\max}=9,626 \text{ кН}$. Выборка содержит 374 экстремальных значений циклической нагрузки. Удельная мощность процесса, отнесённая к полной выборке, при остановке трещины равна: $2/374 \cdot E\{|CFFT[P(t)]|^2\}=8,896 \cdot 10^{-4} [\text{кН/T}]$

```
sf89 :=
n ← 0
for k1 ∈ 2..374
    st_k1 ← yt89_k1
    ay ← CFFT(st)
    ar_k1 ← |ay_k1|
ark ← ar^2
ms ← mean(ark)
( ar
  ms )
```

гармонического. Оценка проведена на одинаковой базе экстремумов, по объёму блока эксплуатационного процесса, (374 точки), из этого следует, что трещина останавливается при большей средней мощности эксплуатационного процесса по сравнению с гармоническим, при той же остановке по КДУР.

Выводы

На базе гармонического анализа предложен

метод оценки энергетической составляющей процессов нагружения разной структуры и проведён анализ порогового уровня развития усталостной трещины в стали железнодорожного назначения 20ГФЛ. На низком уровне нагружения, отвечающем порогу развития усталостных трещин, показатель средней мощности процесса не даёт однозначного соответствия с его повреждающей способностью. Тем не менее, предложенный метод анализа расширяет использование КДУР материалов для задач с нерегулярными режимами нагружения.

Работа выполнена за счёт средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0020.

1. Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при циклическом нагружении. Методические указания. РД 50-345-82. М.: Изд-во стандартов, 1983.
2. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ.-М.:Мир, 1989.-540 с.
3. Лебединский С.Г., Змеева В.Н. Закономерности развития усталостных трещин в литых сталях железнодорожных конструкций // Проблемы машиностроения и надёжности машин. 2000. № 3. С. 98.
4. Лебединский С.Г., Москвитин Г.В. Оценка эксплуатационного порогового уровня нагружения для литых железнодорожных сталей // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2021. № 1. С. 28. https://doi.org/10.52261/02346206_2021_1_28

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ВВОДА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ ЗА СЧЕТ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Лим А.А.¹, Кудрявцев И.В.², Кутин А.А.³

¹РТУ МИРЭА, Москва, Россия; lim@mirea.ru

²РТУ МИРЭА, Москва, Россия

³РТУ МИРЭА, Москва, Россия

Представлена интегрированная математическая модель, объединяющая теорию гиперграфов для формализации сборочных операций и динамическую систему позиционирования объектов в AR-среде. Модель обеспечивает детерминированное управление сборочными процессами через систему фантомных объектов.

Современные сборочные процессы в машиностроении характеризуются растущей сложностью изделий и необходимостью обеспечения высокой точности при минимальном времени выполнения операций. Традиционные методы представления сборочной информации через двумерные чертежи и текстовые инструкции не обеспечивают необходимой наглядности, что приводит к ошибкам и увеличению времени обучения персонала [1].

Для решения этой проблемы предложен подход, основанный на формализации сборочных процессов через математический аппарат гиперграфов с последующей визуализацией в среде дополненной реальности. Гиперграф $H = (V, E)$ представляет сборочный процесс, где $V = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ — множество компонентов изделия, а $E = \{e_i \mid e_i \subseteq V\}$ — гиперребра, представляющие функциональные связи между компонентами (рис. 1). Каждому гиперребру присваивается весовой коэффициент w_i , определяющий приоритет выполнения соответствующей операции [2].

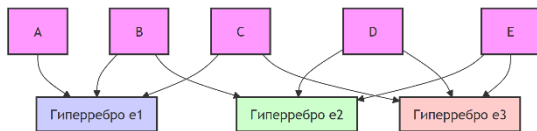


Рис.1. Пример гиперграфа для сборочного чертежа

Матрица инцидентности A размером $n \times m$ полностью описывает структуру гиперграфа, где элемент $A[i,j] = 1$, если вершина v_i принадлежит гиперребру e_j , и 0 в противном случае. Для преобразования гиперграфовой модели в исполняемую последовательность операций используется функция $f: E \rightarrow N$, генерирующая нодовую структуру, где каждой операции сборки соответствует узел в системе визуализации.

Ключевым элементом предложенного подхода является система фантомных объектов, обеспечивающая точное позиционирование компонентов в пространстве. Для каждого физического компонента создается виртуальный "фантом", определяющий его целевое положение. Состояние системы в момент времени t описывается

набором переменных: $H(t) \in \{0,1\}$ — индикатор нахождения объекта в руке оператора, $P(t) \in \{0,1\}$ — индикатор контакта с фантомом, $x(t) \in \mathbb{R}^3$ — текущая позиция объекта, $q(t) \in SO(3)$ — текущая ориентация объекта [3].

Динамика системы определяется условием возврата к фантому $C_r(t) = \neg H(t) \wedge P(t)$, которое активируется при отпускании объекта в зоне фантома. Позиция объекта обновляется согласно уравнению:

$$x(t+\Delta t) = H(t) \cdot x_h(t) + [C_r(t) \wedge D(x(t), x_p)] \cdot x_p +$$

$$[-(H(t) \vee (C_r(t) \wedge D(x(t), x_p)))] \cdot x(t), \quad (1)$$

где $D(x(t), x_p) = x(t) - x_p \geq \varepsilon$ — условие превышения порогового расстояния $\varepsilon = 0.01$ м.

Аналогично определяется динамика ориентации через кватернионы. Система обеспечивает плавное выравнивание объекта с фантомом при выполнении условий возврата.

Интеграция гиперграфовой модели с динамической системой осуществляется через сопоставление каждой ноды набора параметров фантома $\Phi_i = (x_{pi}, q_{pi}, \varepsilon_i)$. Последовательность активации фантомов определяется топологической сортировкой гиперграфа с учетом весовых коэффициентов. Операция считается завершенной при достижении объектом целевой позиции с точностью $x(t) - x_p < \varepsilon$ и ориентации $\|q(t) - q_p\|_F < \delta_{rot}$, где $\delta_{rot} = 0.01$ рад.

Экспериментальная апробация проводилась с участием 10 операторов различной квалификации. Результаты показали сокращение среднего времени сборки с 68.7 до 42.3 минут (улучшение на 38.4%), снижение количества ошибок с 3.8 до 1.2 на одну сборку (улучшение на 68.4%) и сокращение времени обучения с 21 до 5 дней [4].

Анализ кривых обучения выявил экспоненциальную сходимость к оптимальному времени выполнения операций $T(n) = T_{opt} + (T_0 - T_{opt}) \cdot \exp(-\lambda n)$, где коэффициент скорости обучения $\lambda = 0.42$ для AR-системы существенно превышает $\lambda = 0.18$ для традиционного метода.

Математический анализ подтверждает важные свойства модели. Детерминированность гарантирует единственность следующего состояния

для любой конфигурации системы. Доказана сходимости к целевому положению при выполнении условий возврата. Непротиворечивость обеспечивается приоритетом ручного управления над автоматическим позиционированием.

Предложенная модель демонстрирует возможность эффективной интеграции формальных методов описания сборочных процессов с современными технологиями визуализации. Ключевым преимуществом является автоматическая адаптация параметров системы под уровень квалификации оператора через анализ истории выполнения операций [5].

1. Лим, А. А. Разработка инструмента дополненной реальности для визуальной поддержки сборочных процессов в машиностроении / А. А. Лим, А. А. Кутин, В. В. Пирогов // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2023. – № 10. – С. 435-440. – DOI 10.36652/0202-3350-2023-24-10-435-440. – EDN HINZGC.
2. Лим, А. А. Разработка инструмента смешанной реальности для реализации процесса сопряжения поверхностей деталей при сборке / А. А. Лим, И. В. Кудрявцев, А. А. Кутин // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2024. – № 7. – С. 294-298. – DOI 10.36652/0202-3350-2024-25-7-294-298. – EDN BHLECC.
3. Лим, А. А. Гиперграфовый подход к моделированию сборочных процессов: синтез с нодовыми системами и имплементация в среде смешанной реальности / А. А. Лим, А. А. Кутин // Вестник МГТУ "Станкин". – 2025. – № 2(73). – С. 80-89. – EDN REPEIA.
4. Лим, А. А. Динамические графы зависимостей для AR-сопровождения сборки FDM экструдеров / А. А. Лим // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2025. – № 5. – С. 39-43. – EDN OSPGFH.
5. Лим, А. А. Повышение эффективности сборочных процессов с применением инструмента виртуальной и дополненной реальности / А. А. Лим, И. В. Кудрявцев // Современные технологии сборки: Доклады IX Международного научно-технического семинара, Москва, 16–17 октября 2025 года. – Москва: Московский политехнический университет, 2025. – С. 78-86. – EDN KXFLZJ.

РОСТ АЛМАЗНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ВЫСОКОАСПЕКТНЫХ ПОДЛОЖКАХ С ВРАЩЕНИЕМ В МИКРОВОЛНОВОМ РЕАКТОРЕ

Литвинов А.П.¹, Ашкинази Е.Е.², Фёдоров С.В.¹

¹Московский государственный технологический университет “СТАНКИН”, 127055 Москва, Россия;
ya@artemlitvinov.ru

²Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, 119991 Москва, Россия

С помощью сканирующей электронной микроскопии и рамановской спектроскопии было изучено строение, химический и фазовый состав подложки и синтезированного покрытия. Размер зёрен, интенсивность алмазных линий и упорядоченного графита свидетельствуют о равномерной толщине плёнки и увеличении доли микрокристаллического алмаза по мере удаления от торца. Было установлено, что во всех точках покрытие испытывает упругие сжимающие напряжения.

Введение

Алмазные покрытия (АП) широко применяются в изготовлении износостойкого инструмента для высокоэффективной обработки материалов. Для высокой производительности используют процессы химического осаждения из паровой фазы (CVD) с применением микроволновой плазмы в резонаторных системах, что обусловлено достаточной концентрацией атомарного водорода [1].

Результаты исследований [2] демонстрируют формирование АП в неподвижных подложках только на части, которая ближе к области излучения плазмы. На диаметральной стороне рост АП был незначительным. Вращение равномерно распределило поле вокруг высокоразмерной подложки по всему периметру за счёт компенсации радиальной неравномерности температуры. Работа основана на [3].

Материалы и методы

Получение АП на высокоразмерных подложках из сплава WC+6%Co основано на принципиальной схеме изготовления [4].

Перед началом роста АП поверхность образца химически протравливалась реагентами Мураками и Каро чтобы предотвратить диффузию кобальта во время нагрева до температуры осаждения покрытия. На поверхность между подложкой и АП был нанесён барьерный слой вольфрама (W) толщиной 600 нм методом магнетронного распыления.

Нанесение АП происходило в плазмохимическом реакторе ARDIS-100 с поочерёдной подачей газовых смесей CH₄/H₂ и CH₄/H₂/N₂. Давление в камере поддерживалось на уровне 65 Торр, а температура подложки составляла 800 °C ± 15 °C. Для контроля нагрева применялся двухлучевой пирометр METIS M322 (SensorTherm GmbH, Зульцбах, Германия).

Линейные измерения режущей кромки после заточки. Определение радиуса режущей кромки

Радиусы режущей кромки фрезы определялись в нескольких состояниях: перед обработкой, после травления реагентами Мураками и Каро, с барьерным вольфрамовым (W) покрытием, после

роста CVD-алмазной плёнки. Для получения качественных изображений поверхность фрезы очищалась в ультразвуковой ванне с пропанолом. Сканирование и измерения проводили 3D-сканером MikroCAD Premium на удалении 4-5 мм от торца фрезы, как показано на «рисунке 1». Результаты представлены на «рисунке 2» и в «таблице 1».

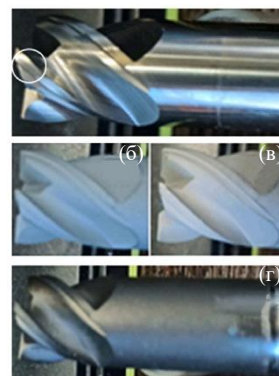


Рис. 1. Режущая кромка фрезы: а — до роста пленки (кружком показано место исследования); б — после травления кобальта; в — после напыления вольфрама; г — после MP CVD роста



Рис. 2. Схема измерения радиусов (μм) режущей кромки фрезы WC+6%Co без покрытия и с покрытием

Таблица 1. Радиусы режущей кромки фрезы WC+6%Co

Тип обрабатываемой поверхности	Без покрытия, μm	После травления, μm	После нанесения W, μm	После нанесения CVD АП
Радиус	8	5	6	10

Результаты Рамановской спектроскопии

Рис. 3 демонстрирует спектры комбинационного рассеяния (а) микро- и нанокристаллических (MCD/NCD) АП, зависящих от расстояния до торца и график положения ширины и интенсивности алмазного пика (ИАП) (б).

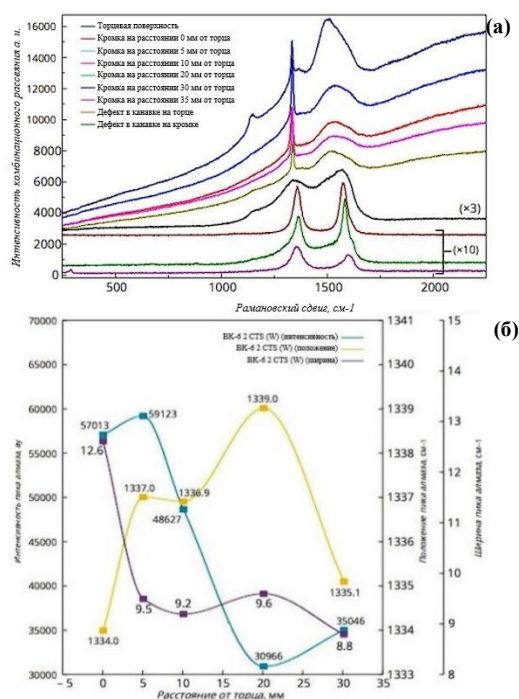


Рис. 3. Результаты Рамановской спектроскопии МР CVD пленки MCD/NCD на резке: а - спектры АП; б - положение, ширина и ИАП в зависимости от расстояния от торца

Наибольший интерес представляет фреза ВК-6, покрытая нанокристаллической АП, содержащей неупорядоченный sp^2 -углерод и трансполиацетиленовые цепи С-Н. ИАП снижается на 40% по мере приближения к оправке. В области

1335–1338 cm^{-1} ИАП связана с изменением размеров зерен, но после 10 мм эта зависимость пропадает. На однородность АП по толщине указывает размер зерна, ИАП, упорядоченный графит и свидетельствуют о повышении доли микрокристаллического алмаза при отдалении от торца. Положение алмазной линии свидетельствует об упругих напряжениях в материале: они растут от 0,7 до 1,2 ГПа и достигают максимума 3,1 ГПа на расстоянии 20 мм. Лишь у этого образца значение ширины алмазного пика снижается с приближением к оправке, что обусловлено параметрами роста: материал на торце - неупорядоченный sp^2 -углерод, а в канавочных дефектах и на режущей кромке в 35 мм от торцевой поверхности - высокоупорядоченный кластерный sp^{bl} -углерод.

Выводы

Подготовка поверхности и CVD-рост влияют на радиус режущей кромки: у исходной фрезы он составляет 8 мкм, после травления кобальта — 5 мкм, с вольфрамовым барьерным слоем — 6 мкм, а после нанесения алмазной пленки — 10 мкм.

По данным рамановской спектроскопии, ширина алмазного пика уменьшается с удалением от края, что свидетельствует о повышении качества покрытия.

Анализ положения пика алмаза показывает наличие упругих напряжений, возрастающих с удалением от торца: 0,7 ГПа у вершины, 1,2 ГПа на 30 мм, с максимумом 3,1 ГПа на расстоянии 20 мм.

Выращены однородные по толщине MCD/NCD АП. РЭМ-анализ показал увеличение размера зерна микрокристаллической фазы (1900–3900 μm) по мере отдаления от торца. При этом зёрна нанокристаллической фазы не превышают 80-190 мкм.

Исследование выполнено за счёт средств гранта Российского научного фонда № 22-19-00694.

- Сергейчев К.Ф. 2015 Успехи прикладной физики 3 342-76
- Ashkinazi E.E., Fedorov S.V., Martyanov A.K., Sedov V.S., Popovich A.F., Bolshakov A.P., Sovyk D.N., Ryzhkov S.G., Khomich A.A. and Zavedeev E.V. 2023 MDPI 13 1156
- Ашкинази Е.Е., Федоров С.В., Мартьянов А.К., Большаков А.П., Попович А.Ф., Совык Д.Н., Хомич А.А., Литвинов А.П., Ральченко В.Г., Григорьев С.Н., Конов В.И. 2024 Журнал технической физики 12 2133-44
- Ashkinazi E., Fedorov S., Khomich A., Rogalin V., Bolshakov A., Sovyk D., Grigoriev S. and Konov V. 2022 MDPI 8 77

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОЦЕНКИ ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Лукин Д.Д.¹, Шилов М.А.²

E-mail: ¹ dien.lukin@mail.ru; ² mshilov@yandex.ru.

¹ ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ),
Иваново, Россия

² ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» (ВятГУ), Киров, Россия

В работе представлена математическая модель изнашивания поверхности, измерительная система для определения характеристик токопроводящих смазочных материалов, определения трения и износа при возвратно-поступательном движении, при воздействии температурных факторов и воздействия электропроводности.

Введение

В то время, когда большинство коммерческих пластичных смазочных материалов (ПСМ) используют для предотвращения износа узлов трения машин и механизмов, для многих специализированных узлов требуется электропроводящий смазочный материал (ЭСМ). Области применения ЭСМ включают электромобили, подшипниковые узлы электродвигателей и т.д. [1]. Внутри электродвигателя множество компонентов подвержены электрическим сбоям, и подшипники среди них являются наиболее чувствительными и уязвимыми.

В последние годы случаи электрических повреждений подшипников в электродвигателях участились. Эта проблема стала ключевым фактором, ограничивающим срок службы электроприводных силовых систем в целом. Индуцированные напряжения и токи на валу могут привести к преждевременным отказам различных компонентов, таких как подшипники, уплотнения, прокладки и шестерни. Также могут возникнуть электромагнитные и радиочастотные помехи, вызывающие нестабильную работу двигателя. Традиционные режимы отказов подшипников можно сгруппировать в следующие категории: усталостное отслаивание, фреттинг, размазывание, скольжение, абразивное изнашивание, коррозия, трещины, истинное или ложное бринеллирование и т.д. Как правило, электрически обусловленные отказы можно разделить на две основные категории: морфологические повреждения — результат статических воздействий, проявляющихся в изменениях поверхности деталей. Воздействие на процесс смазки — отражает динамические процессы, при которых нарушается работа смазочного слоя.

Целью работы стало создание измерительной системы для экспериментального определения триботехнических характеристик материалов пар трения и фрикционных характеристик электропроводящих ПСМ.

Экспериментальная установка

При проектировании трибометрической измерительной системы была взята за основу схема

трения «шарик-плоскость» [2, 3, 4]. Подвижный шарик для подшипника диаметром 10.319 из стали ШХ15 изготовлен по ГОСТ 3722–2014. Неподвижная плоскость — пластина стали 40Х размерами 30х40х5 предварительно подготовленная для испытания (рис.1).

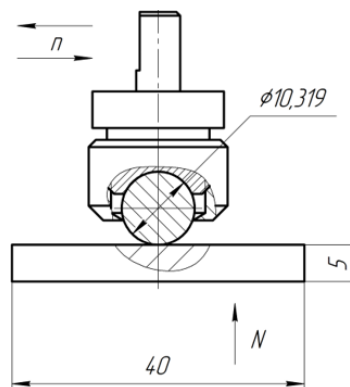


Рис. 1. Контактная схема «шарик-плоскость»

В представленной схеме испытаний n — возвратно-поступательное движение; N — направление нормальной нагрузки. Размер шарика может меняться, габаритные размеры пластины ограничены ванночкой.

Особенностью схемы испытаний является исключение дискретности в нагружении зоны испытания, шаг нагружения может достигать 0,01–0,03 Н. Диапазон измерения контактных давлений составляет от 0,01 до 0,4 МПа. Выполнение условий осуществляется с помощью зеркальной схемы нагружения, т.е. когда индентор жестко закреплен и имеет только возвратно-поступательное движение вдоль плоскости образца. Нагружение пластины регулируется с помощью разработанной программы. Принципиальная-кинематическая схема установки представлена на рис. 2. Для работы установки используется два модуля. Модуль 1 имеет привод, преобразующий вращательное движение в возвратно-поступательное, скорость перемещения может варьироваться от 1 до 100 мм/с. Так же в модуле 1 используется датчик-силоизмеритель, необходимый для снятия показаний при проведении испытаний, жестко закрепленный с индентором и

приводом. Модуль 2 представляет собой уравновешенную систему, имеет так же привод с грузом, который движется до заданной программой точки, создавая нагрузку в зоне испытания.

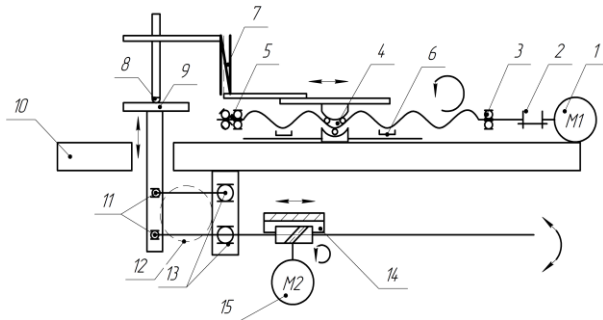


Рис. 2. Принципиальная кинематическая схема: 1- Двигатель шаговый; 2-Муфта ; 3-Подшипниковый узел; 4- Передача винт-гайка; 5-Подшипниковый узел; 6-Линейные подшипники качения; 7-Датчик силы; 8-Индентор; 9- Образец; 10-Основание; 11-Подшипники качения; 12- Пантограф; 13-Подшипниковый узел; 14-Реечная передача; 15-Двигатель шаговый.

В качестве дополнительных факторов, влияющих на триботехнические характеристики ЭСМ являются температура в зоне испытания и электропроводность. Для достижения цели дополнительно была разработана ванночка с установленной в ней термопарой. Температура в зоне испытания варьируется от комнатной до 150°C. Для создания электрического напряжения в зоне трибоконтакта в трущихся поверхностях имеются присоединительные места для электрических клемм. Места соединения электроконтактов изолированы во избежание наведения помех на силоизмерительный датчик и короткого замыкания установки. Схема ванночки показана на рис. 3. Схема зоны испытания представлена на рис. 4.

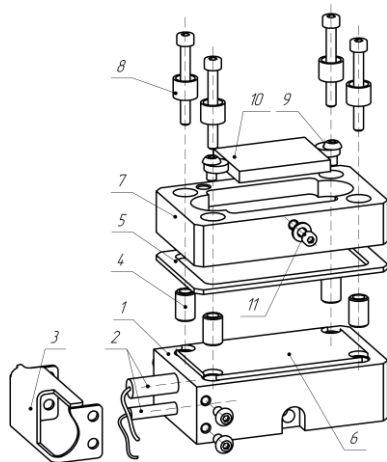


Рис. 3. Схема ванночки: 1 – Основание; 2 – Термопара; 3 – Кожух защитный ; 4 – Изолятор; 5 – Прокладка-изолятор; 6 – Термопаста; 7 – Ванночка; 8 – Изолятор; 9 – Подшипник эксцентриковый; 10 – Образец; 11 – Клемма присоединительная.

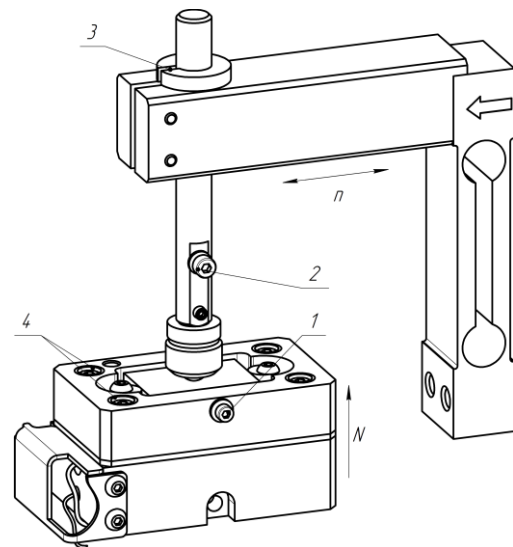


Рис. 4. Схема зоны испытания. 1,2 – клемма присоединительная; 3,4 – изоляторы.

Модельный эксперимент

Были изучены модельные составы ПСМ (вазелин медицинский + многостенные углеродные нанотрубки марки Таунит-М в концентрации 0,5 мас. %) при варьировании скорости скольжения. Полученные экспериментальные данные позволили определить зависимость между емкостью и скоростью скольжения при фиксированной нагрузке. На рис. 5 и 6 представлены зависимости емкости фрикционной пары и активного сопротивления слоя смазки в присутствии медицинского вазелина при различных скоростях скольжения и нагрузках, соответственно.

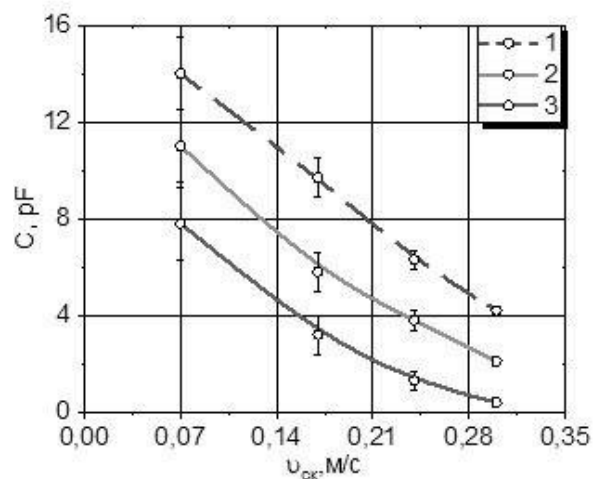


Рис. 5. Зависимость емкости C пары трения от скорости скольжения для медицинского вазелина с многостенными углеродными нанотрубками в концентрации 0,5 мас. % при нагрузках: 1–2 Н; 2–1 Н; 3–0,5 Н

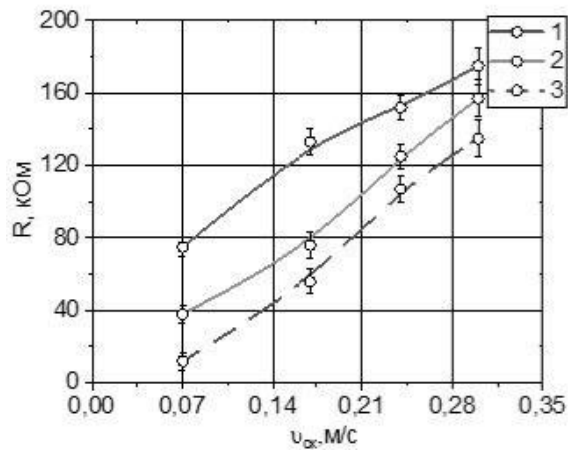


Рис. 6. Зависимость активного сопротивления R пары трения от скорости скольжения для медицинского вазелина с многостенными углеродными нанотрубками в концентрации 0,5 мас. % при нагрузках: 1–0.9Н; 2–0.5Н; 3–0.2Н

Заключение

Таким образом, в работе представлена оригинальная конструкция измерительной системы для определения электропроводящих

характеристик СМ. Разработана и апробирована методика проведения экспериментальных испытаний смазочных материалов при трении пары «шарик-плоскость». Измерительная система позволяет экспериментальным путем определять зависимость между электрофизическим и триботехническими характеристиками пары трения в условиях смазки.

Работа выполнена в рамках гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект №. FZZM-2023-0009, руководитель проф. Н.В. Усольцева)

1. Feng HE, Guoxin XIE*, Jianbin LUO* Сбои электроподшипников в электромобилях State Key Laboratory of Tribology, Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing100084, China Received: 08 September 2019 / Revised: 26 November 2019 / Accepted: 17 December 2019 ©Theauthor(s) 2019. ISSN2223-7690 CN10-1237/TH
2. Геккер, Ф.Р. Динамика машин, работающих без смазочных материалов в узлах трения. М.: Машиностроение, 1983. – 280 с.
3. Крагельский, И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. – 480 с.
4. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун и др.; под общ. Ред. А.В. Чичинадзе. – М. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.

РАСШИРЕНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОРЫ В БЕСКОНЕЧНОЙ СРЕДЕ С УЧЕТОМ ЕЕ РАЗРЫХЛЕНИЯ

Лямина Е.А.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия; lyamina@ipmnet.ru

Строится точное решение для процесса расширения поры конечного начального радиуса в бесконечной жесткопластической среде, подчиняющейся условию пластичности Друкера-Прагера. Пластический потенциал представляется таким же уравнением, но с другими параметрами. Эти параметры зависят от относительной плотности материала, которая уменьшается в начале процесса деформирования. Разрыхление прекращается при достижении относительной плотностью определенного значения.

Цель

Целью исследования является определение распределения главных напряжений, радиальной скорости и относительной плотности в процессе расширения сферической поры в бесконечной жесткопластической пористой среде.

Постановка задачи

Краевая задача решается в сферической системе координат (r, θ, φ) . Нормальные напряжения в этой системе координат являются главными напряжениями. Обозначим их σ_r , σ_θ , σ_φ . Вследствие симметрии $\sigma_\theta = \sigma_\varphi$. В рассматриваемом случае, условие пластичности имеет вид

$$\sigma_\theta - \sigma_r + \frac{\mu}{3}(\sigma_r + 2\sigma_\theta) = \sigma_0, \quad (1)$$

где σ_0 и μ – параметры материала. Единственное уравнение равновесия, которое не удовлетворяется тождественно, принимает форму

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{2}{r}(\sigma_r - \sigma_\theta) = 0. \quad (2)$$

Пластический потенциал примем в виде

$$g = \sigma_\theta - \sigma_r + \frac{\eta}{3}(\sigma_r + 2\sigma_\theta). \quad (3)$$

В случае ассоциированного закона пластического течения, $\mu = \eta$. Полагаем, $\mu > \eta$, что согласуется с экспериментальными данными [1]. Эти экспериментальные данные также показывают, что $\eta \rightarrow 0$ при достаточно большой деформации. Отметим, что при $\eta = 0$ уравнение (3) показывает, что материал становится пластически несжимаемым. Предполагается, что η является известной функцией относительной плотности ρ . Радиальную скорость обозначим u . Остальные компоненты вектора скорости равны нулю. Компоненты тензора скорости деформации в сферической системк координат представляются в виде

$$\xi_r = \frac{\partial u}{\partial r}, \quad \xi_\theta = \xi_\varphi = \frac{u}{r}. \quad (4)$$

Уравнение неразрывности принимает форму

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial \rho}{\partial r} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial r} + 2 \frac{u}{r} \right) = 0, \quad (5)$$

где t – время. Пластический потенциал (3) приводит к следующим выражениям для компонент тензора скорости деформации

$$\xi_r = \lambda \left(\frac{\eta}{3} - 1 \right), \quad \xi_\theta = \xi_\varphi = \lambda \left(\frac{1}{2} + \frac{\eta}{3} \right), \quad (6)$$

где λ – неотрицательный множитель.

Текущий радиус поры обозначим a . Так как сопротивление материала в принятой модели не зависит от скорости деформирования, то можно принять

$$\frac{da}{dt} = 1. \quad (7)$$

В начальный момент относительная плотность распределена равномерно. Следовательно,

$$\rho = \rho_0 \quad (8)$$

при $t = 0$. Из уравнения (7) получим

$$u = 1 \quad (9)$$

при $r = a$.

Методы

Решение поставленной задачи состоит из двух основных частей. Сначала решается задача в предположении, что начальный радиус поры равен нулю. В этом случае решение зависит от отношения $\gamma = a/r$, а не от двух переменных a и r [2]. На второй стадии это решение используется для построения решения для поры конечного начального радиуса.

Если начальный радиус поры равен нулю, то уравнения в частных производных, сформулированные выше, сводятся к обыкновенным дифференциальным уравнениям. В частности,

$$\frac{\partial}{\partial r} = -\frac{a}{r^2} \frac{d}{d\gamma}, \quad \frac{\partial}{\partial a} = \frac{1}{r} \frac{d}{d\gamma}. \quad (10)$$

Исключая λ в уравнениях (6) и используя (4) и (10), получим

$$\gamma \frac{du}{d\gamma} + \frac{2(\eta-3)}{(3+2\eta)} u = 0. \quad (11)$$

Уравнение (2) с помощью (10) преобразуется к виду

$$\gamma \frac{d\sigma_r}{d\gamma} + 2(\sigma_\theta - \sigma_r) = 0. \quad (12)$$

Уравнение (5) после использования (7) и (10) принимает форму

$$\frac{d\rho}{d\gamma} + \frac{6\rho\eta u}{(3+2\eta)(1-u\gamma)} = 0. \quad (13)$$

При выводе этого уравнения производная $du/d\gamma$ была исключена с помощью (11). Окружное напряжение в (12) должно быть исключено с использованием условия пластичности (1). Зависимость η от ρ принималась в виде

$$\eta = \eta_0 \left(\frac{\rho - \rho_c}{1 - \rho_c} \right)^v, \quad (14)$$

где η_0 , ρ_c , v – постоянные. Уравнение (14) отражает экспериментальный факт, что η обращается в ноль при некотором значении $\rho = \rho_c$ [1]. Система уравнений (11) – (13) решается численно.

Для распространения полученного решения на пору конечного начального радиуса достаточно просто не рассматривать решение внутри полой сферы, внешний радиус которой состоит из тех же материальных точек, которые образуют поверхность поры в начальный момент времени [2].

Результаты и их обсуждение

Численное решение получено при $\eta_0 = \pi/12$ и $\rho_c = 1/2$. Наибольший интерес представляет распределение по радиусу относительной плотности. Такие распределения показаны на Рис. 1 и 2 для нескольких значений ρ_0 и v . Отметим, что поверхность поры определяется уравнением $r = a$ или $\gamma = 1$. Из рисунков видно, что относительная плотность быстро уменьшается при приближении к поверхности поры. Особенно хорошо это заметно при $v = 2$ на Рис.1. Очевидно, что резкое изменение относительной плотности в узкой области вблизи поверхности поры будет все более существенным по мере увеличения параметра v . При этом распределение радиальной скорости слабо зависит от начальной плотности и представляется функцией, достаточно близкой к линейной (Рис.3).

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации 124013000674-0).

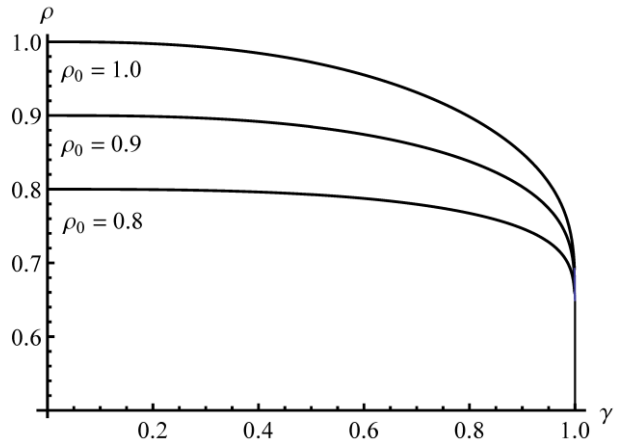


Рис.1. Зависимость относительной плотности от γ для нескольких значений начальной плотности при $v = 2$

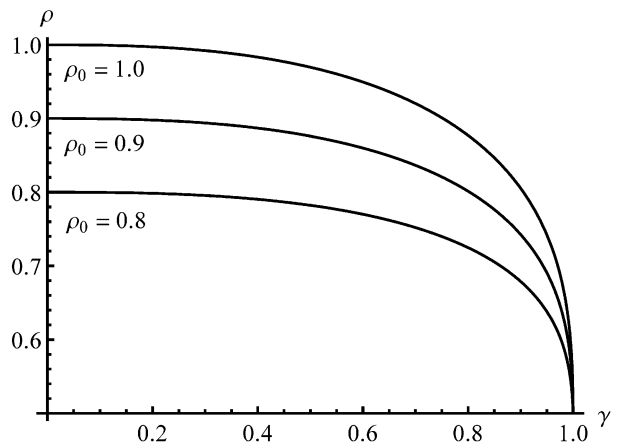


Рис.2. Зависимость относительной плотности от γ для нескольких значений начальной плотности при $v = 0,5$

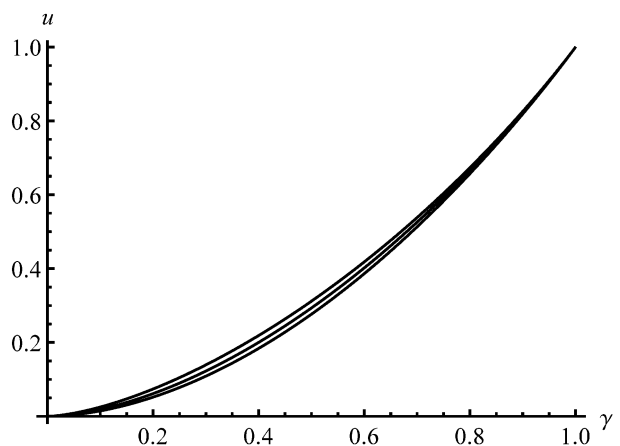


Рис.3. Зависимость радиальной скорости от γ для начальной плотности в интервале $0,8 \leq \rho_0 \leq 1$ при $v = 2$

1. Mehrabadi M.M., Cowin S.C. On the double-sliding free-rotating model for the deformation of granular materials // J. Mech. Phys. Solids 1981. V.29, P.269-282.
2. Хилл, Р. Математическая теория пластичности. М.: ГИТТЛ, 1956. 407 с.

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ СКРЕТЧ-ТЕСТИРОВАНИЯ

Макаренко К.В., Котлярова И.А., Илюшкин Д.А., Зенцова Е.А.

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», Брянск, Россия; makkon1@yandex.ru

Исследована возможность измерения микротвердости металлических покрытий методом скретч-тестирования с помощью высокоточного модуля прибора SMT-5000. Установлено, что метод скретч-тестирования позволяет определять микротвердость с высокой точностью, учитывая структурную неоднородность покрытий. Наличие размерного эффекта у большинства металлических материалов определяет методику проведения измерения.

Эксплуатационные свойства деталей определяются состоянием их поверхностного слоя, направленно изменить который можно нанесением функциональных покрытий. Как правило, свойства тонких поверхностных слоев и покрытий оценивают через микротвердость (ISO 14577), определяемую традиционными (методы Виккерса, Бринелля, Роквелла) и альтернативными методами (скретч-тестирование) [1-4].

Метод скретч-тестирования заключается в «царапании» исследуемой поверхности индентором с постоянной или нарастающей нагрузками с непрерывной фиксацией следующих параметров – прикладываемая нагрузка, глубина внедрения индентора, глубина царапины после снятия нагрузки, сила трения (индентор – исследуемый материал), коэффициент трения. Методика многопроходного царапания применяется для исследования износостойкости покрытий. Анализ полученных изображений царапины (микрофотографии) позволяет определить характер разрушения покрытия (вязкий, хрупкий) и критическую нагрузку разрушения, т.е. оценить адгезионную прочность системы «покрытие/подложка» [5,6].

Приборы, реализующие методику скретч-тестирования разнообразны. В своей работе мы исследовали возможность применения высокоточного модуля микроиндентирования установки SMT-5000 для измерения микротвердости меди. Медь и медные сплавы, а также покрытия на их основе в диапазоне от 30 до 300 мкм, а также различные сплавы на базе меди находят широкое применение в различных областях: начиная от локальной защиты при цементации, улучшения при пайке различных металлов и сплавов, и заканчивая использованием в качестве функциональных покрытий или отдельных слоев [7].

Цель данной работы – оценить возможности прибора SMT-5000 для измерения микротвердости материалов в диапазоне прикладываемой нагрузки 1...2Н с учетом возможного проявления размерного эффекта.

Материалы и методы

Микротвердость методом скретч-тестирования определяли для холоднодеформированной медной

ленты толщиной 250 мкм (М1 (ГОСТ 859-2014)); в качестве эталона использовали образец монолитного поликарбоната.

Скретч-тестирование выполняли на приборе SMT-5000 с помощью индентора Роквелла (алмазный конус, угол при вершине 120°, радиус закругления при вершине – 200 мкм). Скорость перемещения конуса – 10 м/сек; путь перемещения – 1мм; нагружающая сила варьировала от 1 до 2 Н (шаг – 0,25). Скретч-тест проводили с пред- и постсканированием. В ходе эксперимента фиксировали силу трения (пара индентор – исследуемая поверхность), коэффициент трения, глубину внедрения индентора PD, остаточную глубину царапины RD.

Микротвердость HB_S рассчитывали по формуле (1):

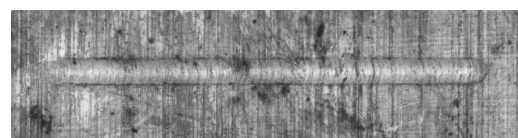
$$HB_S = \frac{4P}{\pi w^2}, \quad (1)$$

где P – приложенная нагрузка, Н; w – ширина царапины, м.

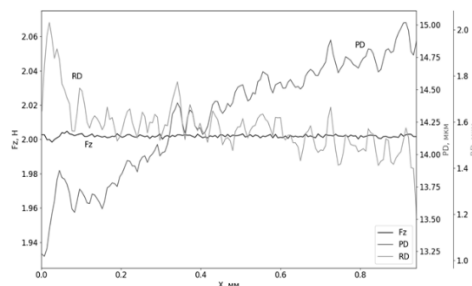
Ширину царапины измеряли с помощью оптического микроскопа (x20).

Результаты и их обсуждение

Внешний вид полученной царапины на поверхности медной ленты, а также значения непрерывно фиксируемых параметров представлены на рис.1.



а)



б)

Рис. 1. Внешний вид царапины на медной ленте x20 (а) и непрерывно фиксируемые значения PD, RD (б) (нагрузка на индентор – 2Н)

На рис. 2. приведены рассчитанные значения микротвердости HV_0 при нагрузках на индентор 1, 1,25, 1,5, 1,75 и 2Н (ширину полученных царапин усредняли по 10 измерениям)

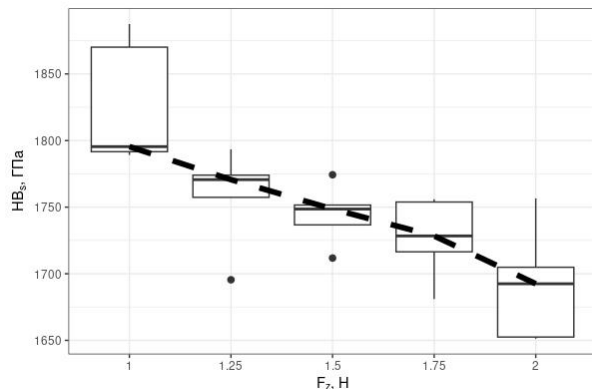


Рис.2. Микротвердость медной ленты (F_H – нагрузка на индентор; Блоки и точки на графике – результат обработки 50 индивидуальных измерений, штриховые линии соединяют медианы значений микротвердости при соответствующей нагрузке)

Полученные результаты однозначно указывают на наличие размерного эффекта у меди; микротвердость зависит от величины нагрузки на индентор.

Из литературы известно, что с уменьшением величины индентирующей нагрузки, твердость материала может увеличиваться (прямой размерный эффект – англ.: indentation size effect), уменьшаться (обратный размерный эффект – англ.: reverse size effect), изменяться неравномерно (сначала уменьшаться, потом увеличиваться), не изменяться [8-10]. В последнем случае для исследуемого материала характерны размерно-независимые механические свойства (по крайней мере, в исследуемом диапазоне прилагаемых нагрузок). В таких условиях измеренная твердость именуется «видимой».

Для меди HV_0 монотонно уменьшается с увеличением F_H (в среднем на 12,1 ГПа на каждые 0,1Н). Для подтверждения достоверности сделанного вывода была измерена микротвердость у размернонезависимого материала – поликарбоната, полученные результаты (рис.3) подтверждают, что выбранная методика эксперимента и обработка первичных данных приводят к корректным результатам.

Отсутствие размерного эффекта у поликарбоната и ряда других материалов (сапфир, плавленый кварц) связано с отсутствием градиента свойств в приповерхностном слое материалов, а также неизменность действующего механизма деформации и его независимость от размеров пластически деформированной зоны [8].

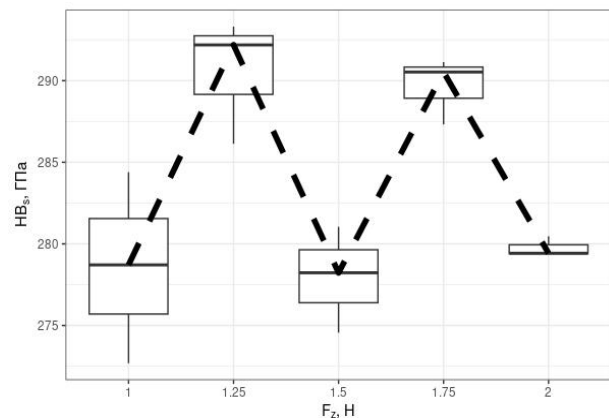


Рис.3. Микротвердость поликарбоната

Интересно отметить, что глубина внедрения индентора PD в медную ленту при увеличении нагрузки на индентор изменяется неравномерно (рис.4). Наблюдаются локальные максимумы и минимумы. Это вероятно связано с неравномерной деформацией меди в продольном и поперечном направлениях: профиль царапины значительно отклоняется от сферической формы, эксцентриситет поверхности эллипсоида зависит от приложенной нагрузки. Следует отметить, что кривая PD, относящаяся к поликарбонату, соответствуют строго линейной зависимости (рис.4).

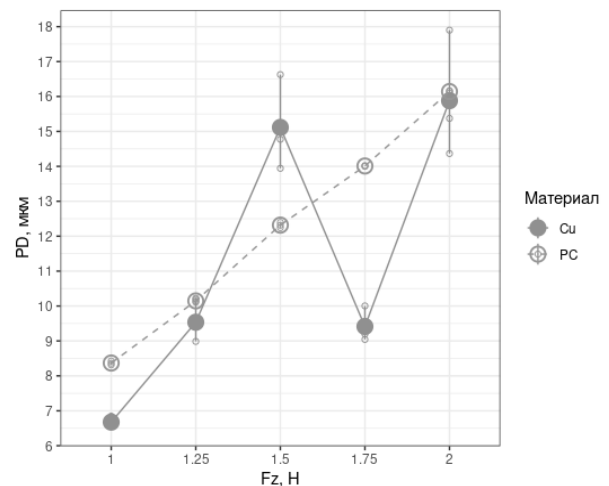


Рис.4. Зависимость глубины внедрения индентора PD в материал от величины нагрузки, приложенной к индентору

Для статистической оценки относительной изменчивости показаний микротвердости, определенной различными методами, вычисляли функции плотности вероятности/

Функции плотности вероятности показывают, что метод скретч-тестирования обладает высокой чувствительностью к структурной неоднородности поверхности (рис.5), т.е. может быть использован для оценки микротвердости материалов с анизотропным рельефом поверхности (например, гальванически осажденных покрытий,

деформационноупрочненных поверхностных слоев).

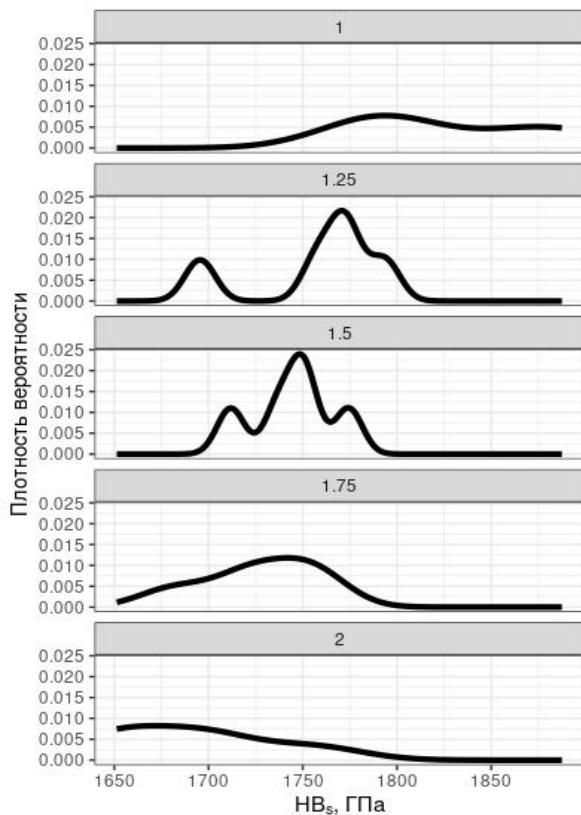


Рис.5. Распределение микротвердости в зависимости от величины нагрузки на индентор

Закключение

Прибор SMT-5000 позволяет определять микротвердость тонких покрытий с большой точностью, с учетом структурной неоднородности материала и под контролем глубины внедрения индентора, что исключает влияние подложки на полученные значения HBS .

Наличие размерного эффекта у большинства металлических материалов вносит коррективы в методику определения HBS , так как значения микротвердости, рассчитанные при разной ширине царапины, несопоставимы. Для получения сопоставимых значений HBS необходимо провести

скретч-тестирование материалов с линейно возрастающей нагрузкой, по полученным диаграммам царапания выбрать нагрузку, при которой ширина царапин одинаковая, и провести вычисление микротвердости HS по стандартной методике.

Экспериментальные исследования проведены с использованием оборудования лаборатории учебного дизайн-центра «Разработка, испытания и реверс-инжиниринг электронной компонентной базы»

1. Обоснование выбора износостойких покрытий при упрочнении почвообрабатывающих рабочих органов лесохозяйственных машин / В.И. Кретинин, В.А. Соколова, В.А. Марков, А.В. Теплов, С.В. Алексеева. // Системы Методы Технологии. – 2020. – № 2. – С. 82 – 86.
2. Методы измерения твердости материалов (обзор) / Е. И. Орешко, Д. А. Уткин, В. С. Ерасов, А. А. Ляхов // Труды ВИАМ. – 2020. – № 1(85). – С. 101-117. – DOI 10.18577/2307-6046-2020-0-1-101-117.
3. Колмаков, А.Г. Методы измерения твердости: Справ. изд. /А.Г. Колмаков, В.Ф. Терентьев, М.Б. Бакиров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 150 с.
4. Дик, И.И. Методы определения твердости металлов и сплавов // Сб. науч. тр. VI Всероссийской научно-практической конференции. Кинель, 2023. – С. 94 – 97.
5. Кирюханцев-Корнеев, Ф. В. Особенности измерения твердости тонких функциональных покрытий методами склерометрии, микро- и наноиндентирования / Ф. В. Кирюханцев-Корнеев, А. Н. Швейко // Физикохимия поверхности и защита материалов. – 2018. – Т. 54, № 5. – С. 514-520. – DOI 10.1134/S0044185618050121.
6. Воронин, Н. А. О композиционной, эффективной и истинной твердости тонких покрытий / Н. А. Воронин // Трение и износ. – 2010. – Т. 31, № 4. – С. 325-341.
7. Осинцев, О.Е. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: Справочник / О.Е. Осинцев, В.Н. Федоров. – М.: Инновационное машиностроение, 2021. – 360 с.
8. Физико-механические свойства и микромеханизмы локального деформирования материала с различной зависимостью твердости от глубины отпечатка / Ю.И. Головин, А.И. Тюрин, Э.Г. Асланян, Т.С. Пирожкова, В.М. Васюков // Физика твердого тела. – 2017. – т. 59, вып. 9. – С. 1778–1786.
9. Марченков, А.Ю. Масштабный эффект при испытаниях царапанием материалов с разным деформируемым объемом / А.Ю. Марченков, Е.В. Терентьев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2017. – т. 83, № 9. – С. 66 – 69.
10. Мощенок, В. И. Размерный эффект в значениях твердости материалов / В. И. Мощенок, И. В. Дошечкина, А. А. Ляпин // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2008. – № 41. – С. 71 – 76.

ВЛИЯНИЕ ЗАГУСТИТЕЛЕЙ НА ПРОТИВОИЗНОСНЫЕ СВОЙСТВА ПО ГОСТ 9490–75 ДЛЯ БЕЗЗОЛЬНЫХ ДИТИОФОСФАТОВ В МАСЛЕ И-20А

Масько С. В.¹, Золотов А. В.²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия. E-mail: 19982703@list.ru

²Российский государственный университет нефти и газа имени И.М. Губкина

В статье приведены результаты испытаний на износ беззольных дитиофосфатных присадок с добавлением загущающих присадок, используемых в производства смазочных материалов в России. В процессе испытаний оценивался износ образцов по диаметру пятен износа.

Одним из наиболее эффективных способов обеспечения подвижности для различных машин и механизмов является использование различных смазочных материалов. Смазочные материалы обеспечивают снижение трения и повышают долговечность узлов трения в целом. В свою очередь для улучшения эксплуатационных свойств смазочных материалов, в них добавляют различные присадки для адаптации под конкретные режимы и условия работы механизма. [1]

Самым распространённым видом присадки для масел являются дитиофосфаты различных металлов. Однако дитиофосфаты металлов при эксплуатации формируют золу в процессе работы узла трения, и её формирование крайне негативно сказывается на свойствах смазочного материала. [2]

Для решения проблем зольности присадок используются так называемые беззольные дитиофосфаты, или же дитиофосфаты неметаллов. Беззольные присадки успешно используются наравне с зольными, предоставляя те же, а порой и превосходящие трибологические характеристики. Дитиофосфаты неметаллов так же являются более экологичной присадкой, что делает их предпочтительными при составлении комплекса присадок для моторных масел. [3]

Так же нельзя забывать про вязкость масла. Вязкость – основная характеристика для масел, является одной из основополагающих при выборе смазочного материала. Чем выше рабочая скорость узла трения, тем меньшая вязкость при рабочей температуре необходима. Но необходима достаточная густота для сохранения смазочного слоя, но не так велика, чтобы при работе узла, масло не могло попасть в зоны контакта, что увеличит потери на внутреннем трении и уменьшит ресурс рабочего узла. [4]

Исследования, направленные на изучения свойств масел беззольными дитиофосфатами являются актуальными, в связи с ежегодно растущими ужесточениями экологических стандартов. Стремлению к повсеместному снижению энергопотребления. Разработка и производство смазочных материалов на этом фоне становятся важными задачами на пути к массовому улучшению производств и работы механизмов. Достижение этих целей требует глубокого понимания в работе присадок и их взаимодействия друг с

другом.

Таким образом исследования трибологических характеристик и механизмов действия беззольных дитиофосфатов является перспективной, не только с практической точки зрения, но и с экологической, поскольку полученные результаты могут быть применимы для улучшения смазочных свойств с возможностью снижения влияния на окружающую среду.

Материалы и методы

В качестве базового масла в данном исследовании используется И-20А - масло общего назначения, дистиллятное или смесь дистиллятного с остаточным из сернистых и малосернистых нефтей селективной очистки.

Для испытаний присадок использовалось три основы:

1. Базовое масло И-20А без добавок;
2. Базовое масло И-20А с загущающей присадкой СМВ 8000;
3. Базовое масло И-20А с загущающей присадкой ПИБ-2300.

Для испытаний загущающие присадки были добавлены для получения вязкости в 10сСт при $t = 100^{\circ}\text{C}$. Режимы для получения нужной вязкости представлены в табл. 1.

Таблица 1. Режимы смешивания загущающих присадок

Марка загустителя (полимера)	Условия смешения с маслом	Содержание в масле И-20А до вязкости 10сСт при 100°C
СМВ 8000	80°C 2 часа	3,1 % мас.
ПИБ ММ 2300	80°C 2 часа	12,0 % мас.

При проведении испытаний добавлялись присадки в концентрации 1% мас. В работе исследовались беззольные дитиофосфатные присадки российского производства, такие как:

1. АДТФ
2. Крезилдифенилфосфат
3. Additive al28
4. Irgalube 63
5. Irgalube 353
6. Irgalube 355

Данные по рассматриваемым беззольным присадкам представлены в табл. 2

Таблица 2 – Беззольные дитиофосфаты

№	Хим. природа	Номенклатура ИЮПАК	Название	Производитель / поставщик
1	Беззольный дитиофосфат	Этил 3 - [(диизопропоксифосфоротиоил) сульфанил] пропаноат	Irgalube 63	Basf
2	Беззольный дитиофосфат	3-[[бис(2-метилпропокси)фосфинотиоил]тио]-2-метилпропановая кислота	Irgalube 353	Basf
3	Беззольный дитиофосфат	Дибутил[[бис(2-этилгексил)окси]фосфинотиоил]тио] сукцинат	Additiv a128	Prasol
4	Беззольный дитиофосфат	Аминодитиофосфат	Адтф	Квалитет
5	Беззольный дитиофосфат	50-75% irgalube 353 + 25-50% амины, бис (с11-14-разветвленный и линейный алкил), 3 - [[бис (2-метилпропокси) фосфинотиоил] тио] -2-метилпропаноаты	Irgalube 355	Basf
6	Крезилдифенилфосфат	Метилфенилдифенилфосфат	Крезилдифенилфосфат	Leap

Для сравнения результатов так же были проведены испытания на повсеместно распространённой зольной присадке ДФ-11. Данная присадка испытывалась в тех же условиях и при концентрации в 1% от массы.

Для получения результатов испытания на износ проводились на четырехшариковой машине ЧМТ-1 со скоростью 1460 об/мин, по ГОСТ 9490–75. Шарики использовались марки ШХ-15 диаметром 12.7 мм. Испытания проводились без использования дополнительного нагрева узла трения, нагрузка составляла 20 кг. После испытания измерялся диаметр пятна износа и делались фотографии.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены результаты испытаний на износ для рассматриваемых образцов в виде диаграммы со средними значениями размеров пятен контакта для всех рассматриваемых присадок.

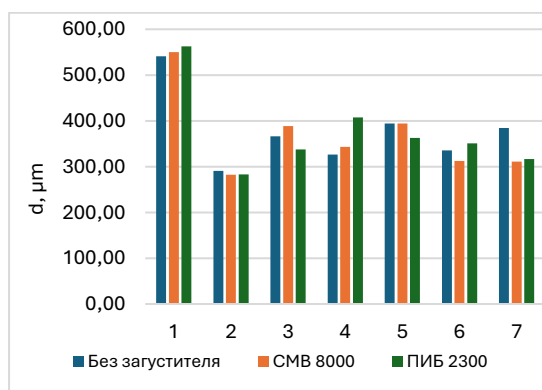


Рис. 1 Средние размеры пятен износа после испытания образцов: 1. АДТФ; 2. Крезилдифенилфосфат; 3. Additive A128; 4. Irgalube 63; 5. Irgalube 353; 6. Irgalube 355; 7. ДФ-11.

В ходе испытаний было выявлено, что использование загущающих присадок не оказывает значительного влияния на степень износа.

Масло с выбранной для сравнения зольной дитиофосфатной присадкой ДФ-11 показало, что загущающие присадки СМВ 8000 и ПИБ 2300 положительно повлияли на износ.

Более подробные данные с изменением размера пятна износа для рассматриваемых композиций указано в табл. 3. Здесь представлены значения изменений износа от значений, полученных при испытании без добавления загущающей присадки для каждого исследуемого дитиофосфата

Таблица 3. Разница диаметров пятна износа

Дитиофосфат	СМВ-8000, $\delta d, \mu m$	ПИБ 2300, $\delta d, \mu m$
АДТФ 1%	9.33	21.83
Крезилдифенилфосфат 1%	-8.67	-8
Additive A128 1%	21.83	-28.67
Irgalube 63 1%	16.17	80.5
Irgalube 353 1%	0	-31.67
Irgalube 355 1%	-23.17	15.5
ДФ-11 1%	-73.33	-68

При более подробном рассмотрении результатов следует, что для рассматриваемых присадок получаются следующие результаты:

- Для АДТФ добавление загущающих присадок привело к увеличению износа.
- Для Крезилдифенилфосфата добавление загущающих присадок привело к уменьшению износа.
- Для Additive A128 загущающая присадка СМВ 8000 привела к увеличению износа, а ПИБ 2300 – наоборот к его уменьшению.
- Для Irgalube 63 загущающая присадка СМВ

8000 привела к увеличению износа, а ПИБ 2300 – к значительному увеличению износа.

- Для Irgalube 353 загущающая присадка СМВ 8000 не повлияла на износ, а ПИБ 2300 – привела к увеличению износа.

- Для Irgalube 355 загущающая присадка СМВ 8000 привела к уменьшению износа, а ПИБ 2300 – наоборот к его увеличению.

- Для ДФ-11 загущающие присадки привели к значительному уменьшению износа.

Заключение

Для испытаний на износ наличие загустителя оказывает влияние на результат. Почти все образцы при сравнении износа показывают отклонения меньше 10%. Самым большим значением износа обладает беззольная присадка АДТФ, самый низкий износ показал Крезилдифенилфосфат. Однако, в процессе было выявлено, что среди беззольных присадок, загущение значительно повлияло на размер пятна износа для присадки irgalube 63, интерес представляет так же тот факт, что на результат значительно повлиял только один загуститель – ПИБ 2300. Для зольной присадки ДФ-

11 загустители оказали положительный эффект на степень износа.

В дальнейшем необходимо подробное исследование поверхностей трения, проведение дополнительных испытаний с другими концентрациями присадок и при помощи других методов исследования, что может помочь изучить влияние загустителей на присадки более подробно.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0023.

1. Chen Y., Renner P., Liang H. A review of current understanding in tribochemical reactions involving lubricant additives //Friction. –2023. – Т. 11. – №. 4. – С. 489-512.
2. Spikes H. Friction modifier additives //Tribology Letters. – 2015.– Т. 60. – С. 1-26.
3. Соловьянов, А. А. Накопленный вред окружающей среде: источники и виды загрязнения / А. А. Соловьянов // Экология промышленного производства. – 2016. – № 3(95). – С. 52-58. – EDN WZJWPB.
4. Яцунов, А. Н. Эксплуатационные свойства моторных масел и способы их-- улучшения / А. Н. Яцунов, У. К. Сабиев, Д. Ю. Колодич // Электронный научно-методический журнал Омского ГАУ. – 2024. – № 3(38). – EDN DXEGEO.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ МИКРОСФЕР ИЗ ПОЛИАМИДА 12 ДЛЯ 3D ПЕЧАТИ В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Матвеев К.В.¹, Канашов С.С.¹

ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ)", Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия;
konstmatv2003@gmail.com

В работе использовались методы эмульгирования и фазового разделения для получения частиц на основе полиамида 12 в основном из-за низких затрат на оборудование и возможности проведения в доступных лабораторных условиях. Результаты эксперимента могут быть использованы для дальнейшей разработки путей получения сырья для 3D SLS печати, а также для дальнейшего применения полученных материалов при создании мелкосерийных деталей сложной геометрии для нужд приборостроения и машиностроения.

Цель

Путем лабораторных экспериментов получить полимерный материал в виде микросфер из полиамида-12, пригодный для 3D печати и описать его физические свойства.

Материалы и методы

Полиамид-12 (PA12), также известный как нейлон-12, представляет собой термопластичный полимер, характеризующийся высокой прочностью, устойчивостью к химическим веществам и отличной термической стабильностью. При этом ПА-12 имеет самую низкую точку плавления среди всех полиамидов. Благодаря этим свойствам PA12 широко используется в аддитивных технологиях, особенно в методе селективного лазерного спекания (SLS) [1].

Эти свойства делают PA12 идеальным материалом для производства функциональных прототипов, серийных деталей и компонентов, требующих высокой точности и надежности.

Для определения наиболее функционального растворителя была проведена серия экспериментов в реакторе высокого давления.

Одним из методов получения микросфер полиамида 12 выступает гидротермальная обработка гранул полиамида в различных растворителях, в том числе и не имеющих высокую температуру кипения. Гидротермальный метод позволяет проводить обработку при температуре, выше температуры кипения растворителя, что делает процесс более интенсивным и сократить время обработки [2].

Морфология материалов была изучена с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM 7001F, элементный анализ проведен с помощью приставки Oxford Instruments. В процессе работы был проведен сравнительный анализ коммерчески доступного порошка для 3D печати на основе полиамида 12 [3,4].

Таблица 1. Методы получения порошков на основе нейлона 12

Метод	Преимущества	Недостатки
Эмульгирование	. Простота проведения и низкие затраты	Широкий диапазон размеров микросфер
Разделение фаз	Доступность оборудования	Требует точный контроль температурного режима, низкий выход

Результаты и их обсуждение

Экспрессный терморегим способствует превращению капель полиамида в центры кристаллизации, которые при охлаждении затвердевают, до того, как объединиться в большой агломерат.

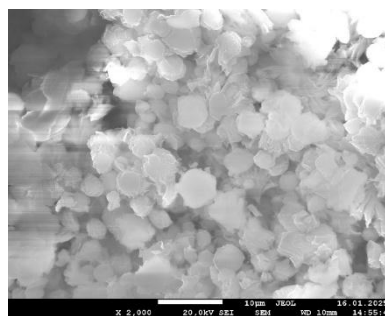


Рис. 1. ПА12 полученный методом фазового разделения с добавлением ПВП

При введении 0,1 г аэросила, предварительно обработанный в ультразвуковой бане в течение 30 мин, в дисперсную систему сразу после растворения гранул ПА12 и перед добавлением ПВП. После сушки образец имел лучшую сыпучесть и повысил антистатические характеристики. А при проведении СЭМ наблюдали равномерно распределенную массу частиц полимера сферической формы размером от 5 до 10 мкм.

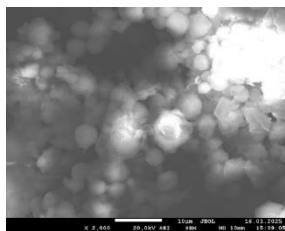


Рис. 2. ПА12 полученный при добавлении ЭГ и SiO₂

1. Preparation of PA12 Microspheres with Tunable Morphology

- and Size for Use in SLS Processing / G. Wang, P. Wang, Z. Zhen et al. // *Materials & Design*. – 2015, V. 87. – С. 656-662.
2. Fast and Environmentally Friendly Microfluidic Technique for The Fabrication of Polymer Microspheres / Y. Zhang, R.W. Cattrall, S.D. Kolev // *Langmuir*. – 2017. – V. 33, N. 51. – P. 14691-14698.
3. 9 Spray Drying: An Overview / D. Santos, A.C. Mauricio // *Biomaterials-Physics and Chemistry-New Edition*. – 2018. – P. 9-35.
4. Fabrication of Polymeric Microparticles by Electrospray: The Impact of Experimental Parameters / A.Í.S. Morais, E.G. Vieira, S. Afewerki et al. // *Journal of functional biomaterials*. – 2020. – V. 11, N. 1. – P. 4.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРОТЕКАНИЯ ПРИ ТРЕНИИ ЯВЛЕНИЙ С ПРЕВРАЩЕНИЕМ ВЕЩЕСТВА

Мельник М.А.

Российский университет транспорта (РУТ (МИИТ)), Москва, Российская Федерация

В настоящем докладе на основе математического анализа зависимостей, применимых для термодинамических закономерностей при трении, делается оценка условий, в которых происходят процессы, способствующие снижению износа. К этим процессам относятся в том числе изменения в материалах подверженных трению тел, зависящие от природы вещества.

Трение сопровождается постоянным изменением структуры поверхностных слоёв в подверженных ему телах. Эти изменения часто невозможны в иных условиях, они сопровождаются в том числе и несамопроизвольными химическими процессами. Многие из тех процессов способствуют перераспределению работы трения с механического разрушения трущихся тел по другим направлениям, тем самым снижая износ. Также снижение износа происходит и благодаря образованию новых структур, с меньшим коэффициентом трения или более прочных и химически инертных по сравнению с исходными материалами. Задачей становится оценка условий возникновения новых структур, в том числе в зависимости от природы веществ подверженных трению тел и от условий работы. Для этого используются положения термодинамики, в том числе неравновесных процессов [1], к которым относится и трение.

Термодинамической оценкой протекания процессов считается изменение в них свободной энергии ΔG . Для связи её с кинетикой используют величину производства энтропии [1] – изменения её со временем.

$$\frac{dS}{dt} = \sum \frac{dS_i}{dt} + \sum \frac{dS_e}{dt} + \sum \frac{w\Delta G}{T} \quad (1)$$

где w – скорость протекания процессов

ΔG – изменение свободной энергии в тех процессах

Третье слагаемое выражения (1) – производство энтропии, связанное с изменениями вещества – становится минимальным при приближении к нулю или w , или ΔG . Первое условие реализуется при полном равновесии или при сильной механической устойчивости и химической инертности веществ – участников неравновесного процесса. К подобным веществам относятся малоактивные, при этом механически прочные металлы или соединения преимущественно d-элементов с углеродом, азотом, некоторыми другими p-элементами (т.н. металлокерамика). Иной подход к снижению износа – активация в зоне трения процессов изменения вещества, невозможных в иных условиях и благодаря этому способных перераспределять работу трения с износа на своё протекание. К ним относятся несамопроизвольные химические

реакции или перемещение отдельных компонентов материалов между контактирующими телами (избирательный перенос). При этом результатом не обязательно должно быть формирование новой структуры с большей прочностью и меньшим коэффициентом трения по сравнению с исходными материалами [2]. Определяющим в снижении трения считаются сами протекающие процессы, а не их результат. Не исключается, что состав вещества во время трения отличается от нового, образующегося по его окончании. Поэтому в данной статье рассматриваются протекающие процессы, используются их термодинамические характеристики.

Использование такой точки зрения позволяет подбирать состав вещества, при котором за счёт протекания процессов, не способных идти в иных условиях, будет минимизироваться производство энтропии и осуществляться структурообразование. Состав вещества считается определяющим в создании условий для структурных изменений при трении [3]. Чем же третье слагаемое (1) больше, тем больше предполагаются явления роста энтропии, в том числе износ при трении.

Согласно выражению (1), трение и износ можно рассматривать как «сведённые до нуля», что означает нулевое или отрицательное общее производство энтропии. Для осуществления этого (при неотрицательных dS_i и dS_e – внутреннем производстве и притоке энтропии, не связанном со структурными изменениями используемых материалов) остаётся минимизировать третье слагаемое выражения (1), связанное с изменениями вещества.

Минимум износа означает приближение энтропии к постоянному значению, соответственно спад до нуля значения производной производства энтропии по скорости или силе тока. Причем от скорости и тока зависят все величины, входящие в последнее слагаемое выражения (1).

Таким образом, требование к третьему слагаемому

$$w \frac{\Delta G(v)}{T(v)} \rightarrow \min \quad \text{и} \quad w \frac{\Delta G(v)}{T(v)} < 0 \quad (2)$$

В случае минимума износа

$$\frac{d(dS/dt)}{dv} = 0, \quad \frac{d(dS/dt)}{dI} = 0$$

Получается тогда, что изменение энтропии со скоростью и током связывается с протекающими структурными изменениями. Значения минимумов для выражения (1) определяются из выражения (3) - производной выражения (1) по скорости. Скорость протекания процессов w рассматривается как не зависящая от условий работы

$$\frac{d(dS/dt)}{dv} = \frac{w}{T^2} \left(T(v) \frac{d\Delta G}{dv} - \Delta G \frac{dT(v)}{dv} \right) \quad (3)$$

$T(v) > 0$, также чаще предполагается рост температуры со скоростью за счёт перехода работы трения в тепло ($dT/dv > 0$).

При всегда положительном знаменателе (T^2) и скорости протекания процесса w числитель выражения (3) может быть положительным и отрицательным, расти и снижаться (выражение 4, полученное из 3). Положительное значение выражения (4) означает рост энтропии и износа

$$T(v) \cdot \frac{d\Delta G}{dv} - \Delta G \cdot \frac{dT}{dv} > 0 \quad (4)$$

Снижение температуры со скоростью ($dT(v) < 0$) при движении считается возможным за счёт действия внешней среды, меньшего времени контакта, протекания эндотермических реакций, в том числе многих реакций с $\Delta G > 0$. Возможно и снижение температуры за счёт теплопроводности, но экспериментально оно не наблюдается.

Производная изменения свободной энергии ΔG по скорости в выражениях (3), (4) может иметь любой знак. В случае снижения изменения свободной энергии с ростом скорости - для соответствия выражению (4) значение этой производной не должно быть очень большим (или свободная энергия не должна сильно меняться с изменениями условий работы), а сама температура должна быть больше. Второе реализуется при более жёстких условиях работы и отсутствии отвода тепла.

Если ΔG снижается со скоростью, током и вызванной ими температурой, то тогда выражения (3) и (4) могут, в зависимости от самого значения ΔG , вначале иметь отрицательное значение. Это означает возможность наличия минимума зависимости износа от скорости. Также отрицательными будут выражения (3) и (4) при сильно положительном ΔG - то есть для инертных материалов.

При переходе ΔG в зависимости от условий с положительного значения на отрицательное ($d\Delta G/dv < 0$) при достаточно высокой температуре и её росте выражения (3) и (4) меняют знак с отрицательного на положительный, что означает наличие минимума. Минимум проявляется и как экспериментально наблюдаемый для износа при ужесточении условий работы. Он таким образом может быть объяснён как переход к структурным

изменениям, требующим определённых условий. Также могут протекать неравновесные химические процессы, к которым относится и восстановление углекислого газа металлами [4]. В обратном случае ($d\Delta G/dv > 0$) выражения (3), (4) имеют положительный знак с приближением к нулевому, то есть выход на максимум, с переходом в отрицательную сторону при снижении температуры. Это также проявляется как снижение износа после его прохождения через максимум.

Если $\Delta G > 0$, тогда выражение (4) выполняется при высоких температурах с тенденцией к их снижению ($dT/dv < 0$) или очень большим росте изменения свободной энергии со скоростью. Первое из требований реализуется при сильном ужесточении условий эксплуатации. Рост износа при таких условиях наблюдается и в экспериментах. Рост износа после спада связывается с разрушением ранее образовавшихся структур. В этом случае возможен спад после роста, в выражении (4) реализуется максимум. Переход от роста к спаду для выражения (4) возможен, если начнутся новые процессы с $\Delta G > 0$. Это может быть и новый вид структурных изменений после роста неупорядоченности с поступлением энергии (т.н. самоорганизация), характерный только для определённых условий. Снижение износа при определённых ненулевых значениях скорости и передаваемого тока считается признаком явлений, рассматриваемых как самоорганизация с возникновением новых структур.

Более вероятно при $\Delta G > 0$ и отсутствии сильного снижения температуры отрицательное значение выражений (3) и (4), что означает постоянный спад износа, а реализуется это при использовании сильно инертных, прочных и мало теплопроводных материалов, таких как металлокерамика.

При $\Delta G \approx 0$ (близко к равновесию) для положительного знака выражения (4) должен быть $d\Delta G/dv > 0$, рост свободной энергии со скоростью, током и температурой. Это возможно при прекращении с ужесточением условий ранее протекавших самопроизвольных процессов. В данном случае это может быть переход к опережающему разрушению образующихся новых структур в отношении к их образованию. Отрицательный знак выражение (4) примет в обратном случае - снижения изменения свободной энергии, что означает запуск процессов, способных перераспределять работу трения на своё осуществление. Сами же значения скорости и тока, при которых происходит этот переход, будут соответствовать максимуму износа, после которого начинается спад (переход выражения (4) к отрицательному знаку)

В этом случае для реализации выражения (4) изменение свободной энергии со скоростью или током должно быть как можно ближе к нулю.

При $\Delta G < 0$ выражение (4) в большинстве случаев будет положительным, за исключением сильно

близкого к нулю значения ΔG , или снижения температуры и свободной энергии со скоростью. Первое реализуется при увеличении скорости, усиления обдува и вызываемого им снижения температуры. Второе означает активизацию процессов с ужесточением условий работы, при этом желательна более низкая температура, соответственно условия в целом будут более мягкими.

Положительное значение выражения (4) означает рост износа, в том числе за счёт явлений с веществом, идущих самопроизвольно, например окисления.

Аналогичным приведённому для скорости образом можно доказать и значение тока в обеспечении минимума износа. (Тогда в используемых выражениях (3), (4) скорость заменяется на ток).

Зависимость интенсивности изнашивания от условий работы с их ужесточением, наблюдаемая для пары трения «контактный провод - токоёмные вставки», может быть иллюстрацией рассмотренных представлений. Провод был на основе меди, с неизменным во всех испытаниях составом. Контактные вставки имели углеродную основу как с введением в неё различных металлов в виде механической примеси - порошков металлов с размером частиц 5–25 мкм, так и без их введения. Первым экспериментом была оценка влияния природы вводимого металла на износ. Она проводилась при постоянной, небольшой скорости взаимного скольжения, 2 м/с или 7,2 км/ч, что исключает влияние снижения температуры со скоростью. Вводились железо, содержащая никель сталь, омеднённое железо, все в количестве 0,5–1,5% по массе. Первые два показывали очень низкий износ при низких токах (20 А), что объяснимо более высокой активностью железа по сравнению с медью. В случае отсутствия металла

его функцию – снижение износа за счёт протекания несамопроизвольных явлений – берёт на себя материал противоположного тела, контактного провода на основе меди [5]. Изменение свободной энергии предполагаемой реакции, ответственной за снижение износа – между металлами и углекислым газом с его восстановлением [4, 5] – ниже для более активных металлов, а температура при более мягких условиях ниже. За счёт этого выражение (4) смещается в меньшую сторону, означая минимизацию износа. Дальше для всех материалов был минимум износа при токе 40 А, тоже меньший при более активных металлах. Нельзя исключать и разные процессы при разных условиях, также зависящие от активности вводимых металлов, и разную зависимость изменения ΔG с условиями. Не проводилось и изучения состава поверхности для всех условий работы и материалов.

Перечисленные аналитические выводы при экспериментальном их подтверждении (на примере скользящих электрических контактов с изменяемым значением скорости взаимного скольжения и передаваемого тока) могут использоваться для подбора условий эксплуатации и выбора используемых в них материалов (на основе значений ΔG)

1. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. М.: Мир, 2002. - 416 с.
2. Мельник М.А. Скорость изнашивания в трибоспоряжениях при влиянии нескольких факторов. Вестник машиностроения, 2024, Т.103, №7, с. 566–571
3. Бершадский Л.И. Масштабное переупорядочение структуры и энтропийные эффекты при трении и износе материалов. В сборнике «Физика износостойкости поверхности металлов», 1988, с.166-182
4. Хайнике Г. Трибохимия. М.: Мир, 1986. - 582 с.
5. Гершман И.С., Мельник М.А., Гершман Е.И. Разработка износостойких токоёмных материалов на основе интенсификации несамопроизвольных химических процессов. Материаловедение, 2013, №4, с. 40–47

СНИЖЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ И ПОВЫШЕНИЕ АБРАЗИВНОЙ СТОЙКОСТИ ПОЛЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ПУЧКОМ БЫСТРЫХ АТОМОВ АРГОНА И ОСАЖДЕНИЕм ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ

Метель А.С., Волосова М.А., Мельник Ю.А., Мустафаев Э.С., Григорьев С.Н.

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия;
a.metel@stankin.ru

Предложена и апробирована обработка поверхности полых изделий ленточным пучком быстрых атомов аргона. Одновременная обработка пучком внутренней и внешней поверхностей вращающегося керамического цилиндра перед осаждением износостойкого покрытия обеспечивает однородность TiB_2 покрытия на обеих поверхностях, уменьшение их шероховатость до $Ra\ 0,01\ \mu m$ и снижение в несколько раз абразивного износа.

Цель

Для снижения шероховатости и повышения износостойкости полых керамических изделий требуется разработать устройство, позволяющее осаждать износостойкое покрытие на внешней и внутренней поверхностях изделия после их тщательной очистки и полировки.

Материалы и методы

На рис. 1 представлена установка для осаждения на вращающийся полый цилиндрический образец износостойкого покрытия TiB_2 после полирования его поверхности пучком быстрых атомов аргона. Она состоит из вакуумной камеры длиной 35 см и диаметром 36 см, герметично соединенной с прямоугольным корпусом длиной 70 см, высотой 14 см и шириной 30 см. Внутри камеры на 8 опорных керамических изоляторах закреплен полый катод из нержавеющей стали диаметром 34 см и длиной 34 см.

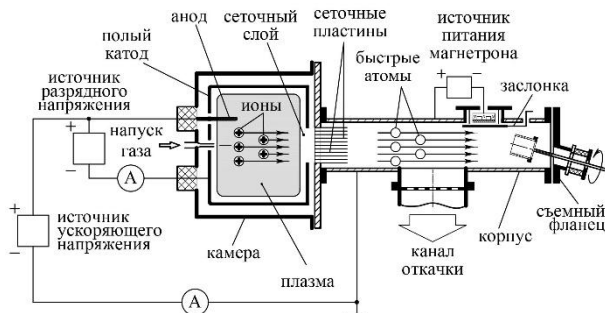


Рис. 1. Схема обработки образца пучком и магнетроном

В правой стенке цилиндрической камеры имеется прямоугольное отверстие шириной 21 см и высотой 7 см, перекрытое ускоряющей сеткой, состоящей из плоскостопараллельных титановых пластин толщиной 0,5 мм на расстоянии 5 мм друг от друга. Правая стенка полого катода расположена на расстоянии 1 см от стенки камеры и имеет такое же отверстие шириной 21 см и высотой 7 см. Ускоряющая сетка электрически соединена с камерой и с отрицательным полюсом источника ускоряющего напряжения. Положительный полюс источника соединен с анодом, который входит в отверстие полого катода. Между анодом и полым катодом подключен источник питания разряда.

Рабочий газ непрерывно подается в полый

катод, через сетку поступает в корпус и откачивается из него турбомолекулярным насосом.

Участки пластин сетки, граничащие с плазмой, имеют форму сегмента окружности радиусом 60 см (рис. 2). Поэтому траектории ускоренных в слое между плазмой и сеткой ионов, влетающих в зазоры между ее пластинами, а также траектории быстрых атомов, вылетающих из сетки после нейтрализации на поверхностях пластин зарядов ионов, направлены к центру этой окружности, удаленному на 60 см от сеточного слоя.

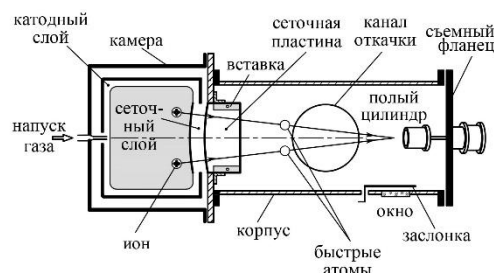


Рис. 2. Схема обработки полого керамического образца пучком быстрых атомов аргона (вид сверху)

На съемном фланце корпуса имеется устройство вращения держателя образца. Угол между осью вращения и осью корпуса составляет 15° . В верхней части корпуса установлен магнетрон с мишенью диаметром 10 см из диборида титана.

После того как камера откачана, ее заполняют аргоном под давлением 0,2 Па. Когда подаются напряжение разряда $\sim 400\text{ В}$ между анодом и полым катодом и ускоряющее напряжение 2000 В между анодом и сеткой, зажигается тлеющий разряд с полым катодом. Ток разряда I_p регулируется в диапазоне от 0,5 до 4 А изменением напряжения разряда U_p . Токи в цепях полого катода и сетки измеряются амперметрами. При токе в катодной цепи $I_k = 4\text{ А}$ ток сетки составляет $I_c = 0,2\text{ А}$.

Результаты и обсуждение

Для изучения обработки поверхностей полых керамических образцов пучками быстрых атомов аргона приобретены полые цилиндры длиной 30 мм с внутренним диаметром 30 мм и внешним диаметром 40 мм, изготовленные из оксида алюминия, нитрида кремния и диоксида циркония

(рис. 3). После установки съемного фланца с держателем и образцом на место установку откачивают до 0,001 Па, включают вращение держателя с образцом со скоростью 60 об/мин, подают в камеру аргон, повышают давление до 0,2 Па и зажигают тлеющий разряд с током в катодной цепи $I_k = 4$ А и током сетки $I_c = 0,2$ А.

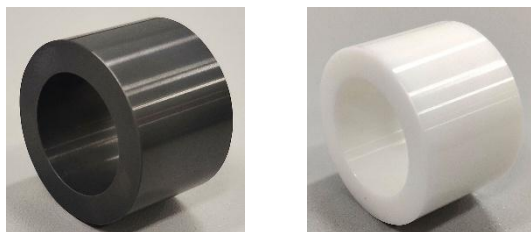


Рис. 3. Фотографии образцов из Si_3N_4 (слева) и ZrO_2 (справа)

Ускоренные в слое между плазмой и сеткой ионы с энергией 2 кэВ влетают в зазоры между пластинами. При контакте с пластинами ионы без изменения кинетической энергии и направления движения превращаются в быстрые нейтральные атомы [1]. Из-за криволинейной формы слоя между плазмой и сеткой (рис. 2) ширина поперечного сечения пучка, по пути от сетки до образца, уменьшается от 21 см до 1 см, а высота сечения в 7 см остается постоянной. Так образуется ленточный пучок.

Для измерения скорости распыления на поверхность образца наносили небольшие маски. Материалом маски служила корректирующая жидкость на водной основе с диоксидом титана (TiO_2). Маски наносились на образец кисточкой и имели форму точек диаметром 2 мм и толщиной 0,2 мм (после высыхания). После обработки образца пучком в течение часа, его извлекали из корпуса, удаляли маски влажной тканью, смоченной в спиртовом растворе, и с помощью стилусного профилометра Dektak XT производства Bruker Nano, Inc. (Billerica, MA, США) измеряли высоту ступеньки между закрытой маской и открытой поверхностями, равную толщине удаленного слоя.

На рис. 4 представлены зависимости высоты h закрывавшихся масками участков над распыленной поверхностью образца из Al_2O_3 от расстояния x до края образца.

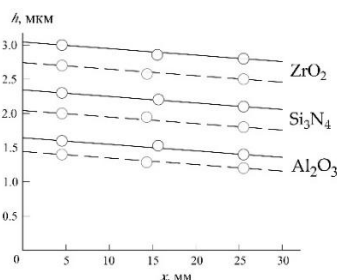


Рис. 4. Зависимость толщины h удаленного поверхностного слоя от расстояния x до края полого образца из Al_2O_3 , Si_3N_4 или ZrO_2 на его внешней (сплошные линии) и внутренней (штриховые линии) поверхностях

Такие же измерения были проведены с двумя другими образцами той же формы и размера, но изготовленными из другой керамики – нитрида кремния и оксида циркония. Оба образца обрабатывались в течение одного часа атомами аргона с энергией 2 кэВ и током пучка 0,18 А. Зависимости толщины удаляемого поверхностного слоя h от расстояния x до краев образцов Si_3N_4 и ZrO_2 представлены на рис. 5 вместе с данными для образца Al_2O_3 . Они демонстрируют достаточно однородную обработку пучком поверхностей образцов.

Профилометр Dektak XT использовался также для измерения шероховатости поверхности R_a образцов.

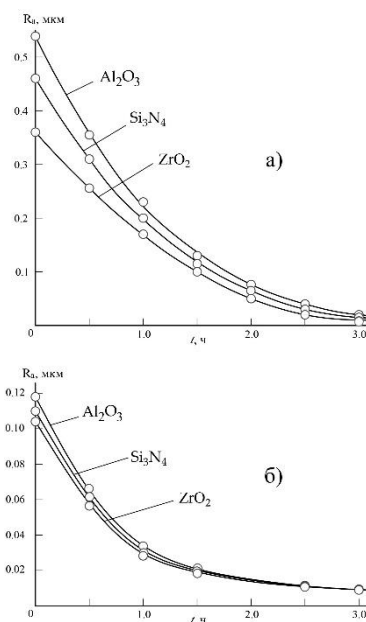


Рис. 5 Зависимости шероховатости R_a образца на его внутренней (а) и внешней (б) поверхностях от времени t обработки пучком быстрых атомов аргона

Сначала для каждого полого образца измерялась исходная шероховатость. Она составила R_a 0,118 мкм, 0,108 мкм и 0,104 мкм для внешних поверхностей образцов из Al_2O_3 , Si_3N_4 и ZrO_2 , соответственно. У всех приобретенных для проведения экспериментов образцов шероховатость внутренних поверхностей оказалась в несколько раз выше - R_a 0,532 мкм, 0,457 мкм и 0,357 мкм для образцов из Al_2O_3 , Si_3N_4 и ZrO_2 , соответственно.

После того, как образец Al_2O_3 в течение получаса подвергался воздействию атомов аргона с энергией 2 кэВ и током пучка 0,18 А, шероховатость его внешней поверхности уменьшилась от R_a 0,118 мкм до R_a 0,062 мкм, а шероховатость его внутренней поверхностей снизилась от R_a 0,532 мкм до R_a 0,36 мкм. Когда тот же образец был обработан в указанном режиме в течение еще получаса, шероховатость уменьшилась до R_a 0,040 мкм и R_a 0,224 мкм для внешней и внутренней поверхностей, соответственно. Дальнейшая обработка, продолжавшаяся 2 часа, привела к

уменьшению шероховатости до Ra 0,01 мкм для внешней и Ra 0,02 мкм для внутренней поверхности образца. Представленные на рис. 5 зависимости показывают, что распыление полых керамических цилиндров быстрыми атомами аргона при больших углах их падения на поверхность отличается быстрым снижением шероховатости поверхности.

Для обеспечения достаточной адгезии покрытия вращающийся образец предварительно обрабатывают в течение 10 мин пучком быстрых атомов аргона с энергией 2 кэВ при токе пучка 0,18 А. Затем энергию быстрых атомов снижают до 0,5 кэВ, а ток пучка уменьшают до 0,1 А. После включения источника питания магнетрона начинается осаждение покрытия TiB₂. В процессе осаждения покрытие подвергается бомбардировке пучком быстрых атомов аргона с энергией 0,5 кэВ и током 0,1 А.

После обработки в течение часа образца из Si₃N₄ его извлекли из корпуса, удалили с его поверхности маски и с помощью профилометра Dektak XT измерили высоту ступенек между закрытой маской и открытой поверхностями, равную толщине покрытия. На рис. 6 представлены зависимости толщины покрытия Δ от расстояния x до торца образца на его внешней (1) и внутренней (2) поверхностях.

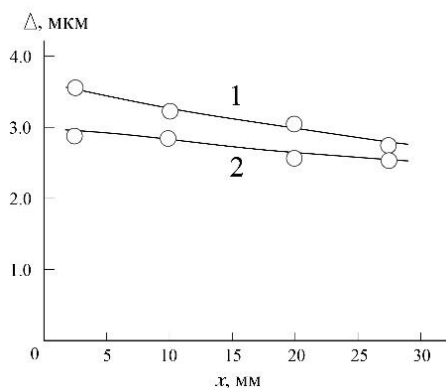


Рис. 6. Зависимость толщины покрытия Δ на внешней (1) и внутренней (2) поверхностях образца из керамики Si₃N₄ от расстояния x до его торца

Аналогичные измерения были проведены на двух других образцах из оксида алюминия и оксида циркония. Результаты были идентичны полученным для образца нитрида кремния.

Для удобства измерения микротвердости нанесенного покрытия и его абразивной стойкости из образцов вырезали по образующей цилиндра фрагменты длиной 3 см и шириной 6 мм. Для измерения абразивной стойкости использовали прибор Calotest производства CSM Instruments (Швейцария).

На вырезанный из образца фрагмент помещали вращающийся шарик радиусом $R = 10$ мм с нагрузкой 0,2 Н, а в зону контакта подавали абразивную суспензию. В результате на поверхности образца образуется эллиптическая

лунка. Большая диагональ лунки d определяется с помощью оптического микроскопа. Абразивный износ характеризуют объемом V материала, снятого из лунки. Поскольку ее размер во много раз меньше радиуса шарика, объем можно определить по формуле $V = (\pi \cdot d^4 / 64R) [r / (r \pm R)]^{-0.5}$, в которой знак «+» для лунки на внешней (выпуклой) поверхности образцов радиусом $r = 20$ мм и «-» для лунки на внутренней (вогнутой) – с радиусом $r = 15$ мм [2]. На рис. 7 представлены зависимости износа V от времени испытания t . Они показывают, что благодаря обработке образца пучком быстрых атомов аргона и нанесению износостойкого покрытия TiB₂ абразивный износ уменьшился в три раза.

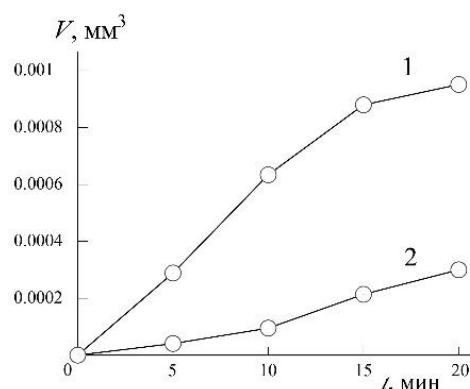


Рис. 7. Зависимость величины износа V от времени испытания t для образца из ZrO₂ до обработки (1) и после полировки поверхности образца и нанесения износостойкого покрытия (2)

Для определения характеристик покрытия, нанесенного на образец, использовали твердомер и скретч тестер, изготовленный компанией Nanovea Mechanical Testing (Ирвайн, Калифорния, США). Микротвердость покрытия равна 2150 HV40. Первая критическая нагрузка, приводящая к появлению акустической эмиссии и первых трещин на покрытии, составила 18 Н. Довольно хорошая адгезия достигнута благодаря активации поверхности быстрыми атомами аргона перед нанесением покрытия и бомбардировке покрытия быстрыми атомами аргона в процессе нанесения.

Заключение

1. С помощью пучка быстрых атомов аргона можно наносить износостойкие покрытия на внутренние поверхности изделий сложной формы и заметно повысить их износостойкость.

2. Полирование изделия пучком быстрых атомов аргона с большим углом падения на его поверхность позволяет снизить шероховатость поверхности до Ra 0,01 мкм.

3. Благодаря предварительной обработке изделий пучком быстрых нейтральных атомов перед нанесением износостойкого покрытия существенно улучшена адгезия покрытия и в три раза снижен абразивный износ.

Работа выполнена при финансовой поддержке
Российского научного фонда, грант № 23-19-00517.

Исследование проводилось на оборудовании
центра коллективного пользования МГТУ
«СТАНКИН».

1. Nam S.K., Economou D.J., Donnelly V.M. Generation of fast neutral beams by ion neutralization in high-aspect-ratio holes: A particle-in-cell simulation study // IEEE Trans. Plasma Sci. 2007. V.35. P.1370—1378.
2. Rutherford K.L., Hutchings I.M. Micro-scale abrasive wear testing of PVD coatings on curved substrates // Tribol. Lett. 1996. V.2. P.1—11.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА НА ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО ТИТАНА В ПРОЦЕССЕ ПРОКАТКИ

Мисоченко А.А.

¹Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; ls3216@yandex.ru

В работе проведено сравнение деформационной способности ультрамелкозернистого титана Grade 4 при прокатке без тока и прокатке с одновременным воздействием импульсного тока. Показана возможность повышения деформируемости в 1,8 раза по сравнению с традиционной холодной прокаткой при сохранении стабильности исходной микроструктуры. Проведена оценка распределения микротвердости по диаметру образцов до и после прокатки.

Цель

В настоящее время существует широкий спектр методов для получения ультрамелкозернистой (УМЗ) структуры материалов (например, ИПДК, РКУП и др.) с целью повышения механических и эксплуатационных характеристик готового изделия [1]. Однако, несмотря на потенциал данных методов, применение УМЗ материалов в реальности ограничено вследствие высокой сложности технологической обработки полуфабрикатов из них. Недостаток таких материалов - ограниченная пластичность и деформационная способность [2]. Существует риск образования трещин даже на небольших степенях деформации. Традиционные методы обработки металлов давлением (ОМД) не обеспечивают достаточной деформируемости УМЗ-материалов без применения нагрева. Нагрев же в свою очередь может привести к росту зерна и снижению исходных механических и эксплуатационных свойств сплавов. Поэтому актуальным является поиск/модификация известных методов ОМД для решения задачи повышения деформационной способности УМЗ материалов, в частности титана, с сохранением стабильности исходной структуры. Одним из вариантов решения такой задачи может быть воздействие импульсным электрическим током в процессе деформации [3].

Цель работы — исследование возможности повышения деформируемости ультрамелкозернистого титана Grade 4 путем применения импульсного электрического тока в процессе холодной прокатки.

Материалы и методы

Исходный материал — УМЗ титан Grade 4, полученный методом многопроходной поперечно-винтовой прокатки [4], в виде прутков диаметром 4,5 мм. На рисунке 1 представлены результаты просвечивающей электронной микроскопии, которые свидетельствуют о наличии однородной УМЗ-структуры, состоящей из α -зёрен (субзерен) средним размером $d = 200 \pm 20$ нм. Средняя микротвёрдость составила 2950 МПа. Механические характеристики прутков в

продольном направлении: предел прочности $\sigma_v = 1080$ МПа, относительное удлинение $\delta = 12\%$.

Для оценки деформационной способности исходные прутки подвергали многопроходной холодной прокатке (ХП) в калибрах на прокатном стане, оборудованном генератором импульсного тока ГИТ при разовом обжатии (Δd) за проход 50 и 100 мкм. Подача тока плотностью 20 А/мм², длительностью импульса 100 мкс, скважностью 10 и частотой 1000Гц осуществлялась через один из валков и подающий стол. После каждого прохода прутки охлаждали в воде. Деформируемость оценивалась по величине предельной истинной деформации ($e = \ln(d_0/d)$, где d_0 и d — диаметр прутка до и после прокатки, мм) до разруш

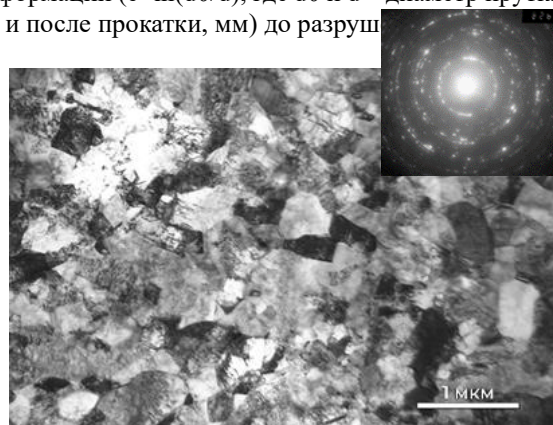


Рис. 1. ПЭМ-изображение и дифракционная картина ультрамелкозернистого титана Grade 4

Результаты и их обсуждение

В таблице 1 представлены результаты оценки деформируемости при холодной прокатке и прокатке с одновременным воздействием импульсного тока.

Таблица 1. Предельная истинная деформация УМЗ титана

Режим прокатки	Разовое обжатие за проход, мкм	Истинная деформация до появления первых трещин, e
без тока	50	0.49
с током 20 А/мм ²		0.88
без тока	100	0.80
с током 20 А/мм ²		1.27

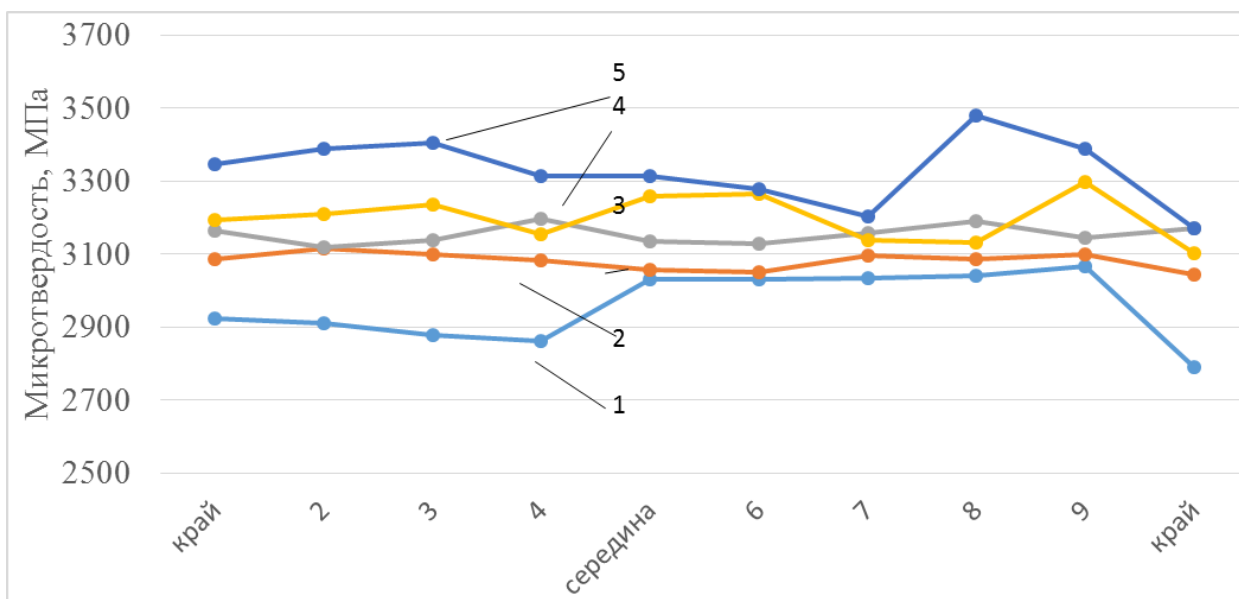


Рис.2. Распределение микротвердости по диаметру УМЗ Ti Grade 4 после ХП: 1 – исходный, 2 и 4 – без тока с разовым обжатием 50 ($\epsilon=0,44$) и 100 мкм ($\epsilon=0,8$), соответственно; 3 ($\epsilon=0,88$) и 5 ($\epsilon=1,27$) – с током с разовым обжатием 50 и 100 мкм, соответственно

На рис.2 представлены результаты измерения микротвердости по диаметру образцов до и после прокатки с током и без тока. Отклонение от среднего значения во всех случаях не превышает 4,5%, что косвенно свидетельствует о сохранении однородности и стабильности исходной УМЗ структуры. При этом виден закономерный рост микротвердости с ростом степени деформации вне зависимости от наличия тока при прокатке. Этот факт свидетельствует о деформационном наклепе с повышением степени деформации и подтверждает отсутствие значительного нагрева, который мог бы этот наклеп компенсировать. Однако для подтверждения этого необходимы детальные структурные исследования.

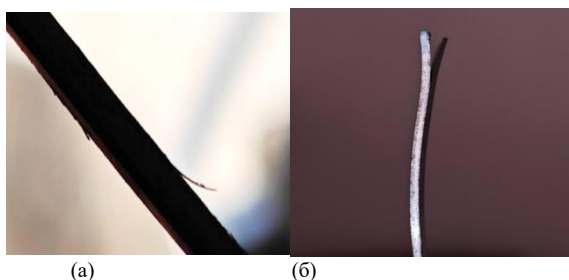


Рис.3. Поверхностные «заусенцы» (а) и вид разрушения при прокатке без тока (б) УМЗ Ti Grade 4 с разовым обжатием 50 мкм

Изучение вида и характера разрушения показало, что при прокатке без тока и разовом обжатии 50 мкм уже на ранних стадиях деформации ($\epsilon \approx 0,2$) наблюдается появление поверхностных дефектов типа заусенцев, а разрушение происходит при степени деформации $\epsilon = 0,49$ в результате расщепления от продольной краевой трещины (рис.3). Повышение единичного обжатия до 100 мкм увеличивает степень деформации до момента

разрушения до $\epsilon \approx 0,80$, то есть само по себе повышает деформируемость УМЗ

титана. При этом разрушение инициируется продольным расщеплением в середине образца.

При прокатке с током плотностью 20 А/мм² для единичного обжатия за проход 50 мкм разрушение наступает от трещины в центре (рис.4а) при $\epsilon = 0,88$.

Это свидетельствует об увеличении деформационной способности материала при использовании импульсного тока почти в 1,8 раза по сравнению с прокаткой без тока при том же единичном обжатии.

При увеличении единичного обжатия за проход до 100 мкм при применении тока 20 А/мм² разрушение имеет хрупкий характер и наступает при $\epsilon = 1,27$ (увеличение примерно в 1,6 раза), рис.4б.

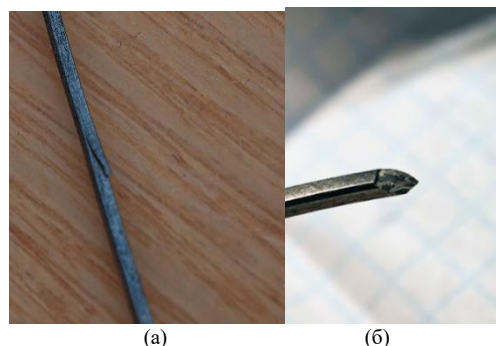


Рис.4 Вид разрушения при прокатке с током плотностью 20 А/мм² с разовым обжатием 50 (а) и 100 (б) мкм УМЗ Ti Grade

Заключение

Таким образом, в ходе работы всесторонне исследовано влияние импульсного электрического

тока на процессы пластической деформации ультрамелкозернистого титана при прокатке в калибрах. Сопоставление данных по деформируемости, микроструктурных исследований, измерений микротвёрдости и результатов статических испытаний на растяжение показало, что применение тока плотностью 20 А/мм² при единичном обжатии за проход 100 мкм позволяет повысить деформируемость заготовок, сохранив при этом ультрамелкозернистую структуру. Применение внешнего воздействия импульсным током при прокатке обеспечивает существенное повышение деформируемости: при плотности тока 20 А/мм² образцы выдерживают на 60–80% большую суммарную деформацию до разрушения по сравнению с традиционной прокаткой без тока. При этом качество поверхности остаётся высоким — без трещин и заусенцев.

Работа выполнена за счет средств

Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0023

1. Faraji G., Torabzadeh H. An Overview on the Continuous Severe Plastic Deformation Methods // Mater. Trans. 2019. Vol. 60, No. 7, P. 1316–1330.
2. Semenova I.P., Polyakova V.V., Dyakonov G.S., Polyakov A.V. Ultrafine-grained titanium-based alloys: structure and service properties for engineering applications // Adv. Eng. Mater. 2020. Vol. 22, No. 3, Art. 1900651.
3. Корольков О. Е., Мисоченко А.А., Столяров В.В. Электростимулированная пластичность титана при растяжении // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. 2024. № 16. С. 658-669. 10.26456/pcascnn/2024.16.658.
4. Zherebtsov S., Dyakonov G., Salem A., Malysheva S., Salishchev G., Semiatin S. Evolution of grain and subgrain structure during cold rolling of commercial-purity titanium // Materials Science and Engineering A-structural Materials: Properties, Microstructure and Processing – 2011. P. 3474-3479. 10.1016/j.msea.2011.01.039.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИИ ТВЁРДЫХ СМАЗОК

Михеев А. В., Тананов М. А.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва

В статье рассмотрены особенности проведения испытаний твёрдых смазочных покрытий на машине трения по схеме диск-сфера. Приведены структура и принципы работы разработанной системы управления. Даны результаты измерения силы трения и параметров колебаний при испытании твёрдых смазок. Показана связь спектра акустической эмиссии и коэффициентом трения.

Проблема трения является одной из самых актуальных в области инженерно-технических приложений. Сухое и граничное трение может вызывать нежелательный автоколебательный режим. Автоколебания имеют прерывистый характер и проявляются в виде скачкообразных перемещений (скачков) скользящих поверхностей при упругом закреплении одной из них. Автоколебания являются помехой в работе большого количества технических устройств, имеющих в своем составе подвижные механические элементы.

Экспериментальные исследования этого явления [1] показали следующее: амплитуда и частота колебаний зависят от скорости скольжения, массы подвижного тела и жесткости системы; первое колебание значительно больше последующих. Появление скачкообразных перемещений

объясняется наличием отрицательного участка характеристики трения скольжения [2].

Измерение колебаний при трибологических испытаниях твердых смазочных материалов затруднено большой инерционностью механических систем и ограниченным быстродействием измерительных устройств в широко распространенных трибометрах. В ИМАШ РАН был разработан трибометр (применённый при экспериментах, описанных в работе [3]) для испытания твёрдых смазок и антифрикционных покрытий, учитывающий указанные особенности процесса трения. Конструкция трибометра показана на рисунке 1. Узел трения реализует схему вращающийся диск – неподвижный шар.

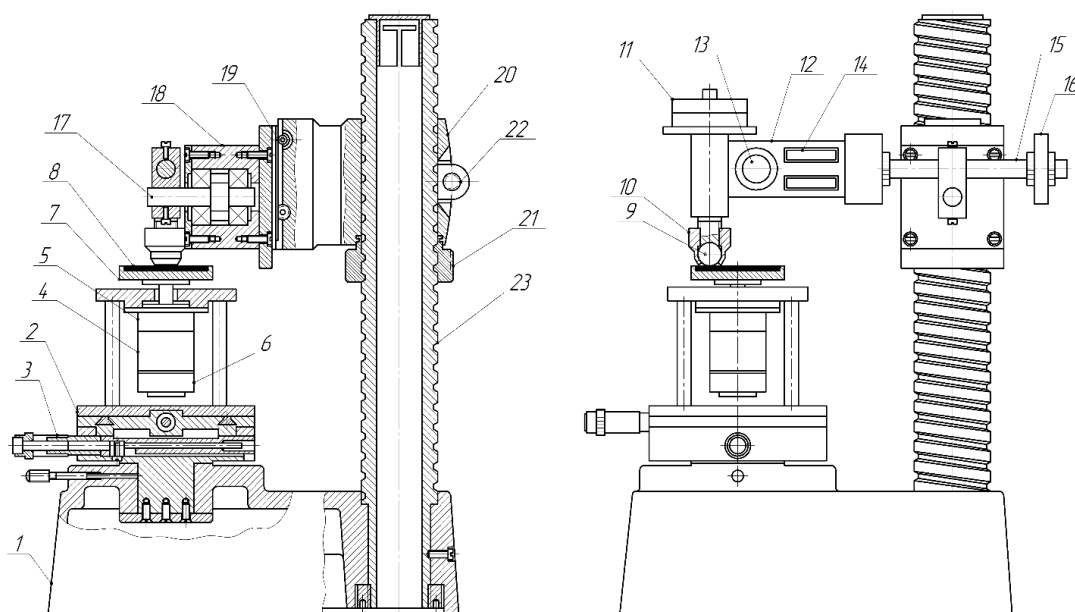


Рис. 1. Конструкция трибометра

Все компоненты трибометра размещены на основании 1. Узел привода образца размещён на координатном столике 2, который перемещается микрометрическими винтами 3. Перемещение столика позволяет менять диаметр дорожки трения и проводить несколько испытаний на одном образце, а также подстраивать узел трения под образцы различного размера и формы. Вращательное

движение образец получает от электродвигателя постоянного тока 4 через планетарный редуктор 5. Для стабилизации частоты вращения на валу двигателя установлен тахогенератор 6. Образец 8 закрепляется в углублении держателя 7, соединённого с выходным валом редуктора. Благодаря сменным держателям возможно проведение испытаний с дисковыми и

прямоугольными образцами.

Контр-образец 9 в виде шара диаметром 8 мм установлен в держатель 10 с конической гайкой. Нормальная нагрузка на шар создаётся при помощи наборных грузов 11, закреплённых на штоке держателя 10. Держатель контр-образца соединён с тензобалкой 12, которая служит для измерения силы трения при помощи тензорезисторов 14. Так же на тензобалке расположен пьезодатчик 13 предназначенный для измерения высокочастотных колебаний в узле трения. Второй конец тензобалки закреплён на рычаге 15, который может поворачиваться вокруг горизонтальной оси 17 за счёт подшипникового узла 18. Груз 16 уравнивает вес тензобалки и держателя с шаром. Подшипниковый узел 18 установлен на механизме перемещения с зубчатой рейкой 19, позволяющем устанавливать рычаг 15 в горизонтальное положение независимо от толщины образца 8. Неподвижная часть механизма 19 закреплена на кронштейне 20, который имеет возможность перемещаться по резьбовой стойке 23 при помощи гайки 21. Во время испытаний кронштейн фиксируется винтом 22. Применение резьбовой стойки обеспечивает грубую регулировку узла трения по высоте и облегчает замену держателя 7.

Блок-схема системы управления приведена на

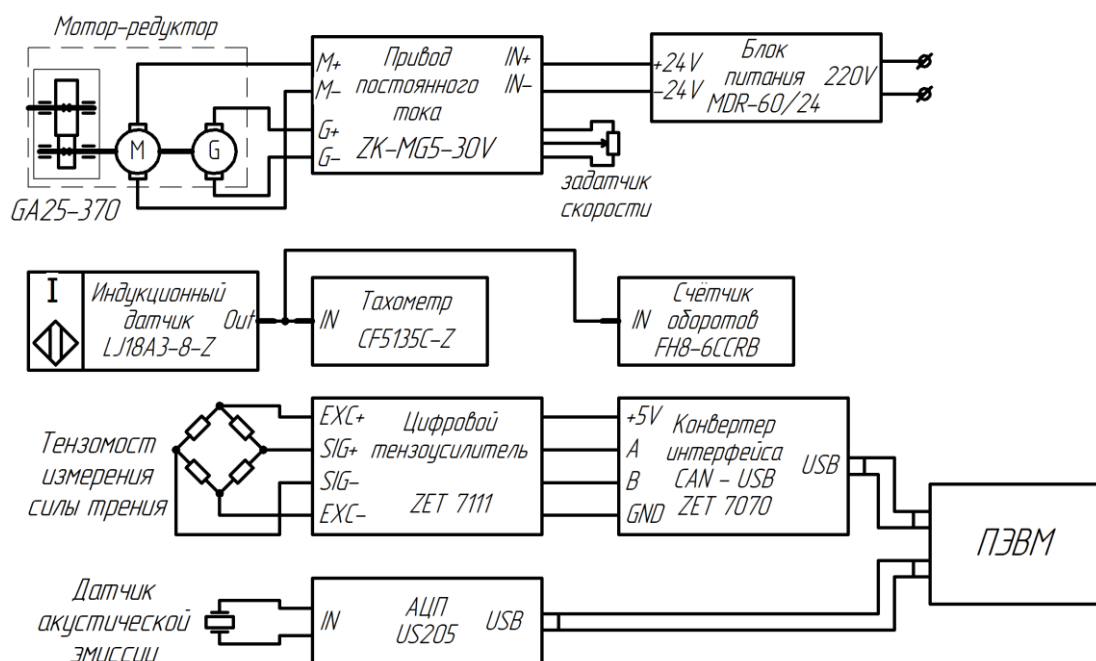


Рис. 2. Блок-схема системы управления трибометра

Подсистема измерения силы трения содержит два канала: низкочастотный с тензорезисторами, включенными по мостовой схеме, и высокочастотный с пьезодатчиком акустической эмиссии.

Цифровой тензоусилитель ZET7111 обеспечивает усиление и нормирование сигнала с

рисунке 2. Система управления состоит из двух основных подсистем: первая отвечает за управление движением образца, вторая – измерение и регистрацию силы трения.

Подсистема управления движением образца состоит из привода постоянного тока, коллекторного двигателя с планетарным редуктором 1/10 и тахогенератором, индукционного датчика, счётчика оборотов и тахометра.

Привод постоянного тока ZK-MG5-30V служит для питания электродвигателя GA25-370 и поддержания заданной частоты вращения при помощи обратной связи по напряжению тахогенератора и току двигателя. Питание привода осуществляется от стабилизированного импульсного источника питания MDR-60/24 напряжением 24 В. Регулировка частоты вращения производится резистивным задатчиком.

Индукционный датчик LJ18A3-8-Z установлен на фланце электродвигателя и срабатывает при обороте держателя образца. Выходной сигнал датчика параллельно подключен к тахометру CF5135C-Z и счётчику оборотов FH8-6CCRB. Тахометр служит для точной регулировки частоты вращения образца. Счётчик отображает число оборотов, совершенное образцом, и служит для своевременного отключения двигателя.

значений с частотой до 100Гц. Результаты измерения низкочастотного канала в цифровой форме передаются по CAN шине на преобразователь интерфейса ZET7070, который подключен к персональному компьютеру (ПЭВМ). Обработка постоянной составляющей и низкочастотных колебаний осуществляется в программе ZET-View.

Высокочастотный канал состоит из пьезокерамического датчика и АЦП с зарядочувствительным усилителем. Выходной сигнал передаётся в ПЭВМ через USB шину. Обработка сигнала с построением спектрограмм и фильтрацией шума подшипников двигателя и редуктора производится в программе SpectraLab. Частотный диапазон 20...20000 Гц позволяет фиксировать фрикционные колебания силы трения.

На описанной машине трения были

произведены измерения параметров высокотемпературных твёрдых смазочных покрытий производства ВНИИНП. Покрытия наносились на круглые (диаметром 40мм) и квадратные (30х30мм) образцы из нержавеющей стали 12Х18Н9Т. В качестве контр-образца применён шар из карбида вольфрама диаметром 8мм. Материал практически шара и длительность испытаний (5 мин.) исключает износ контр-образца во время измерения. Частота вращения: 50 об/мин.

На образцах наблюдаются кольцевые следы (рисунок 3), но, так как разрушение покрытия не происходила, глубину следов профилометр не регистрирует. Ширину дорожки трения контролируют после испытаний при помощи профилометра или инструментального микроскопа.



Рис. 3. Дорожки трения на круглом и прямоугольном образцах после испытаний

На графиках силы трения, полученных по низкочастотному каналу, наблюдаются колебания, вызванные первой и второй гармониками частоты вращения, как показано на рисунке 4. Эти колебания вызваны торцевыми биениями образцов, возникающими по причине погрешности формы

образца и неплотного прилегания образца к держателю. Для вычисления силы резания без влияния низкочастотных помех в программе ZET-View реализован фильтр «скользящее среднее» с накоплением значений за 10 секунд.

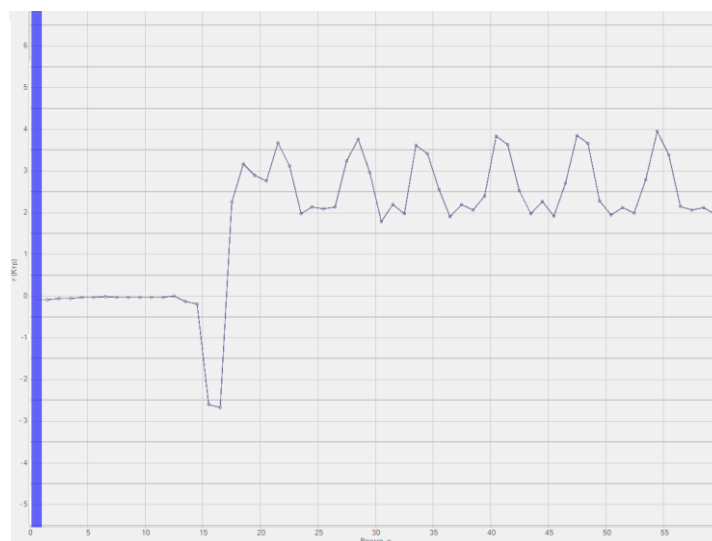


Рис. 4. График силы трения

Спектр сигнала в высокочастотном канале так же содержит помехи, не зависящие от нагрузки и

свойств образца. Типичная спектрограмма показана на рисунке 5. Первый пик 80Гц – шум подшипников

двигателя. Широкие полосы с центральными частотами 630Гц и 1200Гц – электрические помехи от коммутации в коллекторе и щеточном узле

двигателя.

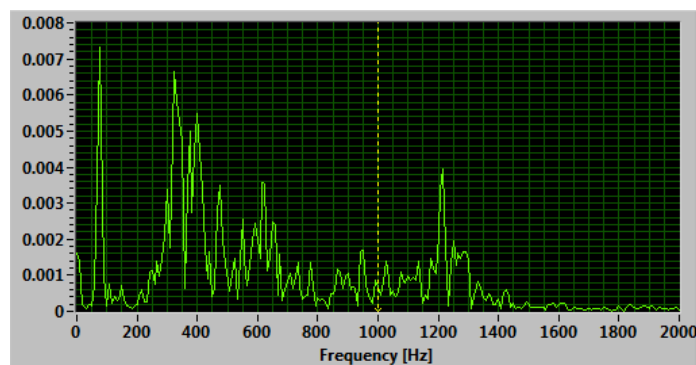


Рис. 5. Пример спектра колебаний

Все три частоты помех однозначно связаны с частотой вращения. Эти частоты измеряются заранее при включении привода без установки образца и отфильтровываются программными режекторными фильтрами при обработке спектрограмм.

Фрикционные колебания регистрируются в диапазоне частот 100...500Гц. Частота и амплитуда фрикционных колебаний при неизменных режимах испытаний и качестве обработки поверхности

образцов зависит от свойств покрытия. Частота пика в спектре определялась при помощи функции взаимной корреляции, описанной в статье [4], при постобработке записанных данных.

Данные, полученные при испытании антифрикционных покрытий приведены в таблице 1. Для каждого сочетания покрытия и нагрузки проведены не менее 5 испытаний. Повторяемость значений силы трения и частот фрикционных колебаний составила не более 5%.

Таблица 1. Данные испытаний

Смазка	Нагрузка 10гс		Нагрузка 20гс	
	Коэффициент трения	Частота, Гц	Коэффициент трения	Частота, Гц
ВНИИНП212	0,24	366	0,25	361
ВНИИНП230	0,285	363	0,248	363
ВНИИНП250	0,335	393	0,319	402
ВНИИНП251	0,425	385	0,28	420
ВНИИНП504	0,255	352	0,245	359

При увеличении нагрузки в большинстве случаев наблюдается уменьшение коэффициента трения. В работе [5] показано, что низкочастотная составляющая (до 10кГц) колебаний вызвана адгезионным взаимодействием в паре трения, характерным для трения сухого. При разрушении поверхностного слоя и отделении частиц износа происходит падение коэффициента трения.

Заключение

Регистрация трибологических характеристик при помощи цифровой системы сбора данных значительно сокращает время обработки результатов, повышает точность определения момента начала неустойчивости коэффициента трения и разрушения покрытия. Для исключения флуктуаций коэффициента трения от механических помех разработана специальная методика обработки результатов измерения.

Применение датчика акустической эмиссии

позволяет сделать вывод о характере трения и степени износа покрытия до начала скачкообразного роста силы трения.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания FFGU-2024-0023.

1. Ле Су Ань. Динамика систем с кулоновым трением (теория и эксперимент). СПб: Нестор, 1999. 299 с.
2. Крагельский И. В., Щедров В. С. Развитие науки о трении (сухое трение). М.: Изд-во АН СССР, 1956. 235 с.
3. Петрова И.М., Марченко Е.А., Хрущов М.М., Буяновский И.А.// Структурные и функциональные закономерности накопления повреждений и разрушения металлов при динамическом нагружении и износе // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2023. – Т. 89, № 10. – С. 74-82.
4. Подосенова Т.Б. Алгоритм локализации пиков в компьютерной системе обработки спектров // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. 2015. №20. - С. 102-107.
5. Колубаев Е.А., Сизова О.В., Пупынин С.А. Особенности акустического излучения при трении стали Гадфильда // Известия ТПУ. 2011. №2. - С. 62-66

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ И ГИПЕРКОМПЛЕКСНЫХ ЧИСЕЛ К СОСТАВЛЕНИЮ СИСТЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ АНТРОПОИДОВ СО ЗВЕНЬЯМИ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИНЫ НА ПЛОСКОСТИ И В ПРОСТРАНСТВЕ

Мухарлямов Р.Г.¹, Борисов А.В.¹, Каспирович И.Е.¹, Маслова К.С.¹

¹Институт физических исследований и технологий, ФГАОУ ВО Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия; borisowandrej@yandex.ru

Изложены результаты разработки новых скоростных методов составления систем дифференциальных уравнений движения для многозвенных механизмов антропоидной структуры с применением комплексных чисел для моделей на плоскости и гиперкомплексных чисел для пространственных устройств. В качестве примера рассмотрены двузвенные модели. Численно проведено исследование различных способов аппроксимации моментов при программном способе управления движением моделью антропоида.

Введение

Носимая робототехника, включающая экзоскелеты, накладки и роботизированные конечности, позиционируется как технологические решения, которые помогают людям с ограниченными возможностями вернуться к активной деятельности, здоровым людям для усиления функций мышц и защиты от нежелательных внешних воздействий [1,2]. Практические модели экзоскелетов созданные в настоящее время проанализированы в [3]. Вопросы управления механическими системами рассмотрены в [4,5]. На основании анализа и обобщения научных источников можно предложить следующую схему синтеза экзоскелетов (рис. 1).



Рис. 1. Схема синтеза экзоскелета

Вопросы применения комплексных чисел и кватернионов к исследованию механических систем и их практическим применениям изложено в [6-11].

Применение комплексных чисел к моделированию антропоида на плоскости

Не нарушая общности рассуждений, рассмотрим разработанную методику на примере двумерной модели антропоида с двумя подвижными звеньями переменной длины (рис. 2). Для записи системы дифференциальных уравнений движения модели антропоида со звеньями переменной длины используем аппарат комплексной алгебры. Пусть углы ψ_1 и ψ_2 , определяющие положения звеньев на плоскости xOy , в рассматриваемой модели отсчитываются от горизонтали (рис. 2)

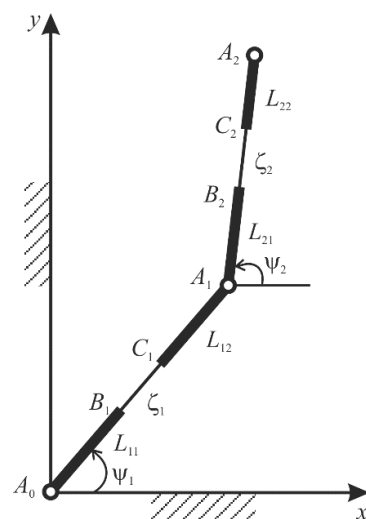


Рис. 2. Схема антропоида на плоскости с двумя звеньями переменной длины

Помимо углов, положение модели антропоида определяют переменные длины участков звеньев ζ_1 и ζ_2 . Указанные выше углы и изменяемые длины звеньев считаются функциями времени и принимаются за четыре обобщенных координаты рассматриваемой модели. Участки переменной длины B_1C_1 и B_2C_2 на звене считаются невесомыми. Участки, расположенные на концах звеньев A_0A_1 и A_1A_2 считаются инерционными с массами m_{11} , m_{12} , m_{21} , m_{22} и моментами инерции I_{11} , I_{12} , I_{21} , I_{22} соответственно длинам участков, обозначенных на рис. 2. С использованием идеальных невесомых

цилиндрических шарниров два звена соединяются между собой, и с их помощью модель антропоида крепится к опорной поверхности.

Положение центра масс каждого инерционного подвижного участка звена на рис. 2 описывается комплексной функцией, которую представим в показательной форме записи:

$$w_{11} = L_{11}n_{11}e^{j\psi_1}, \quad (1)$$

$$w_{12} = (L_{11} + \zeta_1 + L_{12}n_{12})e^{j\psi_1}, \quad (2)$$

$$w_{21} = (L_{11} + \zeta_1 + L_{12})e^{j\psi_1} + L_{21}n_{21}e^{j\psi_2}, \quad (3)$$

$$w_{21} = (L_{11} + \zeta_1 + L_{12})e^{j\psi_1} + (L_{21} + \zeta_2 + L_{22}n_{22})e^{j\psi_2}. \quad (4)$$

В формулах (1)-(4) введены следующие обозначения: n_{11} , n_{12} , n_{21} , n_{22} – постоянные коэффициенты, определяющие положения центров масс звеньев, $j^2 = -1$ – мнимая единица.

Дифференцируя по времени формулы (1)-(4), определяем комплексные скорости центров масс звеньев антропоида:

$$\frac{dw_{11}}{dt} = L_{11}n_{11}e^{j\psi_1}j\frac{d\psi_1}{dt}, \quad (5)$$

$$\frac{dw_{12}}{dt} = \left(\frac{d\zeta_1}{dt} + (L_{11} + \zeta_1 + L_{12}n_{12})j\frac{d\psi_1}{dt}\right)e^{j\psi_1}, \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dw_{21}}{dt} = & \left(\frac{d\zeta_1}{dt} + (L_{11} + \zeta_1 + L_{12})j\frac{d\psi_1}{dt}\right)e^{j\psi_1} + \\ & + L_{21}n_{21}e^{j\psi_2}j\frac{d\psi_2}{dt}, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dw_{21}}{dt} = & \left(\frac{d\zeta_1}{dt} + (L_{11} + \zeta_1 + L_{12})j\frac{d\psi_1}{dt}\right)e^{j\psi_1} + \\ & + \left(\frac{d\zeta_2}{dt} + (L_{21} + \zeta_2 + L_{22}n_{22})j\frac{d\psi_2}{dt}\right)e^{j\psi_2}. \end{aligned} \quad (8)$$

Далее, после выделения действительных компонент, находится кинетическая энергия модели антропоида со звеньями переменной длины как функция действительного аргумента.

$$\begin{aligned} 2T = & m_{11}L_{11}^2n_{11}^2\left(\frac{d\psi_1}{dt}\right)^2 + \\ & + m_{12}\left[\left(\frac{d\zeta_1}{dt}\right)^2 + (L_{11} + \zeta_1 + L_{12}n_{12})^2\left(\frac{d\psi_1}{dt}\right)^2\right] + \\ & + m_{21}\left[\left(\frac{d\zeta_1}{dt}\right)^2 + (L_{11} + \zeta_1 + L_{12})^2\left(\frac{d\psi_1}{dt}\right)^2 + \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + 2L_{21}n_{21}\sin(\psi_1 - \psi_2)\frac{d\zeta_1}{dt}\frac{d\psi_2}{dt} + L_{21}^2n_{21}^2\left(\frac{d\psi_2}{dt}\right)^2 + \\ & + 2L_{21}n_{21}(L_{11} + \zeta_1 + L_{12})\cos(\psi_1 - \psi_2)\frac{d\psi_1}{dt}\frac{d\psi_2}{dt} + \\ & + m_{22}\left[\left(\frac{d\zeta_1}{dt}\right)^2 + \left(\frac{d\zeta_2}{dt}\right)^2 + (L_{11} + \zeta_1 + L_{12})^2\left(\frac{d\psi_1}{dt}\right)^2 + \right. \\ & + (L_{21} + \zeta_2 + L_{22}n_{22})^2\left(\frac{d\psi_2}{dt}\right)^2 - \\ & - 2(L_{11} + \zeta_1 + L_{12})\sin(\psi_1 - \psi_2)\frac{d\zeta_2}{dt}\frac{d\psi_1}{dt} + \\ & + 2(L_{11} + \zeta_1 + L_{12})(L_{21} + \zeta_2 + L_{22}n_{22})\cos(\psi_1 - \psi_2)\frac{d\psi_1}{dt}\frac{d\psi_2}{dt} + \\ & + 2\cos(\psi_1 - \psi_2)\frac{d\zeta_1}{dt}\frac{d\zeta_2}{dt} + \\ & \left. + 2\sin(\psi_1 - \psi_2)(L_{21} + \zeta_2 + L_{22}n_{22})\frac{d\zeta_1}{dt}\frac{d\psi_2}{dt}\right]. \end{aligned} \quad (9)$$

Использование функций комплексного переменного позволило на этапе подсчета кинетической энергии рассматриваемой модели, сократить трудоемкость операций, что важно при рассмотрении моделей с достаточно большим количеством звеньев, приближающихся по своей структуре к подвижностям реального опорно-двигательного аппарата человека.

Затем уравнения движения составляются с использованием уравнений Лагранжа второго рода. Применяя полученную систему дифференциальных уравнений можно проводить решение как прямой, так и обратной задачи, исследовать модели управления и т.д.

Использование гиперкомплексных чисел к моделированию антропоида в пространстве

Рассмотрим трехмерную модель антропоида с двумя подвижными звеньями переменной длины (рис. 3). Структура механизма и обозначения аналогичны плоской модели, представленной на (рис. 2). Для решения задачи составления системы дифференциальных уравнений движения применяется аппарат гиперкомплексной алгебры.

Определим половинные кватернионы, задающие повороты звеньев вокруг координатных осей локальных систем координат [7-11]:

$$q_{\alpha_n} = \cos(\alpha_n/2) + \sin(\alpha_n/2) \cdot i, \quad (10)$$

$$q_{\beta_n} = \cos(\beta_n/2) + \sin(\beta_n/2) \cdot j, \quad (11)$$

$$q_{\gamma_n} = \cos(\gamma_n/2) + \sin(\gamma_n/2) \cdot k, \quad (12)$$

где $n = 1, 2$ – номера звеньев, i, j, k – мнимые единицы.

Далее процедура составления системы уравнений движения похожа на процедуру для плоской модели, но имеет некоторые особенности,

связанные со спецификой кватернионов и перехода к действительным функциям.

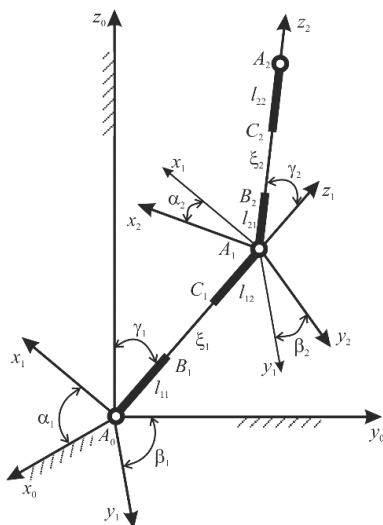


Рис. 3. Схема антропоида в пространстве с двумя звеньями переменной длины

Результаты численного моделирования

В работе рассмотрены решения прямой и обратной задач динамики. Проведено сравнение моментов, реализуемых двигателями в шарнирах, соединяющих звенья, в виде различных функций: ступенчатыми, полиномами третьей степени, интерполяционными многочленами. В результате численного моделирования показано, что применение ступенчатых функций, моделирующих импульсный характер реальной ходьбы человека, является неудачным с точки зрения реализации в двигатели экзоскелета, вследствие разрывов в ускорениях. Аппроксимирующие полиномы третьей степени, являясь минимально достаточными, снижают требования к двигателям экзоскелета, но возникают значительные погрешности при численном интегрировании. Наилучшее приближение к исходному движению экзоскелета имеет интерполяционный многочлен, но у него достаточно высокая степень. Это вызовет вычислительные проблемы при переходе к многозвенным антропоморфным моделям с большим числом степеней свободы.

Заключение

В результате проведенного исследования разработаны двумерная и трехмерная модели двух звеньев экзоскелета переменной длины, приближенно моделирующая нижнюю конечность человека. Отличием данной работы от известных работ тем, что в случае плоской модели положение звена описывается одной функцией комплексного переменного, а в пространственном случае применяются кватернионы. Применение аппарата комплексных и гиперкомплексных чисел ускоряет составление систем дифференциальных уравнений,

описывающих движение моделей экзоскелетов, состоящих из двух звеньев переменной длины на плоскости и в пространстве. При решении обратной задачи динамики использована методика задания программного движения звена экзоскелета. Проведено решение задач Коши для составленных систем дифференциальных уравнений плоского и пространственного экзоскелета с разными способами аппроксимации управляющих моментов. Установлено, что синтезируется близкое к антропоморфному движение при использовании продуманных функций.

Разработанная плоская модель экзоскелета может быть использована при решении модельных научно-исследовательских и учебных задач проектирования многозвенных робототехнических систем, а трехмерная модель может быть применена при непосредственной разработке экзоскелетов, антропоморфных роботов, скафандров, тренажеров, роботов-манипуляторов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, № 25-21-00153 (<https://rscf.ru/project/25-21-00153/>).

1. Антохин Е.А., Письменная Е.В., Воронин Л.Л., Немков А.А. Основные требования к активным штурмовым экзоскелетам, предназначенным для включения в боевую экипировку военнослужащих // Робототехника и техническая кибернетика. 2021. № 9(1). С. 17–25. DOI: 10.31776/RTSJ.9102
2. Борисов А.В., Каспирович И.Е., Мухарьямов Р.Г. О математическом моделировании динамики многозвенных систем и экзоскелетов // Известия РАН. Теория и системы управления, 2021, № 5, с. 162–176.
3. Борисов А.В., Аршиненко И.А., Блинов А.О., Кончина Л.В., Новикова М.А., Борисова В.Л. Анализ запатентованных конструкций экзоскелетов и способ повышения их комфортабельности. Начало // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2024. № 6. С. 63 – 80. DOI: 10.14489/hb.2024.06.pp.063-080 Продолжение // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2024. № 7. С. 57 – 76. DOI: 10.14489/hb.2024.07.pp.057-076
4. Черноусько Ф.Л., Ананьевский И.М., Решмин С.А. Методы управления нелинейными механическими системами. – М.: Физматлит, 2006. 328 с.
5. Климина Л.А., Формальский А.М. Трехзвенный механизм как модель человека на качелях // Изв. РАН. ТиСУ. 2020. № 5. С. 89–105. DOI 10.31857/S000233882005008X
6. Попов И.П. Расчет механических колебаний в поле комплексных чисел // Труды МАИ. 2020. № 115. DOI: 10.34759/trd-2020-115-01
7. Журавлев В.Ф. Основы теоретической механики. М.: Издательство физико-математической литературы, 2001. 320 с.
8. Douglas B. Sweetser. Doing Physics with Quaternions. Doug Sweetser 2005.
9. Левский М.В. Аналитическое решение задачи оптимального управления переориентацией твердого тела (космического аппарата) с использованием кватернионов. // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2019. № 5. С. 3–26. DOI 10.1134/S0572329919050118.
10. Амелькин Н.И. Динамика твердого тела. Издательство МФТИ. – 2000 г. – 80 с.
11. Марчук Е.А. Математическая модель антиблокировочной системы торможения с включением кватерниона // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2020. – № 9(244). – С. 57–60. – DOI 10.35211/1990-5297-2020-9-244-57-60.

ОЦЕНКА РЕСУРСА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПО КРИТЕРИЮ ПРЕДЕЛЬНОГО МЕХАНИЧЕСКОГО ИЗНОСА

Навроцкий Р.А., Москвитин Г.В.

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; roman2.navrotskiy@gmail.com

В работе рассматриваются вопросы, связанные с прогнозированием ресурса зубчатых колес (ЗК) редукторов и других агрегатов современного машиностроения по критерию предельного механического износа. В отличие от аналогичных исследований других авторов в настоящей работе для определения полей контактных напряжений используются пакеты прикладных программ для ПК на базе МКЭ, что положительно сказывается на точности выполненных исследований.

Введение

ЗК широко применяются в современном машиностроении, например, в автомобильных коробках передач, дифференциалах, станках, робототехнических манипуляторах, насосах, подъемных механизмах и т.д. Мировой объем производства ЗК превышает миллиард единиц. Справедливо утверждать, что в дальнейшем эта цифра будет только увеличиваться.

ЗК являются техническими изделиями повышенной сложности, производство которых требует применения высокоэффективных технологических процессов. Преимущественно в ЗК используется эвольвентный профиль зацепления, что обеспечивает минимизацию динамических нагрузок в момент контакта зубьев. Диапазон геометрических размеров зубчатых колес чрезвычайно широк: от единиц миллиметров в точных приборах до нескольких метров в турбинах надводных и подводных судов. Для их изготовления применяются различные материалы, включая металлы, пластмассы, полимеры и т.д. Значительный потенциал развития связан с внедрением аддитивных методов, позволяющих осуществлять прямое производство ЗК на 3D-принтерах с различными технологиями производства.

Основными нагрузками, которым подвергаются ЗК в процессе эксплуатации, являются циклические крутящие моменты, действующие на них со стороны контактирующих колес, причем эти моменты могут менять, как свою величину, так и знак (разгон-торможение). Помимо крутящих моментов на ЗК колеса могут воздействовать боковые нагрузки (переключение передач), температурные факторы и т.д. Очевидно, что эти нагрузки, их история, а также механические характеристики материала, особенности конструкции и технологии являются основными факторами, влияющими на ресурс ЗК в эксплуатации.

Следует отметить огромный вклад советских и российских ученых в решение фундаментальных и прикладных задач, связанных с проектированием и производством ЗК высокого уровня, удовлетворяющих запросам современного машиностроения по технологичности, несущей способности, бесшумности и т.д. [1].

Следует, также, отметить достаточно большое

количество публикаций, посвященных результатам исследований ресурса ЗК различного назначения. В основном в них используется один критерий для оценки их ресурса. Например, в работе [2] путем моделирования усталостного разрушения было установлено, что зарождение и развитие усталостных трещин происходит преимущественно в межзубовых впадинах, а критерий предельного накопления усталостных механических повреждений в этой области является основным. В то же время в работе [3] показано, что ресурс ЗК электромеханических приводов определяется не только контактной выносливостью, но и предельной степенью механического износа контактирующих ЗК.

В настоящей работе сделана попытка развить подходы работы [3] к оценке ресурса ЗК в направлении использования критерия предельного механического износа, но в отличие от нее предложено использовать численные методы на базе программных комплексов, реализующих МКЭ, для оценки полей контактных напряжений, необходимых при расчете геометрии зубьев вследствие их механического износа.

Расчетная модель

Предполагается, что на момент начала численных исследований известны все необходимые исходные данные контактирующих зубьев: кинематические и геометрические параметры (передаточное число, модуль зацепления, диаметры делительных окружностей, ширина зубчатого венца, межосевое состояние и т.д.), механические характеристики (модуль упругости, коэффициент Пуассона, пределы упругости, временное сопротивление и т.д.).

Для решения поставленной задачи предлагается следующий алгоритм:

На начальном этапе проводятся численные исследования напряженного состояния ЗК. Создаются геометрические модели пар зубчатых колес и необходимые модели материалов, учитывающие необходимые механические характеристики. Также, генерируется конечно-элементная модель. Предлагается ввести особенность, которая заключается в уменьшении размера конечного элемента в зонах контакта. На следующем этапе к шестерне прикладывается крутящий момент, а также проводится

моделирование закрепления ЗК с использованием закреплений, препятствующих движению вдоль вала.

Необходимо отметить, что численное исследование предполагает получение результатов, которые согласуются с традиционными инженерными методами расчета [4].

В разделе численных исследований требуется определить и оценить значения контактных напряжений (рис. 1) для расчета изменения геометрии зуба, а именно значения износа.

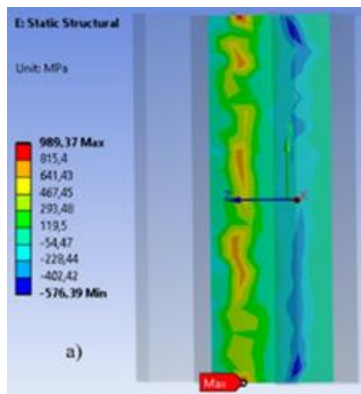


Рис. 1. Поле контактных напряжений на контактирующей поверхности зуба (пример)

В данном случае используется следующее выражение для расчетного значения износа:

$$\delta = SI, \quad (1)$$

где S – путь трения за один цикл; I – интенсивность изнашивания.

В общем виде выражение для определения интенсивности изнашивания имеет вид:

$$I = \exp(-\Delta) \left(\frac{\sigma_H}{HB} \right)^{\alpha_1} \left(\frac{p_c}{p_{кр}} \right)^{\alpha_2} \left(\frac{T_k}{T_{кр}} \right)^{\alpha_3}, \quad (2)$$

где σ_H – нормальное контактное напряжение; HB – твердость материала ЗК; p_c – давление окружающей среды; $p_{кр}$ – давление насыщенных паров при критической температуре; T_k – максимальная температура в контакте; $T_{кр}$ – критическая температура для рассматриваемого смазочного материала; Δ ; $\alpha_{1,2,3}$ – коэффициенты, при различных смазочных материалах. Интенсивность изнашивания I и коэффициент Δ рассчитываются отдельно для шестерни и колеса.

При износе зубьев изменяется геометрия зацепления, что оказывает существенное влияние на значения радиусов кривизны профилей зубьев. Радиусы кривизны изношенных профилей зубьев в характерной точке после изнашивания могут быть

рассчитаны по следующей зависимости для шестерни:

$$\rho_k = \rho_n + 330[\delta], \quad (3)$$

Для колеса:

$$\rho_k = \rho_n + 550[\delta], \quad (4)$$

В (3) и (4) ρ_k – конечный радиус кривизны; ρ_n – начальный радиус кривизны; $[\delta]$ – допустимая величина износа.

Допустимая величина износа $[\delta]$ задается на основе эксплуатационных требований. Так для зубчатых передач, применяемых в различных приводных механизмах, допустимое значение износа может составлять:

$$[\delta] = 0,05m \div 0,4m; \quad (5)$$

где m – модуль зацепления.

Выводы

Предложен и теоретически обоснован метод оценки ресурса ЗК по одному из важных критериев их несущей способности – критерию предельного механического износа. Наибольшая точность в определении показателя ресурса по этому критерию достигается при использовании для расчета полей контактных напряжений пакетов прикладных программ для ПК на базе МКЭ. В тоже время показано, что для некоторых практических приложений адекватные результаты демонстрируют простейшие инженерные зависимости, не требующие использования высокопроизводительной вычислительной техники.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы 3-13, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0020

1. Бабичев Д.Т., Волков А.Э. История развития теории зубчатых передач // Вестник научно-технического развития. №5 (93). 2015. – С. 25-42
2. Морозова Л.В., Орлов М.Р. Исследование причин разрушения зубчатых колес в процессе эксплуатации // Авиационные материалы и технологии. №S1. 2015. – С. 37-48.
3. Тимофеев Г.А., Красавин С.И., Сильченко П.Н., Новиков Е.С. Расчет долговечности зубчатых механизмов электромеханических приводов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. №9 (690). 2017. – С. 12-21.
4. Москвитин Г.В., Навроцкий Р.А. Сравнительный анализ характеристик НДС зубчатых колес в зонах контакта и впадинах зубьев, полученных с использованием МКЭ и некоторых инженерных зависимостей // Научные труды 7-ой Международной научно-технической конференции "Живучесть и конструкционное материаловедение" (ЖивКоМ-2024). 2024. – С. 245-250.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГА ПОЛЗУЧЕСТИ И ПРЕДЕЛА КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПРОЧНОСТИ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

Назаров В.В.¹

¹Научно-исследовательский институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;
inmec130@mail.ru

Считается, что процессы ползучести и длительной прочности ограничены снизу и сверху порогом ползучести и пределом кратковременной прочности. Одним из вариантов описания этих процессов служит дробно-степенная зависимость, которая содержит эти две механические характеристики. Вместо того чтобы определить значения этих механических характеристик из соответствующих экспериментов, в данной работе предложено их вычислить по экспериментальным данным напряжение – время в момент разрушения.

Цель

Определить значения порога ползучести и предела кратковременной прочности при разных значениях высокой температуры и по ним построить соответствующие зависимости от температуры.

Введение

Порог ползучести σ_t и предел кратковременной прочности σ_b ограничивают сверху и снизу процессы ползучести и длительной прочности и используются при решении некоторых задач [1] механики деформируемого тела. Значения этих механических характеристик представляется возможным определить из экспериментов $\dot{\epsilon}_0^e(\sigma_t) \rightarrow 0$ и $t_r^e(\sigma_b) \rightarrow 0$, где $\dot{\epsilon}_0^e$ – скорость деформаций при установившейся ползучести из эксперимента, t_r^e – время в момент разрушения из эксперимента.

При аппроксимации опытных данных $\sigma(t_r^e)$ (или $\sigma_0(t_r^e)$) иногда используют дробно-степенную зависимость [2]

$$\frac{t_r}{k} = \left(\frac{\sigma - \sigma_t}{\sigma_b - \sigma} \right)^{-n}, \quad \sigma_b \geq \sigma \geq \sigma_t, \quad (1)$$

где t_r – время в момент разрушения из аппроксимации, σ – постоянное напряжение во времени t , σ_0 – номинальное напряжение, которое $\sigma_0 = \sigma(t)|_{t=0}$, k и n – материалы параметры, которые определяются из минимизации суммарной погрешности

$$\delta = \sum_{i=1}^N \left| \lg \frac{t_r}{t_r^e} \right|, \quad (2)$$

где N – число опытов в серии. В обзорах [3–4] показано современное состояние науки в области экспериментального исследования свойства ползучести и длительной прочности, где результаты механических испытаний представлены для разных металлических материалов. Среди этих публикаций появились работы, в которых для одного и того же материала результаты механических испытаний получены при разных значениях высокой

температуры, о чем ниже пойдет речь.

Идея и материалы

Идея заключается в том, чтобы в (1) рассматривать σ_t и σ_b не как неизвестные величины, а как материалы параметры, которые представляется возможным определить по экспериментальным данным $\sigma(t_r^e)$ (или $\sigma_0(t_r^e)$) из минимизации (2). Зависимость (1) применима при условии изотермической ползучести. По изложенной методике можно вычислить значения σ_t и σ_b при каждом значении высокой температуры T , а затем по этим значениям построить зависимости $\sigma_t(T)$ и $\sigma_b(T)$.

В обработке использовались следующие экспериментальные данные: нержавеющая сталь 03X18H11 [5] в интервале температурных значений от 550 до 1100 °C, титановый сплав ВТ6 [6] в среде воздуха и в среде азота в интервале температурных значений от 500 до 700 °C, а также магниевый сплав МА50 и его производный магниевый сплав АС52, полученный из МА50 путем легирования до 1.72 масс.% С в интервале температурных значений от 150 до 225 °C.

Результаты

Для нержавеющей стали 03X18H11 зависимости $\sigma_t(T)$ и $\sigma_b(T)$ показаны на рисунке 1.

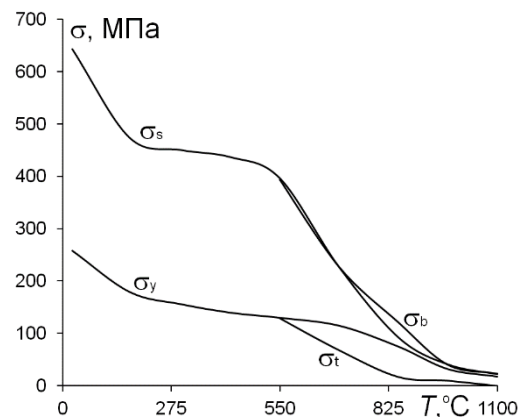


Рис. 1. Зависимости $\sigma_t(T)$ и $\sigma_b(T)$ – вычислены, при этом σ_y и σ_s – предел текучести и предел прочности из эксперимента

Видно, что $\sigma_y \geq \sigma_t$ и $\sigma_s \cong \sigma_b$, либо $\sigma_b > \sigma_s$, а должно быть $\sigma_s > \sigma_b$.

Заключение

Представленный метод не претендует на высокую точность, тем не менее, когда нет полной информации о значениях σ_t и σ_b из эксперимента, то почему бы при использовании (1) не рассматривать их в качестве материальных параметров.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

1. Локощенко А.М., Агахи К.А., Фомин Л.В. Ползучесть балок при изгибе в агрессивных средах // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 4. С. 70–75.
2. Шестериков С.А., Юмашева М.А. Конкретизация уравнения состояния ползучести // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1984. № 1. С. 86–92.
3. Назаров В.В. Обзор экспериментальных исследований ползучести и длительной прочности (2004–2021 гг.) // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. 2022. № 1. С. 38–51.
4. Назаров В.В. Результаты экспериментальных исследований ползучести и длительной прочности // Вестник Московского университета. Серия 1: Математика. Механика. 2025. № 1. С. 75–83.
5. Mohta, K., Gupta, S. K., Cathirvolu, S., Jaganathan, S., Chattopadhyay, J. High temperature deformation behavior of Indian PHWR Calandria material SS 304L // Nuclear Engineering and Design. 2020. Vol. 368. Article number 110801.
6. Reis, D. A. P., Silva, C. R. M., Nono, M. C. A., Barboza, M. J. R., Piorino, Neto F., Perez, E. A. C. Effect of environment on the creep behavior of the Ti-6Al-4V alloy // Materials Science and Engineering: A. 2005. Vol. 399. No 1–2. P. 276–280.
7. Terada, Y., Murata, Y., Sato, T., Morinaga, M. Analysis of creep rupture life of Mg-Al-Mn alloy produced by die-casting // Materials Chemistry and Physics. 2011. Vol. 128. No 1–2. P. 32–34.
8. Terada, Y., Itoh, D., Sato, T. Creep rupture properties of die-cast Mg-Al-Ca alloys // Materials Chemistry and Physics. 2009. Vol. 113. No 2–3. P. 503–506.

СРАВНЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ БЕЗ РАЗДЕЛЕНИЯ НА ТИП ПЛОСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

Назаров В.В.¹

¹Научно-исследовательский институт механики МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;
inmec130@mail.ru

Рассмотрены новые эквивалентные напряжения, усложненные материальными параметрами. Проведено сравнение минимизированных суммарных погрешностей, где использованы экспериментальные данные для нержавеющей стали 12X18H10T при 850°C, полученные при одноосном растяжении и двух разных плосконапряженных состояниях.

Цель

Сравнить минимизированные суммарные погрешности разных эквивалентных напряжений без учета типа сложного напряженного состояния. Среди них выделить эквивалентные напряжения с наименьшей суммарной погрешностью.

Введение

При описании длительной прочности при сложном напряженном состоянии используют зависимость $t_r = f(\sigma_e)$, где t_r – время момент разрушения, $\sigma_e = g(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ – эквивалентное напряжение, представляющее собой некоторую комбинацию из главных напряжений $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$. Сложное напряженное состояние различают по знакам главных напряжений:

1) $\sigma_1 \geq \sigma_2 > 0$ и $\sigma_3 = 0$ (реализация достигается либо на плоских образцах, подвергнутых двухосному растяжению, либо на трубчатых образцах, находящихся под воздействием внутреннего давления и осевой силы);

2) $\sigma_1 > 0$, $\sigma_2 = 0$ и $\sigma_3 < 0$ (реализация достигается на трубчатых образцах, подвергнутых воздействию крутящего момента и осевой силы).

В публикациях [1–2] при обработке экспериментальных данных выделены напряженные состояния 1) и 2). В данной работе рассмотрены новые виды σ_e , при этом вычисления проводились без разделения экспериментальных данных на типы 1) и 2).

Новые эквивалентные напряжения

В обзоре [3] перечислены все на тот момент известные σ_e , из них классическими считают: максимальное нормальное напряжение

$$\sigma_{e1} = \sigma_{\max} = \sigma_1, \quad (1)$$

приведенное напряжение Мизеса

$$\sigma_{e2} = \sigma_m / \sqrt{2} = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} / \sqrt{2}, \quad (2)$$

удвоенное максимальное касательное напряжение

$$\sigma_{e3} = 2\tau_{\max} = \sigma_1 - \sigma_3. \quad (3)$$

Вместе с этими в обзоре [3] приведены ссылки на

σ_e с одним материальным параметром: комбинация с одним материальным параметром (Лебедев А.А., 1965)

$$\sigma_{e4} = (1 - \chi)\sigma_{\max} + \chi\sigma_m, \quad (4)$$

другое σ_e так же содержит только один материальный параметр (Голубовский Е.Р., 1984)

$$\sigma_{e5} = \lambda\sigma_m + 3(\lambda - 1)\sigma_h, \quad (5)$$

где $\sigma_h = -(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ – гидростатическое давление. Среди новых видов σ_e следует выделить напряжение Кобаяши [4–5]

$$\sigma_{e6} = \sigma_1 \left[1 + \alpha \left(\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_1} \right)^\beta \right], \quad (6)$$

а также предложенное автором данной работы σ_e с возможностью описания длительной прочности при равном двухосном растяжении

$$\sigma_{e7} = \sqrt[n]{\sigma_1^n + \sigma_2^n + \sigma_3^n}. \quad (7)$$

Материал

В обзоре [6] приведены ссылки на результаты механических испытаний на длительную прочность при сложном напряженном состоянии, где в работе [7] получены данные для нержавеющей стали 12X18H10T при 850 °C и представлены все три серии механических испытаний: чистое растяжение, двухосное растяжение, когда тонкостенные трубки подвергались воздействию внутреннего давления и осевой силы, и растяжение вместе со сжатием, когда трубчатые образцы испытывали воздействие крутящего момента вместе с осевой силой. Данные [7] подверглись обработке без разделения на тип сложного напряженного состояния.

Уравнение для аппроксимации опытных данных и суммарная погрешность

При аппроксимации опытных данных $\sigma_0(t_r^e)$ использовалась дробно-степенная зависимость [8]

$$\frac{t_r}{k} = \left(\frac{\sigma_0 - \sigma_t}{\sigma_b - \sigma_0} \right)^{-n}, \quad \sigma_b \geq \sigma_0 \geq \sigma_t, \quad (8)$$

где t_r^e – время в момент разрушения из эксперимента, σ_0 – номинальное напряжение, k и n – материальные параметры, которые определяются из минимизации суммарной

погрешности

$$\delta = \sum_{i=1}^N \left| \lg \frac{t_r}{t_r^e} \right|, \quad (9)$$

где N – число опытов в серии. Следует заметить, что порог ползучести σ_t и предел кратковременной прочности σ_b рассматривались как материальные параметры, что позволило определить их значения из целевого условия $\delta \rightarrow \min$.

Результаты

Материальные параметры, а также значения σ_t и σ_b , вычислены по экспериментальным данным $\sigma_0(t_r^e)$ (рисунок 1).

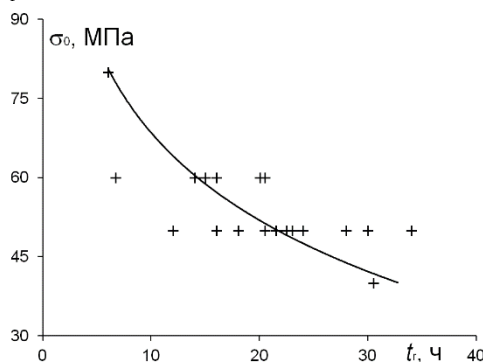


Рис. 1. Зависимости $\sigma_0(t_r)$:
значки – экспериментальные данные,
полученные только при одноосном растяжении; сплошная
кривая – дробно-степенная
аппроксимация

Зависимости (6) и (7) не применимы для анализа сложного напряженного состояния 2) (таблица 1).

Таблица 1. Минимизированные суммарные погрешности

σ_{e1}	σ_{e2}	σ_{e3}	σ_{e4}	σ_{e5}	σ_{e6}	σ_{e7}
9.85	10.56	10.60	9.72	10.08	5.83*	5.82*

*Без учета экспериментальных данных, полученных при продольном растяжении в сочетании с кручением

Из таблицы 1 следует, что самое простое эквивалентное напряжение σ_{e1} не хуже остальных позволяет описать длительную прочность при сложном напряженном состоянии.

Таблица 2. Минимизированные суммарные погрешности

σ_{e1}	σ_{e2}	σ_{e3}	σ_{e4}	σ_{e5}	σ_{e6}	σ_{e7}
5.84*	6.20*	5.58*	5.47*	6.00*	5.14*	5.30*

*Без учета экспериментальных данных, полученных при продольном растяжении в сочетании с кручением

Затем было установлено, что необходима корректировка материальных параметров с учетом

экспериментальных данных $\sigma_e(t_r^e)$, при этом сравнивались погрешности в условиях сложного напряженного состояния 2) (таблица 2).

Из таблицы 2 следует, что при описании длительной прочности при сложном напряженном состоянии 1) следует использовать эквивалентные напряжения (6) и (7) (нужно подчеркнуть, что это применимо к экспериментальным данным работы [7]).

Заключение

Проведенное исследование затронуло сразу несколько малоизученных видов эквивалентного напряжения, из которых два (5) и (7) с одним материальным параметром и одно (6) с двумя материальными параметрами. Анализ эквивалентных напряжений показал, что выражения (6) и (7) пригодны для описания длительных процессов только в условиях двухосного либо трехосного растяжений. Когда же одно из главных напряжений принимает отрицательные значения, то выражения (6) и (7) не представляется возможным использовать на практике.

Работа выполнена в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова.

1. Локощенко А.М., Назаров В.В. Выбор критериев длительной прочности металлов при сложном напряженном состоянии // Авиационно-космическая техника и технология. Харьков, ХАИ. 2004. № 7(15). С. 124–128.
2. Локощенко А.М. Оценка эквивалентных напряжений при анализе длительной прочности металлов в условиях сложного напряженного состояния // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2010. № 4. С. 164–181.
3. Локощенко А.М. Эквивалентные напряжения в расчетах длительной прочности металлов при сложном напряженном состоянии (обзор) // Известия Саратовского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2009. Т. 9. № 4. С. 128–135.
4. Kobayashi H., Ohki R., Itoh T., Sakane M. Multiaxial creep damage and lifetime evaluation under biaxial and triaxial stresses for type 304 stainless steel // Engineering Fracture Mechanics. 2017. Vol. 174. P. 30–43.
5. Sakane M., Kobayashi H., Ohki R., Itoh T. Creep void formation and rupture lifetime in multiaxial stress states // Key Engineering Materials. 2019. Vol. 795. P. 159–164.
6. Локощенко, А. М. Длительная прочность металлов при сложном напряженном состоянии (обзор) // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2012. № 3. С. 116–136.
7. Локощенко А.М., Мякотин Е.А., Шестериков С.А. Ползучесть и длительная прочность стали X18H10T в условиях сложного напряженного состояния // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1979. № 4. С. 87–94.
8. Шестериков С.А., Юмашева М.А. Конкретизация уравнения состояния ползучести // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1984. № 1. С. 86–92.

КОНТАКТНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ЗУБЬЕВ В ЗОНЕ НАЧАЛЬНОГО КАСАНИЯ

Нахатакян Ф.Г.¹, Нахатакян Д.Ф.¹

¹Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, г. Москва, Россия

Рассмотрена проблема контактной деформации зубьев зубчатых колёс в зоне их начального касания. На основе предложенной методики аналитически определено количественное значение деформации. Показано, что деформация в контактной области составляет около 42% от полной контактной деформации зубьев. Сравнение полученных результатов с известными теоретическими и экспериментальными данными подтвердило их удовлетворительное совпадение.

Для определения контактной деформации круговых цилиндров, в научной литературе используются различные теоретические и экспериментальные методы и подходы. Их условно можно разделить на две группы. Одни, по сути, определяют контактную деформацию цилиндра [1-6], т.е. изменение его диаметра. На рис.1.а показано, что это соответствует относительному смещению точек O_1 и O_2 при сжатии цилиндра абсолютно жесткими пластинами.

Легко показать, что при сжатии двух полуцилиндров абсолютно жесткими пластинами, рис.1.б, относительное смещение точек O_1 и O_2

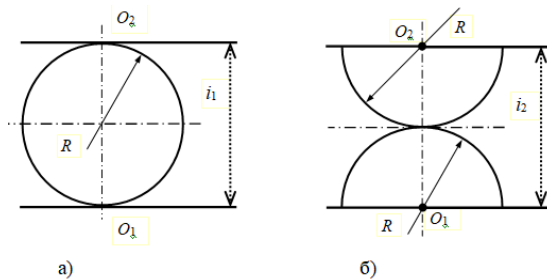


Рис.1 Сжатие абсолютно жесткими пластинами:
а) кругового цилиндра; б) двух полуцилиндров

будет равно контактной деформации цилиндра рис.1. а, т.е. показания индикаторов i_1 и i_2 будут одинаковыми.

Вторая группа определяет суммарную деформацию цилиндра и упругих плит, это сближение точек A и B , например, [7, 8], рис.2.

Однако, как показано в работе [9], в последнем случае суммарная деформация не зависит от диаметра R цилиндра, как это не парадоксально, она определяется

$$\alpha = w_{A/B} = 2 \frac{4(1-\nu^2)q}{\pi E} \ln \left[1,06 \sqrt{\frac{EC}{q}} \right],$$

где E , ν – модуль упругости и коэффициент Пуассона материалов соответственно; q – погонная нагрузка, C – толщина плиты.

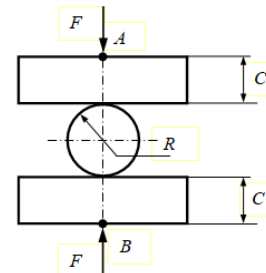


Рис.2. Сжатие ролика двумя плоскими пластинами

Существуют и приближенные методы, например [10], определения контактной деформации кругового цилиндра.

Здесь следует подчеркнуть, что для решения некоторых прикладных задач, связанных с силовыми контактами (зубчатые передачи, задачи трибологии, опоры качения, мостовые катки, и т.д.), требуется знать деформацию именно в зоне начального касания [11, 12], т.е. без учета сжатия остальной части цилиндра. Однако стоит отметить, что выделить границу строго, (т.е. определить, что является «контактной зоной», а что- остальной «частью цилиндра»), невозможно. Это показано в работе [13], где методом голографической интерферометрии было получено распределение перемещений вдоль диаметра ролика относительно его центра. Эпюра перемещений представляет плавную кривую, рис.3, при этом основная доля деформации приходится на область, прилегающую к поверхности.

Для определения деформации в зоне контакта, (чтобы выделить деформацию контактной области от сжатия остальной части цилиндра), поступим следующим образом. Пусть упругий цилиндр сжимается абсолютно жесткими пластинами, рис.4.а, и пусть ширина полоски контакта будет герцевская- $2b_H$, где

$$b_H = 2\sqrt{2qR_{np}\bar{\theta}},$$

где $\bar{\theta} = (\theta_1 + \theta_2)/2$, здесь $\theta = (1-\nu^2)/(\pi E)$, E , ν – модуль упругости и коэффициент Пуассона материалов соответственно; q – погонная нагрузка. На рис.4. б длина отрезка AB и есть указанная ширина. Тогда внедрение одного тела в другое - α_k , в силу

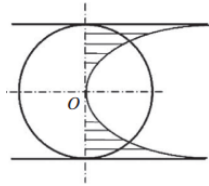


Рис.3 Эпюра перемещений точек цилиндра относительно центра по диаметру

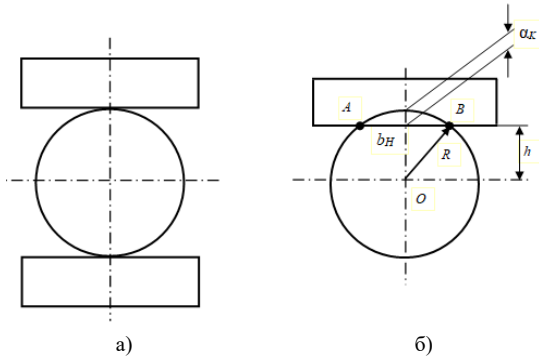


Рис.4. Сжатие абсолютно жесткими плитами кругового упругого цилиндра

того, что плита абсолютно жесткая, по сути, это и будет величиной упругой деформации цилиндра в контактной области. Следовательно, можно записать (рис.4. б)

$$\alpha_K = R - h, \quad (1)$$

где $h = \sqrt{R^2 - b_H^2}$. В силу того, что $b_H \ll R$, из

последней зависимости получим, $h = R \left(1 - \frac{1}{2} \frac{b_H^2}{R^2} \right)$.

Тогда из формулы (1) с учетом последней зависимости получаем

$$\alpha_K = \frac{b_H^2}{2R}. \quad (2)$$

С другой стороны, полуширина площадки контакта по Герцу с учетом приведенных зависимостей будет определяться

$$b_H = 1,52 \sqrt{qR/E},$$

тогда из формулы (2) с учетом последней зависимости для деформации в контактной области на одном контакте получим формулу

$$\alpha_K = 1,16q/E,$$

следовательно, сближение за счет деформации на двух концах будет определяться формулой $\alpha_K = 2,32q/E$, из которой следует, в частности, что деформация в зоне контакта не зависит от радиуса кривизны в точке их касания. Из последней зависимости для упругих тел из стали ($E = 2,15 \cdot 10^5$ МПа), получаем

$$\alpha_K = 1,08 \cdot 10^{-5} \cdot q.$$

Отметим, что в научной литературе имеются исследования по определению этого параметра α_K , [11, 14]. В работе [11] предложен метод и на его основе определен α_K , и получен результат

$\alpha_K = 1,16 \cdot 10^{-5} \cdot q$, а в работе [14] для стальных зубьев зубчатых колес экспериментально был получен результат $\alpha_K = 1,0 \cdot 10^{-5} \cdot q$. Как видно, предложенный в настоящей работе метод вполне согласуется с имеющимися в литературе результатами научных исследований.

Что касается полного сближения в результате контактной деформации зубьев зубчатых колес, то оно аналитически определено в работе [15], где получена формула

$$\alpha = \frac{4(1-\nu^2)}{\pi E} q \ln \left[2,124 \sqrt{\frac{EC_1C_2(R_1+R_2)}{qR_1R_2}} \right], \quad (3)$$

здесь $C_{1,2}$; $R_{1,2}$ - толщина и радиус кривизны первого и второго зубьев в рассматриваемой точке соответственно.

Формулу (3) можно переписать

$$\alpha = \frac{4(1-\nu^2)}{\pi E} q \ln \left[2,124 \sqrt{\frac{EC_1C_2}{qR_{пр}}} \right], \quad (4)$$

где $R_{пр}$ - приведенный радиус кривизны зубьев в рассматриваемой точке.

С учетом сказанного, из формулы (4) получаем

$$\alpha = \frac{4(1-\nu^2)}{\pi E} q \ln \left[5,136 \sqrt{\frac{EC_1C_2}{qd_1} \left(1 + \frac{1}{u} \right)} \right].$$

Определим контактную деформацию зубьев зубчатых колес в полюсе зацепления для зубчатой передачи из примера расчёта ГОСТ [16], и оценим долю деформации в контактной области зубьев. Для него по полученным выше формулам контактная деформация определяется $\alpha = 5,55q/E$, или, для стали, $\alpha = 2,58 \cdot 10^{-5} q$.

Таким образом, для стальных зубьев деформация в зоне контакта составляет $\approx 42\%$ от общей контактной деформации. Этот результат хорошо согласуется с данными других исследователей — например, в работе [11] значение составляет около 44 %.

Заключение

- получена аналитическая зависимость для определения деформации зубьев зубчатых колес в зоне начального касания α_K ;
- показано, что величина α_K не зависит от радиуса кривизны зубьев в зоне контакта;
- установлено, деформация в контактной области составляет около 42% от полной контактной деформации зубьев зубчатых колес.

1. Ковальский Б.С. Напряженное состояние и критерий прочности при контактном сжатии. Научные Записки Харьковского авиационного института. Харьков, 1941. т.5.
2. Hertz Н. Über die Berührung fester elastischen Körper, Gesammelte Werke, Bd.1. Leipzig, 1895. с. 155–174.
3. M.R. Hoerich, Н. Zantopulos. (Хорпих, Цантопулос). Контактные деформации вдоль прямой линии: цилиндр между двумя плоскими плитами. // Тр. Американского общества инженеров-механиков. Проблемы трения и

- смазки. М.: Мир, 1974. № 3. С. 193- 198.
4. Foppl A., Lectures on Technical Mechanics, Fifth Volume, B.G.Teubner, Leipzig, 1907.
 5. K.L. Johnson. (Джонсон К) Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.
 6. Динник А.Н. Избранные труды. Киев: АН УССР, 1952. т.1. 151 с.
 7. Айрапетов Э.Л. Состояние и перспективы развития методов расчета нагруженности и прочности передач зацеплением. Ижевск- Москва: ИГТУ, 2000, 116 С.
 8. Орлов А.В. Упругие деформации и напряжения на линейном контакте. // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2006., № 6, с. 31–36.
 9. Nakhatakyan F.G. Contact deformation of finite bodies initially in linear contact // Russian Engineering Research. 2014. Т. 34. № 5. p.277-280.
 10. Нахатакян Ф.Г., Косарев О.И. Сближение упругих тел в контактной задаче герца // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2010. № 1. С. 102-106.
 11. Матлин М.М., Мозгунова А.И., Стариков А.А., Куликова М.А. К вопросу расчетного определения упругого сближения при первоначально линейном контакте деталей машин // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 1. С. 44–46.
 12. М.М. Матлин, А.И. Мозгунова, А.И. Сотникова, В.А. Костюков. Жесткость первоначально синейного контакта деталей машин // Известия ВолгГТУ. 2015. №12. С.80-83.
 13. Э.Л. Айрапетов, Ф.Г. Нахатакян, Г.Г. Тertyшный Голографический метод контроля полного вектора тангенциального перемещения для определения деформации деталей машин в заданном направлении. // Тез. докл. Республ. Научно- практ. семинара “Голография в промышленности и научных исследованиях” Гродно, 1989, с. 9-10.
 14. Кистьян Я.Г., Френкель И.Н. Экспериментальное определение жесткости зубьев прямозубых цилиндрических колес внешнего зацепления. М.: ЦНИИТМАШ- Машгиз, 1956. С.172-182.
 15. Нахатакян Ф.Г. Напряженно-деформированное состояние упругих элементов зубчатых механизмов и сооружений при их линейном и кромочном контакте. // Диссертация ... доктора технических наук. ИМАШ РАН, Москва, 2014.
 16. ГОСТ 21354-87. Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность. М.: Из-во стандартов. 1988. 127 с.

ВЛИЯНИЕ РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА В РОЛИКОВОМ ПОДШИПНИКЕ НА МАКСИМАЛЬНУЮ НАГРУЗКУ НА РОЛИК

Нахатакян Ф.Г.¹, Нахатакян Д.Ф.¹, Зенкина Я.П.², Зуськова В.Н.³

¹ Институт машиноведения им.А.А.Благонравова РАН, г. Москва, Россия

² МГТУ им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), г. Москва

³ МАИ (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

В работе исследуется влияние радиального зазора в роликовом подшипнике на его эксплуатационные параметры. На основе системы уравнений деформаций и равновесия аналитически определена зависимость максимальной нагрузки на отдельный ролик от величины зазора. Установлено, что при увеличении зазора, например, до 50 мкм нагрузка на наиболее нагруженный ролик возрастает примерно в два раза. Полученные результаты позволяют уточнить существующие расчётные зависимости и повысить точность прогнозирования долговечности подшипников качения.

Величина радиального зазора в подшипниках качения, как показали результаты исследований и опыт эксплуатации, оказывает большое влияние на их износ и работоспособность [1-13]. От его величины сильно зависят параметры подшипника, в том числе и максимальная нагрузка на ролик [2, 8, 9, 11-13]. Поэтому, при расчете нагруженности и прочности опор качения необходимы сведения о характере зависимости параметров нагруженности от радиального зазора [11-13].

В соответствии с существующими рекомендациями, например [14], в роликовом подшипнике, работающем под радиальной нагрузкой, максимальная сила на ролик определяется как

$$P_0 = K \frac{F_r}{Z}, \quad (1)$$

где K – коэффициент; F_r – радиальная сила в подшипнике; Z – количество роликов в нем. При $Z = 10 \div 20$, коэффициент $K=4,0$ если зазор в подшипнике равен нулю, и $K=4,6$ при зазоре больше нуля [14]. Однако очевидно, что чем больше зазор, тем больше неравномерность распределения нагрузки между телами качения.

Так как сила на ролик примет наибольшее значение, когда внешняя сила проходит по центру максимально нагруженного ролика, то будем рассмотреть именно такую схему нагружения подшипника, рис.1.

Точное решение задачи при наличии радиального зазора сводится к решению системы двух уравнений: совместности деформаций, зазоров и перемещений

$$W_i = \alpha_i - S_i, \quad i=0, 1, 2, \dots, N; \quad (2)$$

где W_i , α_i , S_i – упругая деформация, перемещение и зазор на i -ом элементе; параметр N определяется $N = (N_0 - 1) / 2$; здесь N_0 – количество воспринимающих нагрузку тел качения, и уравнения равновесия (рис.2)

$$P_0 + 2 \sum_{i=0}^N P_i \cos \gamma_i = F_r,$$

где P_i , F_r – нагрузка на i -ом элементе и внешняя сила на подшипник соответственно; γ_i – угол i -го ролика в подшипнике относительно вертикали.

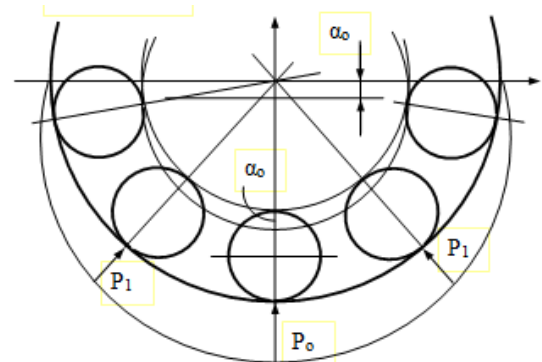


Рис.1. Схема нагружения роликового подшипника при отсутствии радиального зазора

Упругая деформация i -го элемента в роликовом подшипнике в формуле (2) согласно работе [15] определяется

$$W_i = \delta P_i, \quad i=0, 1, 2, \dots, N,$$

где δ – податливость «подшипника» с одним роликом (рис.3), которая исследована в работах [15-18]. Согласно работе [15] она определяется

$$\delta = 40 \ln(3,393 E c_n / q),$$

где $\theta = \frac{1-v^2}{\pi E}$ – упругая постоянная материалов; E ,

v – модуль упругости и коэффициент Пуассона материалов; q – погонная нагрузка;

$c_n = \sqrt{c_1 c_2}$ – приведенная толщина колец подшипника, (упругое взаимодействие тел конечных размеров на линейном контакте подробно рассмотрено в работах [16-19].

Задача решена как в отсутствии зазора, так и при его наличии. Опуская подробности математических выкладок, приводим зависимость для максимальной силы на ролик

$$P_0 = \frac{F_r}{k},$$

где

$$\bar{k} = 1 + 2 \sum_{i=1}^N \cos^2 i \gamma. \quad (3)$$

Следует отметить, что конечная сумма в формуле (3) существует и определяется

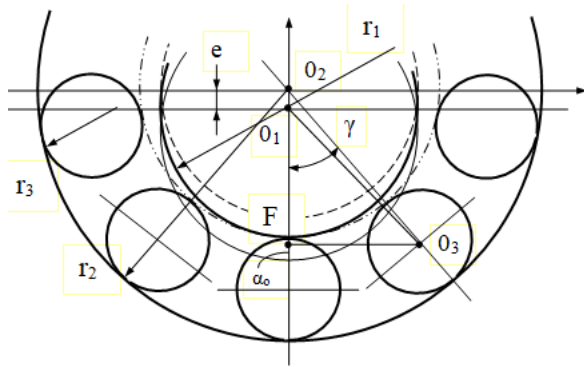


Рис.2. Схема нагружения роликового подшипника при наличии радиального зазора

$$\sum_{i=1}^N \cos^2 i\gamma = \frac{N}{2} + \frac{1}{2} \frac{\sin(2\pi N/Z)}{\sin(2\pi/Z)} \cos(2\pi(N+1)/Z).$$

Таким образом для коэффициента в (3) получаем выражение

$$\bar{k} = 1 + N + \bar{N}_1, \quad (4)$$

$$\text{где } \bar{N}_1 = \frac{\sin(2\pi N/Z)}{\sin(2\pi/Z)} \times \cos(2\pi(N+1)/Z).$$

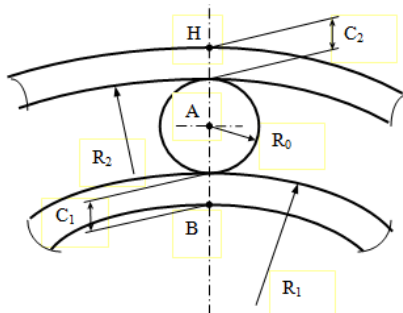


Рис.3. Расчетная модель роликового «подшипника» с одним роликом

Легко показать, что при отсутствии зазора в подшипнике зависимость (4) упрощается $\bar{N}_1 \approx -1/2$ и $\bar{k} \approx Z/4$. Следовательно, в этом случае максимальная нагрузка на ролик в подшипнике будет

$$P_0 = \frac{F_r}{1 + N + \bar{N}_1} = 4 \frac{F_r}{Z},$$

что согласуется с существующими в литературе рекомендациями.

Опуская подробности математических выкладок, приводим зависимость максимальной P_0 силы на нагруженный ролик при наличии радиального зазора

$$P_0 = F_r \frac{1 + \frac{e}{F_r \delta} (\bar{N}_2 - 2 - N - \bar{N}_1)}{1 + N + \bar{N}_1}, \quad (5)$$

$$\text{где } \bar{N}_2 = 2 \frac{\sin(\pi(N+1)/Z)}{\sin(\pi/Z)} \cos(\pi N/Z).$$

Анализ последней формулы (5) показал, что при радиальном зазоре, например, 50 мкм сила растет

примерно в два раза, что свидетельствует о важности учета радиального зазора при расчетах нагруженности подшипника.

Следует отметить, что в работе получена также аналитическая формула для величины коэффициент K в (1) в следующем виде

$$K = Z \frac{1 + \frac{e}{F_r \delta} (\bar{N}_2 - 2 - N - \bar{N}_1)}{1 + N + \bar{N}_1}.$$

При анализе последней формулы выяснилось, что при отсутствии зазора коэффициент K действительно равняется 4,0 (рис.4), т.е. существующие рекомендации при отсутствии зазора вытекают из полученной формулы как частный случай. Однако с

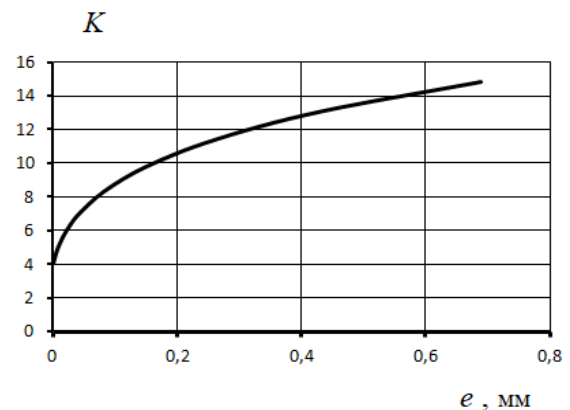


Рис. 4. Зависимость коэффициент K от радиального зазора

увеличением радиального зазора этот параметр растет, и при зазоре 20 мкм погрешность существующих рекомендаций составляет примерно 30%, а при 90 мкм – 85 %.

Таким образом в работе показано, что:

- радиальный зазор оказывает существенное влияние на параметры в роликовом подшипнике. Например, при увеличении зазора до 50 мкм максимальная нагрузка на ролик возрастает примерно в два раза

- полученные аналитические зависимости уточняют существующие формулы и рекомендации по расчету радиальных подшипников и могут быть использованы при проектировании и анализе их долговечности.

1. Пинегин С.В., Фролов К.В. Вибрации и шум подшипников качения. // Машиноведение. – 1966, - №2. – С. 36-45
2. Орлов А.В. Влияние износа на работоспособность подшипников опор качения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. №5. С. 71-79.
3. Elmidany, T., et al.: Optimal Interference in Radial Cylindrical Roller Bearings. J. Engineering Applied Science—Cairo, vol. 54, no. 2, 2007, pp. 189–204.
4. Harris, T.A.; and Kotzalas, M.N.: Rolling Bearing Analysis. Vol. 1, CRC Press, Boca Raton, FL, 2007.
5. ANSI/ABMA-9:1990 (R2000): Load Ratings and Fatigue Life for Ball Bearings. American Bearing Manufacturers Association, Washington, DC, 2000.
6. Sadeghi, F., et al.: A Review of Rolling Contact Fatigue. J.

- Tribol., vol. 131, no. 4, 2009.
7. Houpert, L.: An Engineering Approach to Hertzian Contact Elasticity—Part I. J. Tribol., vol. 123, 2001, pp. 582–588.
 8. Poplawski, J.V., et al.: Advanced Analysis Package for High Speed Multibearing Shaft Systems: COBRA–AHS. Finalreport, NASACONTRACTNAS3–00018, 2002.
 9. Нахатакян Ф.Г. Влияние зазора в роликовых подшипниках на силовой контакт между его элементами // Труды МАИ. 2020, № 115, 12/25/2020.
 10. Timken Aerospace Design Guide for Precision Metric Ball and Cylindrical Roller Bearings. http://www.timken.com/en-us/products/bearings/productlist/aerospace/Documents/aerospace_product_design_guide.pdf Accessed August 31, 2011.
 11. Oswald, F.B.; Zaretsky, E.V.; and Poplawski, J.V.: Interference Fit Life Factors for Ball Bearings. Tribol.Trans., vol. 54, no. 1, 2011, pp. 1–20.
 12. Нахатакян Ф.Г. Контактное взаимодействие в роликовых опорах качения с учетом геометрии сопряжения // Вестник машиностроения. 2016. № 10. С. 21-24.
 13. Нахатакян Ф.Г. Нагруженность роликовых подшипников при наличии зазоров // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2017. № 4. С. 87-91.
 14. Решетов Д.Н. Детали машин. М.: Машиностроение, 1989. 496 с.
 15. Нахатакян Ф.Г. Расчетное определение упругой податливости роликовых подшипников на основе теории Герца. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 1. с.28- 32.
 16. Nakhatakyan F.G. Contact deformation of finite bodies initially in linear contact // Russian Engineering Research. 2014. Т. 34. № 5. p.277-280.
 17. Нахатакян Ф.Г. Решение плоской контактной задачи теории упругости с помощью модели упругого полупространства // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2011, № 5, с. 63-67.
 18. M.R. Hoeprich, H. Zantopulos (Хопрех, Цантопулос) Контактные деформации вдоль прямой линии: цилиндр между двумя плоскими плитами. // Тр. Американского общества инженеров-механиков. Проблемы трения и смазки. М.: Мир, 1974. № 3. С. 193–198.
 19. K.L.Johnson. (Джонсон К) Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.

ПОВЫШЕНИЕ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ РОЛИКОВОГО ПОДШИПНИКА БОМБИНИРОВАНИЕМ ЕГО РОЛИКОВ

Нахатакян Ф.Г.¹, Пузакина А.К.¹, Нахатакян Д.Ф.¹, Зенкина Я.П.²

¹ Институт машиноведения им.А.А.Благонравова РАН, г. Москва, Россия

² МГТУ им. Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), г. Москва

В работе исследуется проблема повышения нагрузочной способности роликовых подшипников посредством бомбинирования их роликов. Проанализированы два варианта модификации поверхности ролика. Поставленная задача решена аналитически; получены зависимости, позволяющие определить радиус бомбинирования («бочки») и контактные напряжения в модифицированных роликах.

Исследованию работы роликовых подшипников посвящено множество трудов отечественных и зарубежных исследователей [1-12]. На основании экспериментальных данных установлено, что долговечность роликовых опор по критерию усталостного выкрашивания обратно пропорциональна максимальным контактным напряжениям в степени $m \approx 6,66$ [13]. Известно [13-14], что на концах роликов, в результате краевого эффекта, наблюдается значительное увеличение контактных напряжений (рис. 1).

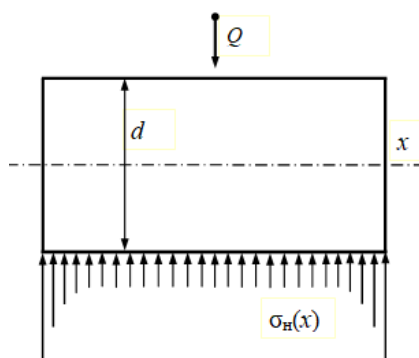


Рис. 1. Концентрация контактных напряжений из-за краевого эффекта

Для уменьшения влияния этого явления края роликов часто выполняются с фасками или закруглениями. Однако такие меры не обеспечивают полного устранения концентрации напряжений. Более эффективным подходом является применение бомбинирования — формирование бочкообразного профиля ролика [13-14]. Для определения радиуса «бочки» (бомбинирования), в литературе существуют различные подходы, использование которых позволяет решить проблему численными методами [14].

В настоящей работе для исследования вопроса бомбинирования роликов и для аналитического определения радиуса «бочки» и оценки увеличения нагрузочной способности роликов, будем использовать ранее предложенный автором метод [15-16] для определения параметров контакта при взаимодействии двух круговых цилиндров в условиях угла перекоса γ , расчетная модель которого показана на рис. 2.

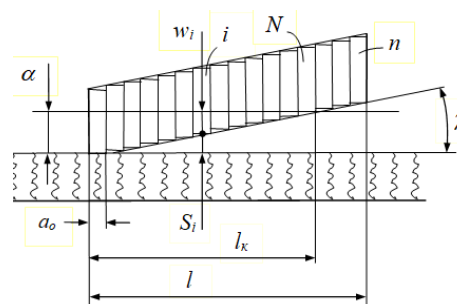


Рис. 2. Расчетная модель контактного взаимодействия для решения задачи о контакте двух цилиндров в условиях перекоса

Рассмотрим ролик подшипника и покажем суть предложенного метода. Пусть он взаимодействует с внутренним кольцом подшипника под действием радиальной силы Q , а l, d — длина и диаметр ролика соответственно (рис. 3).

Цилиндрическую поверхность ролика заменим криволинейной поверхностью, в виде «бочки», дугой окружности радиуса R , как показано на рис. 3. Далее криволинейную поверхность заменяем набором цилиндрических дисков толщиной a_o , (рис. 3). Таким образом получаем ролик со ступенчатой поверхностью (однако очевидно, что при достаточно большом n , при стремлении a_o к нулю, данная поверхность сглаживается), что позволяет каждому диску при нагружении вступить в контакт с кольцом подшипника как два цилиндра с параллельными осями.

Пусть под действием внешней силы Q в результате деформации элементов сопряжений происходит сближение кольца подшипника с роликом на величину α (на одном контакте). И пусть, для исключения концентрации напряжений от краевого эффекта, n -й диск входит в контакт, но нагрузку не передает, т.е. пятно контакта не выходит за торец ролика (рис. 3).

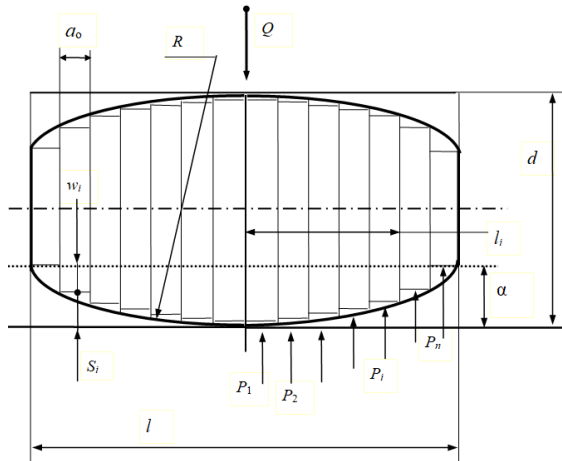


Рис. 3. Расчетная модель бомбинированного ролика подшипника

При такой постановке задачи проблема сводится к системе уравнений: совместности деформаций W_i , перемещений α_i и зазоров S_i для i -го диска, с одной стороны,

$$W_i = \alpha - S_i, \quad i=0, 1, 2, \dots, n,$$

и равновесия ролика, с другой

$$2(P_1 + P_2 + \dots + P_n) = Q,$$

где упругая деформация i -го диска определяется [17]

$$W_i = P_i \delta_d, \quad i=1, 2, \dots, n,$$

здесь P_i – сила на i -ом диске; δ_d – податливость элементарного диска при сжатии [17].

Для i -го диска зазор в (1) между роликом и кольцом можно записать $S_i = R - \sqrt{R^2 - l_i^2}$, здесь $i = 1, 2, \dots, n$, отсюда несложно получить приближенную зависимость зазора в следующем виде $S_i = l_i^2 / (2R)$.

Следует отметить, что, согласно сделанным допущениям о невыходе пятна контакта за торец ролика, (для исключения концентрации контактных напряжений из-за краевого эффекта), сближение будет определяться зависимостью

$$\alpha = S_n = \frac{1}{2} \frac{l_n^2}{R}, \quad \text{где } l_n = n a_0 = \frac{l}{2}.$$

Опуская промежуточные математические выкладки, приведем выражение для радиуса «бочки» в виде

$$R = \frac{l^2}{8} \left(1 - \frac{\bar{n}}{n^3} \right) / \frac{K_a Q}{IE}, \quad (1)$$

где принято обозначение $\bar{n} = 1^2 + 2^2 + \dots + n^2$. Легко показать, что при $n \rightarrow \infty$ предел отношения

$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\bar{n}}{n^3} = \frac{1}{3}$. Тогда из (1) для радиуса «бочки» окончательно получаем формулу

$$R = \frac{l^3 E}{12 K_a Q}.$$

Для оценки повышения нагрузочной способности подшипника, необходимо определить

контактные напряжения обычного ролика и бомбинированного. По формуле Герца контактные напряжения определяются $\sigma_H = 0,418 \sqrt{\frac{QE}{l \rho_{np}}}$ – для

обычного ролика, где ρ_{np} – приведенный радиус кривизны, а для бомбинированного ролика можно

записать $\sigma_H^{бom} = 0,418 \sqrt{\frac{P_1 E}{a_0 \rho_{np}}}$, где P_1 определяется

из соотношения $\alpha = K_a P_1 / (a_0 E)$. Тогда последняя зависимость по определению напряжений

преобразуется к виду $\sigma_H^{бom} = 0,418 \sqrt{\frac{3QE}{2l \rho_{np}}}$.

Из последних формул следует, что у бомбинированных роликов контактное напряжение больше, чем у обычных, рассчитанных по формуле Герца, на 22%, (без учета концентрации напряжений), однако с учётом того, что на торцах обычного ролика из-за краевого эффекта напряжения выше герцовских в 2,0–3,0 раза [14], то становится очевидным, что применение бомбинирования приводит к заметному росту грузоподъемности подшипника.

С помощью изложенной методики, аналогичным образом можно определить параметры ролика, разделенного на три участка, как показано на рис.4, т.е. где срединная часть ролика остается неизменной.

Опуская подробности математических выкладок, приведем окончательные формулы для

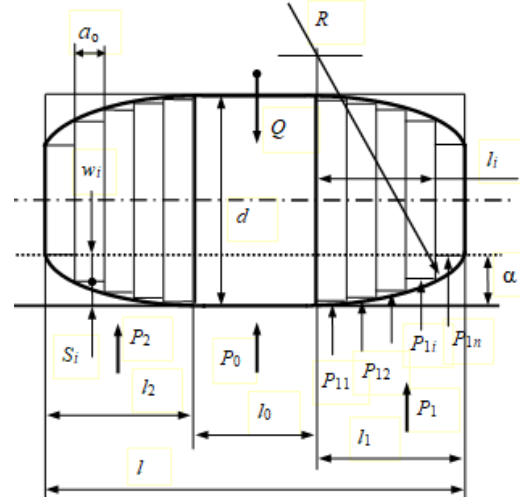


Рис. 4. Расчетная модель бомбинированного ролика, разделенного на три участка

параметров контакта этого варианта модификации поверхности ролика с цилиндрической срединной частью: радиус «бочки»

$$R = \frac{El^3}{12 K_a Q} f(\bar{l}),$$

где $f(\bar{l}) = \left(1 - \frac{l_0}{l}\right)^3 + \frac{3l_0}{2l} \left(1 - \frac{l_0}{l}\right)^2$, l , l_0 – длина

ролика и цилиндрической его части соответственно; сближение α можно определить по формуле

$$\alpha = \frac{K_{\alpha} P_0}{l_0 E},$$

где P_0 – нагрузка, приходящая на цилиндрическую часть ролика, для нее получена формула

$$P_0 = Q - \frac{2 l_0^3 E}{3 K_{\alpha} R};$$
 а контактные напряжения будут

определяться

$$\sigma_H^{\text{бомб}} = 0,418 \sqrt{\frac{P_0 E}{l_0 \rho_{\text{пр}}}}.$$

Анализ полученных результатов показал, что и в этом случае имеет место повышение грузоподъемности- у цилиндрических роликов напряжения на 63 % больше, чем у бомбинированных, что свидетельствует о значительном росте нагрузочной способности подшипника.

Следует отметить, что в литературе имеются исследования бомбинированных роликов, например [14], где численными методами определены радиус «бочки» и контактные напряжения модифицированных роликов, выводы которых находятся в согласовании с предложенными в настоящей работе результатами.

1. Иванников В. В., Дегтярев С. А., Попов В. В. И др. Учет податливости колец при определении контактных усилий в радиальном роликовом подшипнике качения // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2018. № 4. С. 58-68 <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36760596>
2. Клебанов Я. М., Петров В. Р., Адеянов И. Е. Численное исследование влияния профиля ролика и перекоса колец на нормальное давление в области контакта ролика с дорожками качения цилиндрического роликового подшипника // Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. № 10 (94). С.2 <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41335461>
3. Клебанов Я. М., Петров В. Р., Адеянов И. Е. Решение задачи контактного взаимодействия кольца роликового подшипника и ролика на основе уравнения Буссинеска // Фундаментальные основы механики. 2019. №4. С. 93-100. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41300422>
4. Мелентьев В. А. Малоотходная технология изготовления колец роликовых подшипников на основе применения комбинированного дорнования // диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Саратовский государственный технический университет. Саратов, 2009
5. Сорокин Ф. Д., Хао Ч. Расчет матрицы жесткости роликового подшипника на основе энергетического подхода // В сборнике: Механика и математическое моделирование в технике. II Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная юбилеям основателей кафедры "Прикладная механика" МГТУ им. Н. Э. Баумана профессоров С. Д. Пономарева, В. Л. Бидермана, К. К. Лихарева, Н. Н. Малинина, В. А. Светлицкого. Сборник трудов. 2017. С. 228-232.
6. Орлов А. В. Влияние износа на работоспособность подшипников опор качения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 5. С. 71-79.
7. Sadeghi, F., et al.: A Review of Rolling Contact Fatigue. J. Tribol., vol. 131, no. 4, 2009.
8. Poplawski, J. V., et al.: Advanced Analysis Package for High Speed Multibearing Shaft Systems: COBRA-AHS. Final report, NASA Contract NAS3-00018, 2002.
9. Oswald, F. B.; Zaretsky, E. V.; and Poplawski, J. V.: Interference Fit Life Factors for Ball Bearings. Tribol. Trans., vol. 54, no. 1, 2011, pp. 1–20.
10. Орлов А. В. Определение нагруженности рабочих поверхностей опор качения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 5. С. 73-79. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11157734>
11. Elmidany, T., et al.: Optimal Interference in Radial Cylindrical Roller Bearings. J. Engineering Applied Science—Cairo, vol. 54, no. 2, 2007, pp. 189-204.
12. Harris, T. A.; and Kotzalas, M. N.: Rolling Bearing Analysis. Vol. 1, CRC Press, Boca Raton, FL, 2007.
13. Орлов А. В. Упругие деформации и напряжения на линейном контакте. // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2006., № 6, с. 31-36. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=9311398>
14. Попова Д. Д., Самойленко Н. А., Семенов С. В. и др. Анализ эффективности применения комбинированных роликов для снижения контактных напряжений в роликоподшипники // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2020. № 60. С. 96-104 <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=42809230>
15. Нахатакян Ф. Г. Контактные напряжения и деформации цилиндров при перекосе // Вестник машиностроения. 2011. № 10. С. 45-48.
16. Нахатакян Ф. Г. Контактное взаимодействие цилиндров при наличии перекоса // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2012. № 4. С. 91-94.
17. Nakhatakyan F.G. Contact deformation of finite bodies initially in linear contact // Russian Engineering Research. 2014. T. 34. № 5. p.277-280.

СНИЖЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ РОЛИКОВОГО ПОДШИПНИКА ИЗ-ЗА РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА В НЕМ

Нахатакян Ф.Г.¹, Пузакина А.К.¹, Нахатакян Д.Ф.¹, Зуськова В.Н.²

¹ Институт машиноведения им.А.А.Благонравова РАН, г. Москва, Россия

² МАИ (национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия

В работе изложено аналитические исследования влияния радиального зазора в роликовом подшипнике на его жесткость при двух схемах нагружения - когда линия действия внешней силы проходит по центру максимально нагруженного ролика и когда она проходит между двумя максимально нагруженными роликами. Установлено, что при отсутствии радиального зазора жесткость подшипника практически постоянна для обеих схем нагружения. Однако при увеличении радиального зазора жесткость подшипника во второй схеме снижается быстрее, что может привести к возникновению динамических колебаний в роторных системах.

В работе исследуется влияние радиального зазора на жесткость подшипника. Очевидно, что для определения контактной податливости (или жесткости) роликовых подшипников, необходимо учитывать суммарную деформацию всех тел, находящихся в силовом контакте - ролик с внутренним и наружным кольцами.

Предложенный в [1, 2] метод позволил определить совместную деформацию двух упругих тел конечных размеров, находящихся в контакте до деформации по линии. В частности, на его основе для линейного контакта ролика с выпуклым цилиндрическим телом (рис.1) в работе [3] получена формула для сближения центра ролика (точка A) относительно

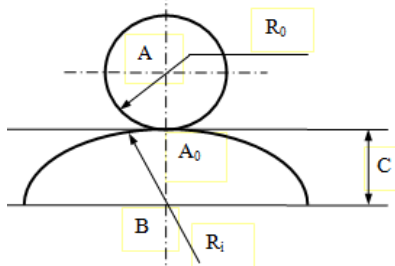


Рис.1. Силовой контакт по линии между роликом и цилиндрическим сегментом

основания сегмента (точка B) в виде

$$w_{A/B} = 4\theta q \ln \left[1,842 \sqrt{\frac{EC(R_i + R_0)}{qR_i}} \right],$$

где $\theta = \frac{1-\nu^2}{\pi E}$ - упругая постоянная материалов;

q - погонная нагрузка.

В работе [3] для роликового подшипника (для одного тела качения) (сближение точек B и H, рис.2) получено аналитическое выражение для контактной деформации в виде

$$w_{B/H} = 2 \cdot 4\theta q \ln \left[1,842 \sqrt{\frac{EC}{q}} \right].$$

Полученные соотношения позволили решить задачу о зависимости жесткости подшипника от радиального зазора.

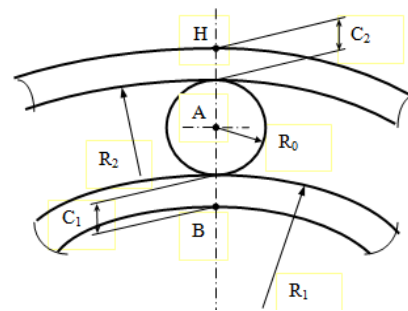


Рис.2. Расчетная модель роликового «подшипника» с одним роликом

Для решения проблемы достаточно рассмотреть два характерных случая расположения (рис.3) тел качения относительно линии действия внешней нагрузки на подшипник - когда она проходит по центру максимально нагруженного ролика - схема 1 и - когда она проходит между максимально нагруженными роликами - схема 2. При этом обе схемы нагружения необходимо исследовать как при отсутствии радиального зазора, так и при его наличии.

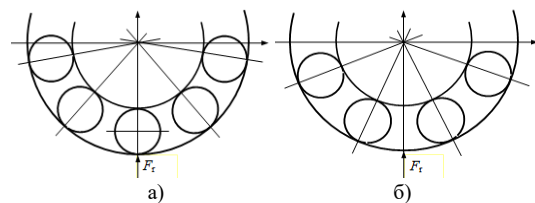


Рис.3 Нагружение роликового подшипника радиальной силой

а). Расположение роликов с одним (схема 1) максимально нагруженным роликом

б). Расположение роликов с двумя (схема 2) наиболее нагруженными роликами

Сначала рассмотрим случай расположение роликов по схеме 1, (рис.3а).

Точное решение задачи в этом случае сводится к решению системы двух уравнений: совместности деформаций, перемещений и зазоров

$$W_i = \alpha_i - S_i, \quad i=0, 1, 2, \dots, N; \quad (1)$$

где W_i , α_i , S_i - упругая деформация, перемещение и зазор на i -ом элементе; здесь параметр N

определяется

$$N = (N_0 - 1) / 2; \quad (2)$$

N_0 - количество воспринимающих нагрузку тел качения, и уравнения равновесия (рис.4)

$$P_0 + 2 \sum_{i=0}^N P_i \cos \gamma_i = F_r,$$

где P_i , F_r – нагрузка на i -ом элементе и внешняя сила на подшипник соответственно; γ_i – угол i -го ролика в подшипнике относительно вертикали.

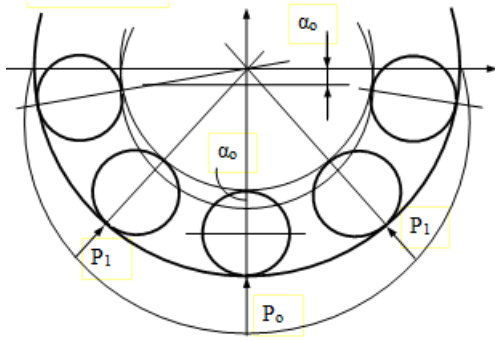


Рис.4 Схема нагружения роликового подшипника при отсутствии радиального зазора

Упругая деформация i -го элемента в роликовом подшипнике в формуле (1) определяется

$$W_i = \delta P_i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N,$$

где δ – податливость «подшипника» с одним роликом (рис.2), согласно работе [4] она определяется как

$$\delta = 40 \ln \left(3,393 \frac{E c_n}{q} \right),$$

E , ν – модуль упругости и коэффициент Пуассона материалов; $c_n = \sqrt{c_1 c_2}$ – приведенная толщина колец подшипника, (упругое взаимодействие тел конечных размеров на линейном контакте подробно рассмотрено в работах [5-9]).

При отсутствии зазоров, $S_i=0$, формула (1) упрощается

$$W_i = \alpha_i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N.$$

где α_i очевидно будет определяться как

$$\alpha_i = \alpha_0 \cos \gamma_i, \quad i = 0, 1, 2, \dots, N,$$

здесь для рассматриваемой схемы $\gamma_i = i \cdot 2\pi / Z$.

Жесткость всего подшипника C получена из выражения $F_r = C \alpha_0$ в следующем виде

$$C = \frac{1 + N + \bar{N}_1}{\delta} = \frac{Z}{4\delta}. \quad (3)$$

При наличии радиального зазора $2e$ (рис.5) в подшипнике для максимального смещения получено выражение в виде

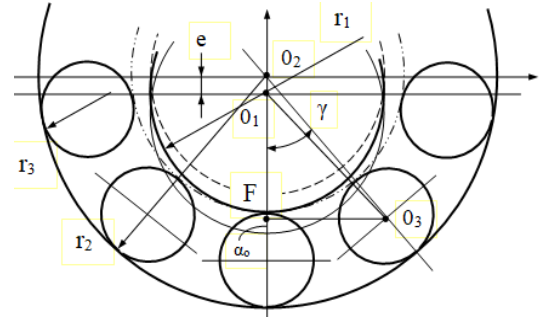


Рис.5 Схема нагружения роликового подшипника при наличии радиального зазора

$$\alpha_0 = P_0 \delta = F_r \delta \frac{1 + \frac{e}{F_r \delta} (\bar{N}_2 - 2 - N - \bar{N}_1)}{1 + N + \bar{N}_1}.$$

Жесткость подшипника для рассматриваемого случая определяется из выражения $C = F_r / \alpha_0$, имеем

$$C = \frac{1}{\delta} \cdot \frac{1 + N + \bar{N}_1}{1 + \frac{e}{F_r \delta} (\bar{N}_2 - 2 - N - \bar{N}_1)}. \quad (4)$$

Относительная жесткость подшипника в долях жесткости при отсутствии зазора определяем по формулам (4) и (3)

$$\bar{C} = \frac{1}{1 + \frac{e}{F_r \delta} (\bar{N}_2 - 2 - N - \bar{N}_1)}.$$

Необходимо отметить, что присутствующий в формулах параметр N определяется по зависимости (2).

Далее рассмотрен случай расположения роликов по схеме 2 (рис.3б), когда внешняя радиальная сила проходит между максимально нагруженными роликами.

В этом случае уравнение равновесия видоизменяется и примет вид

$$2 \sum_{i=1}^N P_i \cos \gamma_i = F_r,$$

где $\gamma_i = (2i-1)\pi / Z$, и $N = N_0 / 2$, N_0 – количество воспринимающих внешнюю нагрузку роликов.

И в этом случае сначала рассмотрен случай **без зазора**.

Жесткость всего подшипника здесь определяется из соотношения $F_r = C \alpha_0$ и для нее получена зависимость

$$C = \frac{F_r}{\alpha_0} = \frac{F_r}{F_r \delta \frac{1}{N + \bar{N}_4}} = \frac{N + \bar{N}_4}{\delta} \approx \frac{1}{\delta} \frac{Z}{4}. \quad (5)$$

При наличии радиального зазора полное смещение α_0 кольца подшипника определяется

$$\alpha_0 = F_r \delta \left[\frac{1 + \frac{e}{F_r \delta} (2\bar{N}_7 - N - \bar{N}_6)}{(N + \bar{N}_6)} \right],$$

а жесткость подшипника

$$C = \frac{F_r}{\alpha_0} = \frac{(N + \bar{N}_6)}{\delta \left(1 + \frac{e}{F_r \delta} (2\bar{N}_7 - N - \bar{N}_6) \right)} \quad (6)$$

Относительная жесткость подшипника с зазором в долях без зазора при второй схеме нагружения определяется из формул (6) и (5)

$$\bar{C} = \frac{1}{1 + \frac{e}{F_r \delta} (2\bar{N}_7 - N - \bar{N}_6)},$$

где безразмерные функции $\bar{N}_i$ во всех формулах в работе определены.

На рис.6 показана отношение жесткости подшипника при первой схеме нагружения к второй от радиального зазора при значениях $F_r \delta = 0,03261$, мм и $Z=18$.

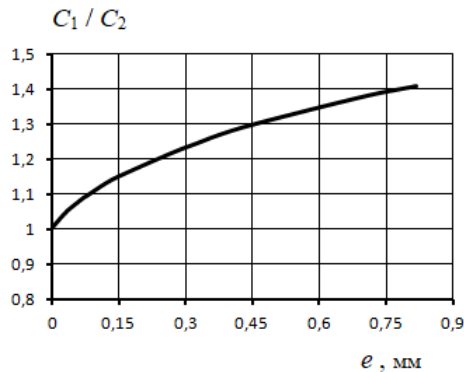


Рис.6. Зависимость отношения жесткости подшипника первой схемы нагружения к второй от радиального зазора e , мм (при $F_r \delta = 0,03261$, мм и $Z=18$)

Анализ полученных зависимостей показал, что жесткость подшипника для указанных схем при отсутствии радиального зазора практически постоянна, что вытекает из формул (3) и (5). В то же время из графиков видно, что при наличии радиального зазора жесткость подшипника при второй схеме нагружения меньше, (при зазоре 250 мкм жесткость подшипника меняется более чем на 20 %), что может стать причиной колебаний роторных систем после появления радиального зазора в результате износа.

Таким образом получены аналитические зависимости для двух схем нагружения подшипника: когда линия действия внешней силы проходит по центру максимально нагруженного ролика и когда она проходит между двумя максимально нагруженными роликами. Установлено, что при отсутствии радиального зазора жесткость подшипника практически постоянна для обеих схем нагружения. Однако при увеличении радиального зазора жесткость подшипника во второй схеме снижается быстрее, в частности для рассматриваемого примера при радиальном зазоре 250 мкм жесткость уменьшается более чем на 20 %, что может привести к возникновению **динамических колебаний в роторных системах** вследствие увеличения зазора. Результаты позволяют количественно оценивать рабочие характеристики подшипников в эксплуатационных системах.

1. Нахатакян Ф.Г. Механика контактного сближения упругих тел в задаче Герца. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 5, с.48-56.
2. Нахатакян Ф.Г., Косарев О.И. Сближение упругих тел в контактной задаче герца // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2010. № 1. С. 102-106.
3. Нахатакян Ф.Г. Сближение упругих тел конечных размеров при начальном касании по линии. // Вестник машиностроения. 2014, № 2, с. 24-27.
4. Нахатакян Ф.Г. Расчетное определение упругой податливости роликовых подшипников на основе теории Герца. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 1. с.28-32.
5. Нахатакян Ф.Г. Решение плоской контактной задачи теории упругости с помощью модели упругого полупространства // Проблемы машиностроения и надежности машин, 2011, № 5, с. 63-67.
6. Nakhatakyan F.G. Contact deformation of finite bodies initially in linear contact // Russian Engineering Research. 2014. T. 34. № 5. p.277-280.
7. Johnson K.L. Surface interaction between elastically loaded bodies under tangential forces. Proc. of R. Soc. Ser A. Math. a Phys. Sciences. № 1183, 1955, v. 230.
8. K.L. Johnson. (Джонсон К) Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. 510 с.
9. M.R. Hoerprich, H. Zantopulos (Хоприх, Цантопулос) Контактные деформации вдоль прямой линии: цилиндр между двумя плоскими плитами. // Тр. Американского общества инженеров-механиков. Проблемы трения и смазки. М.: Мир, 1974. № 3. С.193-198.

ПРИМЕНЕНИЕ МАРТЕНСИТНО-СТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ СИСТЕМЫ Fe-Ni-Co-Mo-Ti ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ВОЛНОВЫХ ГИРОСКОПОВ

Нефёдкин Д.Ю.*, Севальнёв Г.С.

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия. *lab605@viam.ru

Представлены результаты измерений свойств и металлографических исследований стали 21НКМТ на этапах термической обработки, обеспечивающей высокие качественные характеристики резонирующих элементов гироскопа из данной стали. Показано, что добротность механических колебаний резонатора из стали 21НКМТ не имеет прямой зависимости от значений твёрдости, коэрцитивной силы и электросопротивления. При этом измерение данных характеристик позволяет отследить эволюцию структурно-фазового состава стали в процессе термической обработки

Введение

Разработка чувствительных элементов в составе инерциальных навигационных систем является актуальной задачей авиационного и прецизионного машиностроения. При этом особую роль играет создание материалов, обладающих высоким комплексом характеристик на широком интервале температур для обеспечения достаточной надёжности и точности навигационных приборов.

Твердотельные волновые гироскопы (ТВГ) активно используются в инерциальных навигационных системах в качестве датчика угла и угловой скорости летательных аппаратов. Благодаря конструкции и простоте функционирования данный тип гироскопов имеет преимущества относительно волоконно-оптических, лазерных и микромеханических гироскопов [1].

Так как главным чувствительным элементом ТВГ является резонатор, выбор материала резонатора является важной задачей, поскольку от свойств материала резонатора зависит работоспособность и точность гироскопа.

Первые исследования функционирования ТВГ проводились на кварцевом бокале, поэтому изначально для производства резонаторов ТВГ применялось кварцевое стекло. Несмотря на высокие значения добротности механических колебаний (ДМК) – свойства колебательной системы резонатора, резонаторы из кварца являются достаточно сложными в изготовлении, требуют напыления токопроводящим слоем и герметизации рабочего пространства гироскопа [2].

В настоящее время в РФ используются ТВГ с низкодобротным резонатором из стали 21НКМТ, относящейся к мартенситно-сталям. Стали данного класса активно применяются в авиационном машиностроении при создании высоконагруженных деталей шасси и двигателя, работающих при температурах до 450 °С [3].

Одной из особенностей данных сталей является сложная термическая обработка, включающая серию высокотемпературных закалок [4], применяемая для устранения угрозы образования карбонитридов по границам аустенитных зёрен, значительно ухудшающей усталостные свойства

стали. При этом в опубликованных исследованиях стали системы Fe-Ni-Co-Mo-Ti [5] предложен альтернативный режим термической обработки, способствующий получению мелкозернистой структуры, который включает промежуточное дисперсионное твердение и закалку с температуры $Ac_3 + 20$ °С.

Также представлены исследования [6], согласно которым содержание аустенита разных морфологий в стали 03Н18К9М5Т способствует повышению усталостных свойств и пластичности.

При этом высокое содержание никеля и кобальта в стали 21НКМТ, а также применение специальной термической обработки способствуют реализации в данной стали низкого температурного коэффициента частоты [7, 8], однако достижение высокой добротности резонаторов ТВГ из стали 21НКМТ не имеет прямой зависимости от механических свойств и структурных составляющих материала.

В данной работе представлены исследования формирования структурно-фазового состава, а также свойств, предположительно связанных с механизмами рассеяния колебаний, на этапах термической обработки стали 21НКМТ, благодаря которой достигаются высокие значения ДМК резонаторов ТВГ.

Материалы и методы

В качестве материала исследования были взяты прутки из стали 21НКМТ. Прутки были изготовлены методами свободнойковки, горячей экструзии и радиально-сдвиговой прокатки.

Термическая обработка включала закалку, обработку холодом, старение при 600 °С и старение при 350 °С – режим [9, 10], обеспечивающий требуемые значения добротности резонаторов ТВГ.

Металлографический анализ зёрненной структуры включал в себя обработку изображений методом монохроматической бинаризации с помощью программного обеспечения с открытым исходным кодом. Для определения фазовых составляющих в рамках металлографического анализа образцы на каждом этапе термической обработки были протравлены химически в реактиве

Марбле.

Измерение коэрцитивной силы проводилось на кольцевых образцах в постоянном магнитном поле по методике ГОСТ 8.377.

Проведение измерений добротности механических колебаний осуществлялось на цилиндрических образцах-резонаторах путём формирования системы упругих колебаний.

Определение твёрдости HRC по методу Роквелла проводили по ГОСТ 9013-59.

Электрическое сопротивление образцов измерялось путём подключения образца в электрическую цепь постоянного тока

Результаты и их обсуждение

Прутки, изготовленные методом свободнойковки, имеют структуру со средним размером зерна $12,5 \pm 8,5$ мкм, методом горячей экструзии - 13 ± 6 мкм, радиально-сдвиговой прокатки - $14,2 \pm 6,7$ мкм.

Гистограммы распределения содержания зёрен различной величины представлены на рис. 1.

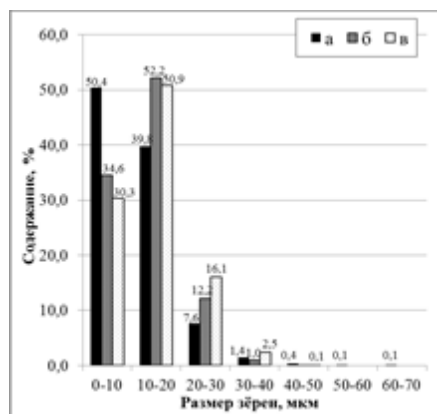


Рис. 1. Гистограммы распределения содержания зёрен различной величины: а – свободная ковка; б – горячая экструзия; в – радиально-сдвиговая прокатка

Для проведения дальнейших исследований прутки изготовились по методу радиально-сдвиговой прокатки. В отличие от метода свободнойковки радиально-сдвиговая прокатка обеспечивает достаточную проработку структуры и не требует большого количества оснастки, как метод горячей экструзии.

В результате закалки происходит рекристаллизация с увеличением среднего размера зерна до $21,7 \pm 9,8$ мкм. Применение обработки холодом после закалки способствует полному протеканию γ - α превращения и получению однородной структуры мартенсита.

На каждом этапе термической обработки были проведены измерения коэрцитивной силы, твёрдости HRC и электросопротивления. Результаты представлены на рис. 2

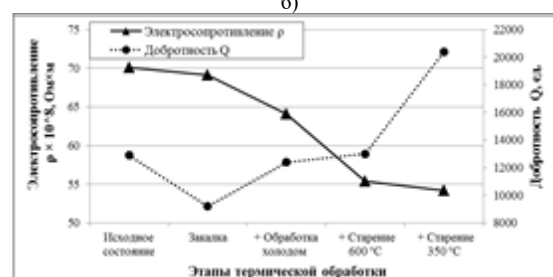
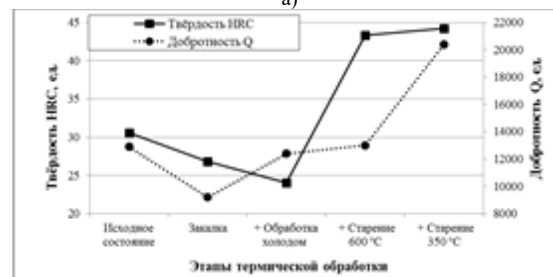
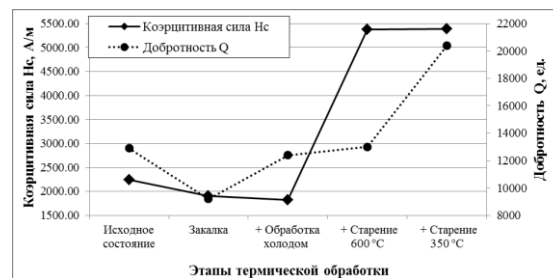
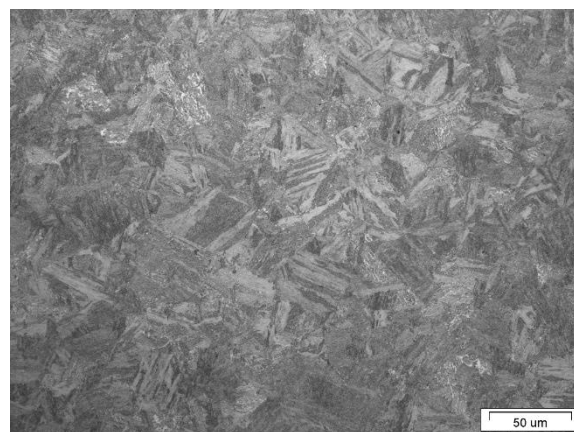
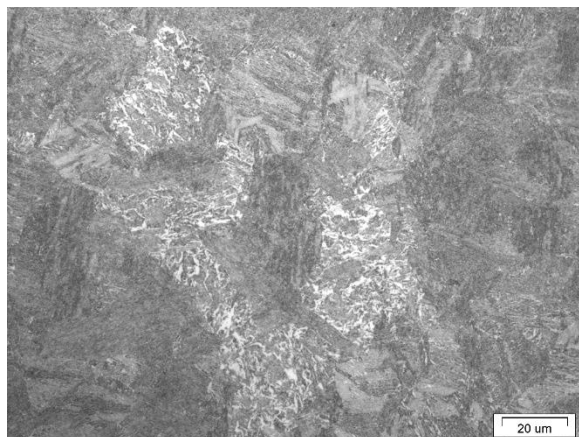


Рис. 2. Влияние этапа обработки на добротность, коэрцитивную силу (а), твёрдость (б) и электросопротивление (в) образцов из стали 21НКТ

Изменение коэрцитивной силы в процессе старения при 600 °C происходит благодаря протеканию обратного α - γ -перехода и снижения подвижности доменной структуры, однако это не оказывает значительного влияния на добротность, как и повышение твёрдости. Микроструктура стали 21НКТ после старения при 600 °C представлена на рис. 3.



а)



б)

Рис. 3. Микроструктура стали 21HKMT после закалки, обработки холодом и старения при 600 °C: а) увеличение $\times 500$; б) увеличение $\times 1000$

Металлографический анализ образцов показал наличие двух структурных составляющих - мартенсита и мелкодисперсной видманштеттовой структурой реверс-аустенита [11].

При том, что старение при 350 °C не оказывало видимого влияния на микроструктуру и коэрцитивную силу образцов из стали, в процессе старения при 350 наблюдается резкий рост ДМК до значений более 20000. Это может быть связано с образованием сегрегаций атомов легирующих элементов в виде зон Гинье-Престона, а также процессами возврата – уменьшением количества точечных дефектов, что подтверждается небольшим увеличением твёрдости и снижением электросопротивления.

1. Королёв М.Н., Малютин Д.М. Анализ технических характеристик чувствительных элементов индикаторных гироскопических стабилизаторов // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. №8. С. 30-45.
2. Rozelle D. The Hemispherical Resonator Gyro: From Wineglass to the Planets // Advances in the Astronautical Sciences. Jan. 2009. No. 134. P. 1157–1178.
3. Покровская Н.Г., Маркова Е.С., Шалькевич А.Б. Высокопрочные конструкционные мартенситостареющие стали стали в авиастроении// Авиационная промышленность. 2014. №1. С. 24–28
4. Конструкционные материалы: Справочник /Б. Н. Арзамасов В. А. Брострем, Н. А. Буше и др.; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.
5. Севальнёв Г.С., Нефёдкин Д.Ю., Дульнев К.В., Обливанцев К.Д. Особенности изменения зеренной структуры в Fe-Ni-Co-Mo-Ti мартенситостареющей стали при различных схемах термической обработки //Авиационные материалы и технологии. 2024. №. 3 С. 3-13 DOI: 10.18577/2713-0193-2024-0-3-3-13
6. Сухих А.А., Махнева Т.М., Дементьев В.Б. Повышение характеристик вязкости мартенситно-стареющих сталей // Химическая физика и мезоскопия. 2015. Том 17, №2 С. 260-269
7. Молотиллов Б.В. Прецизионные сплавы. Справочник. 2-е изд. /Б.В. Молотиллов - М.: Металлургия, 1983, 439с.
8. Нефёдкин Д.Ю., Севальнёв Г.С. Формирование структуры и магнитных свойств мартенситно-стареющей стали 21HKMT в процессе термической обработки // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. Научные труды VIII Международной научной конференции. Москва, 2024. С. 161–163.
9. Распопов А.В., Ладонкин А.В., Лихошерст В.В. Конкурентоспособный волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором // Мехатроника, автоматизация, управление, Том 19 №12 2018. С. 777–787
10. Распопов В.Я., Волчихин И.А., Волчихин А.И. и др. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором. Под ред. В.Я. Распопова. – Тула : ТулГУ. 2018. – 189 с.
11. Потак Я.М. Высокопрочные стали / Я.М. Потак. – М.: Металлургия – 208 с.

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОДУКЦИИ НА ЭТАПАХ ЕЁ ВНЕДРЕНИЯ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ

Офицеров О.О.¹

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; ofitserov@imash.ru

В докладе рассматриваются особенности использования метода комбинированной оценки эффективности продукции на примере режущего инструмента в рамках системы сквозного интегрированного обеспечения ее качества на этапах внедрения в эксплуатацию, предлагается уточнение методики.

Существует множество определений качества продукции. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р ИСО 9000-2015 дает следующее определение: «Качество - степень соответствия совокупности присущих характеристик объекта требованиям. В соответствии с ГОСТ 15467-79: Качество это - совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением. Более полное определение, охватывающее весь жизненный цикл существования продукции, предложено в работе [1]: Качество продукции — степень, с которой совокупность её свойств, позволяет максимально удовлетворить потребности человеческого общества при минимальном для него ущербе от существования данной продукции на протяжении всего её жизненного цикла. Причем эти условия должны сохраняться при воспроизводстве как человеческого общества, так и продукции.

Метод оценки, в соответствии с организационно-методологической формы системы качества режущего инструмента [1]. Наиболее полно потребительские свойства продукции, определяются на заключительном этапе стадии разработки путём оценки по областям её возможного использования (ОВИ). Исходные данные получают при лабораторных испытаниях.

Организация и проведение таких испытаний для торцовых черновых фрез показали высокий уровень материальных затрат, что привело к необходимости введения больших ограничений. В связи с этим мы были вынуждены перенести испытания в производственные условия на этапы внедрения продукции в эксплуатацию. На этих этапах оценка осуществляется комбинированным методом в условиях производственных испытаний и наблюдений.

Для режущего инструмента целевым параметром является Q - объем снятого материала (для чернового инструмента), либо площадь обработанной поверхности (для чистового инструмента) за время T . Затратными выступают все остальные параметры, которые отражают расход ресурсов для получения целевого параметра: T - период наработки инструмента на отказ; q - расход режущего материала за время T , A - работа, совершаемая за время T . Уже имеющаяся на производстве продукция при оценке берется как база [2]. При внедрении опытной

партии на отдельном рабочем месте, базовой точкой выступают средние значения параметров базового инструмента: $Q_6, 10^{-3} \cdot \text{м}^3$; $T_6, \text{мин}$; $q_6, \text{г}$; $A_6, \text{кВт} \cdot \text{мин}$. При внедрении установочной серии на отдельной операции за базовую точку принимаются величины параметров, полученных в отдельном опыте при использовании базовой продукции: $Q_i, 10^{-3} \cdot \text{м}^3$; $T_i, \text{мин}$; $q_i, \text{г}$; $A_i, \text{кВт} \cdot \text{мин}$.

Так как параметры оценки имеют разные размерности, необходимо осуществить их нормирование. Таковое возможно при использовании элементов теории подобия [3] путём преобразования их в безразмерные комплексы – так называемые параметрические критерии подобия (1).

$$Y_x = X_i / X_6, \quad (1)$$

Где X_i – значение параметра опытной продукции, X_6 - базовое значение параметра. Частные эффекты (2,3,4) определяются как разность между целевым и соответствующим затратным параметром: – по производительности (2); по расходу твердого сплава (3); по расходу энергии (4). Сложив значения частных эффектов (5), мы получим комбинированный эффект.

$$\Delta_T = Y_Q - Y_T \quad (2)$$

$$\Delta_q = Y_Q - Y_q \quad (3)$$

$$\Delta_A = Y_Q - Y_A \quad (4)$$

$$\Delta_\Sigma = \Delta_T + \Delta_q + \Delta_A \quad (5)$$

Значения эффектов больше нуля означают, что опытная конструкция эффективнее, и наоборот. Рассмотренный метод применяется при внедрении опытной партии на отдельном рабочем месте, когда сравнение происходит по средним значениям параметров опытной и базовой конструкции, получаемых в результате производственных испытаний инструмента параметров. При внедрении установочной серии на операции в целом оценка осуществляется с учетом вероятности получения положительного эффекта.

Однако в рассмотренном методе осуществления комбинированной оценки есть элементы, снижающие итоговую точность оценки. Авторы [4] отметили, что шкала параметрического критерия подобия Y_x неравномерна, а получаемая зависимость $Y_x = f(X_i)$ криволинейна. Однако зависимость $Y_x = f(X_i)$ имеет прямолинейный характер, при действительно неравномерной шкале Y_x . На участке шкалы от ∞ до

1.0 находятся значения кратные X_6 , а на участке от 1.0 до 0 значения дольные X_6 .

Особенность кратной части шкалы в том, что для получения значения в этой области опытный вариант делится на базовый X_i / X_6 . Фактически в процессе расчетов мы определяем сколько базовых значений укладывается в опытном целом. С дольной частью шкалы происходит обратное. Опытные значения, попадающие на эту часть, меньше базовых, и для определения значения этой доли, мы определяем сколько опытных значений укладывается в базовое. Так как логика получения значений на этих двух частях шкалы разная, то при сравнении может появиться неточность.

Предложенный в [4] метод выравнивания шкалы, позволяющий скорректировать значения, попадающие в дольную часть шкалы.

$$\text{Если } X_i / X_6 < 1, \text{ то } Y_x = 2 - (X_6 / X_i). \quad (6)$$

При таком подходе зависимость $Y_x = f(X_i)$ искривилась и приобрела отрицательные значения, стремящиеся к минус бесконечности. Однако предлагаемый подход имеет положительную сторону в том, что отрицательные значения усиливаются. Это хорошо для процесса опережающей стандартизации.

Поэтому вернёмся к обычному варианту получения зависимости $Y_x = f(X_i)$. Так как было установлено, что искривление этой зависимости в дольной части шкалы Y_x отсутствует, следовательно, необходимо лишь сделать так чтобы значения уровней изменения параметров не попадали в дольную часть шкалы.

Для того чтобы избежать получения значений в обеих частях шкалы параметрического критерия

подобия, мы можем искусственно как бы «вытянуть» саму шкалу увеличив опытное значение в k раз. Делитель – базовое значение при этом остаётся без изменений (7).

$$Y'_x = (X_i \times k) / X_6 \quad (7)$$

Множитель k выбирается так, чтобы в дольную часть шкалы не попадали уровни изменения параметров Y'_x . Таким образом на шкале параметрического критерия подобия будут только кратные значения уровней. Затем мы сокращаем полученное значение Y'_x на выбранный множитель (8).

$$Y_x = Y'_x / k \quad (8)$$

Таким образом исключается неравномерность шкалы при определении параметрических критериев подобия.

Данное исследование было проведено по выполнению за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2025-0002.

1. Албагачиев А.Ю., Пухальский В.А., Сидоров И.М., Александрова С.В., Сидорова Д.М. Организационно-методологический аспект системы сквозного интегрированного обеспечения качества продукции // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2025. - №08. - С. 26-35.
2. Арсеньев Ю.Д. Теория подобия в инженерных экономических расчетах. - М.: Высшая школа, 1967. - 261 с
3. Силин С.С. Метод подобия при резании материалов. - М.: Машиностроение, 1979. - 117 с.
4. Албагачиев А.Ю., Пухальский В.А. Анализ особенностей использования метода комбинированной оценки // Проблемы машиностроения и автоматизации. - 2022. - №2. - С. 4-7

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ШТАМПОВ ДЛЯ ХОЛОДНОЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ

Памфилов Е.А., Пилушина Г.А., Кузьмин П.В.

Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия; epamfilov@yandex.ru

Рассматриваются возможности и пути обеспечения регламентированного срока службы штампов холодной штамповки, определяемого требуемым объемом, изготавливаемых на них деталей, посредством рационального назначения на этапах проектирования, изготовления и эксплуатации конструкционных материалов, обоснования комплексной упрочняющей обработки основных функциональных деталей применяемых штампов, а также эффективного использования технологических смазок для гарантирования задаваемых уровней долговечности и надежности рассматриваемой оснастки и достижения запланированного снижения себестоимости, выпускаемой с её использованием, продукции.

Введение

Высокопроизводительные процессы холодной штамповки широко используются в машиностроении, электронной, радиотехнической и других отраслях промышленности при изготовлении широкой номенклатуры деталей из листовых заготовок, как при крупносерийном их производстве, так и в условиях менее масштабных производств.

При выполнении операций указанного вида штамповки происходит деформационное воздействие со стороны рабочих элементов штампов на листовые материалы, в результате чего происходит формирование изделий достаточно сложной конфигурации. Для этого обычно выполняется совокупность таких технологических элементов холодной листовой штамповки как разрезание, вырубка, пробивка отверстий, вытяжка деталей, отбортовка по контуру, обжим и др., в результате чего и формируется требуемая форма детали.

При этом необходимая деформация протекает в условиях действия значительных ударно-динамических нагрузок, тесного контактирования и совместного упругого и пластического деформирования материала заготовки при его технологического взаимодействия с рабочими поверхностями пуансонов и матриц используемых штампов.

По литературным данным [1-3] чаще всего изнашивание рабочих элементов штампов протекает за счет реализации механизмов усталостного отделения частиц инструментального материала, его поверхностной деформации, микровыкрашивания, схватывания и др.

Поэтому сложно выполнить необходимое для выполнения поставленных задач прогнозирование результатов происходящих явлений трения и происходящего при этом изнашивания. Кроме того, задача эта усложняется тем, что трение реализуется в условиях ограниченной подачи технологического смазочного материала в зону контактного взаимодействия.

В результате в процессе изготовления деталей методами холодной листовой штамповки, основные рабочие элементы используемых штампов, прежде

всего, их матрицы, пуансоны, а также направляющие элементы, подвергаются достаточно интенсивному, но сложно прогнозируемому изнашиванию, что приводит к преждевременным отказам рассматриваемой оснастки.

Материалы и методы

Для минимизации износа ответственных деталей штампов необходимо исходное создание и последующее поддержание в процессе эксплуатации благоприятных совокупностей характеристик состояния функциональных поверхностных слоев матриц, пуансонов и направляющих элементов. К таким определяющим параметрам прежде всего относятся химический состав и структурное состояние назначаемых конструкционных материалов, обеспечивающие, в основном, необходимые и на достаточно стабильном уровне их физико-механические характеристики.

К этим показателям в первую очередь относятся пределы прочности, текучести и усталости, твердость, ударная вязкость, геометрические параметры рабочих изнашивающихся поверхностей – волнистость, шероховатость, субмикрорельеф, химическая активность и остаточное напряженное состояние функциональных поверхностных слоев, а также ряд других менее значимых характеристик. [2].

При этом вышеперечисленные показатели необходимо последовательно обеспечивать с учётом существенного влияния на получаемые уровни работоспособности штампов, факторов технологической наследственности. А именно, на этапах проектирования штампового инструмента, реализации технологического процесса его изготовления в том числе и выполнения операций локального упрочнения быстро изнашивающихся деталей.

Кроме того, необходимой является предпроектная оценка требуемого лимита работоспособности проектируемой штамповой оснастки, определяемого, в значительной степени, объёмами производства и показателями износостойкости их основных деталей. При этом следует иметь в виду, что нерациональными являются как недостаточная, так и избыточная

долговечность, поскольку в обоих случаях увеличиваются производственные расходы на изготовление и поддержание в должном рабочем состоянии рассматриваемой оснастки.

С этой точки зрения, например, при выборе более экономичного инструментального материала следует руководствоваться тем, что обычно, как для производств, характеризующихся частой сменой номенклатуры изготавливаемых деталей и значительной долей изделий, выпускаемых как в небольших объемах, так и в условиях мелкосерийного производства в большинстве случаев достаточно использования относительно недорогих материалов, марки которых широко приводятся в литературных источниках [3, 4].

Поэтому при эксплуатации штампов в условиях мелкосерийного производства рационально применение сталей, обладающих следующими физико-механическими характеристиками: предел прочности – 640-740 МПа, предел текучести – 340-440 МПа, относительное удлинение – 8-12%, относительное сужение – 25-45%, ударная вязкость – 10-15 Дж/см², твердость – 54-58 HRC;

Обычно, часто необходимое повышение до требуемого уровня ряда их механических характеристик, достигаются посредством выполнения объемной упрочняющей термической обработки, включающей закалку и последующий низкий или средний отпуск. Для индивидуального и мелкосерийного производств требуемым параметрам соответствуют углеродистые и низколегированные стали: У8А, У10А, 9ХФ, 7ХНМ, ХВГ, ШХ15 и др.

При реализации процессов производства в объемах, соответствующих верхнему уровню мелкосерийного производства, достаточным является достижение относительно небольшого повышения износостойкости по сравнению с указанным выше. Это может быть обеспечено на основе совершенствования традиционных видов объемной термической обработки.

При необходимости достижения небольшого уровня стойкости штампов можно осуществлять выполнение ниже следующих операций. Прежде всего, желательно проведение предварительного изометрического отжига заготовок для изготовления матриц и пуансонов, который стабилизирует структуру, а затем изотермическую закалку с получением структуры бейнита в готовых деталях. В результате происходит минимизация остаточных напряжений и практическое исключение трещинообразования при получении достаточного высокого уровня твердости (58...60 HRC).

В условиях среднесерийного производства требуется большая долговечность штампов и, соответственно, дальнейшее увеличение износостойкости их функциональных деталей. Эта задача может быть решена за счёт применения легированных и быстрорежущих сталей, например, Х12М, 9Х6ВФ, Р9, Р6М5. Если планируется

производство крупносерийное, то более перспективным является использование твердых вольфрамокобальтовых сплавов с содержанием кобальта от 3 до 25 процентов, в том числе, ВК8, ВК10 ВК8М, ВК10-ОМ и др. Однако их использование требует серьезного технико-экономического обоснования по причине высокой стоимости многих из указанных материалов и больших затрат на обработку из них точных деталей штампов.

Тем не менее, очень часто только лишь с помощью рационального подбора инструментальных материалов и сплавов, а также оптимизации режимов термической обработки рекомендуемых сталей для достижения необходимого уровня износостойкости ответственных функциональных деталей получить не удастся.

В условиях массового производства указанную задачу часто пытаются решать исключительно путем использования твердых сплавов. Однако, во многих случаях такой подход существенно затруднен из-за ограниченных экономических и технологических возможностей многих предприятий.

Результаты и их обсуждение

Учитывая вышеизложенное, нами вырабатывались рекомендации, актуальные для производственных условий малых и средних предприятий электронной промышленности, в интересах которых выполнялась настоящая работа. Поэтому предусматривались возможности более существенного повышения стойкости штампов путем дополнительного упрочнения локальных зон матриц, пуансонов и направляющих элементов, в которых развивается наибольшее изнашивание.

Большими перспективами в этом плане обладают методы обработки концентрированными потоками энергии, преимущественно электроэрозионной и лазерной, как отдельно, так и в синергетическом их сочетании. Эти методы достаточно универсальны, что позволяет производить упрочнение детали различных размеров и конфигурации в труднодоступных местах, достигая более высоких показателей износостойкости функциональных поверхностей. штампов.

Технико-экспериментальный анализ показывает также целесообразность использования для создания в совокупности с лазерной или электроискровой обработкой финишных операций эластичного шлифования и алмазного выглаживания, выполняемых с учетом наследственного влияния исходного состояния упрочняемых поверхностей.

Особенно это важно с учётом того, что выполнение лазерной и электроискровой обработок по традиционным схемам часто не обеспечивает получения всей совокупности благоприятных значений шероховатости, напряженного состояния,

высокой химической стойкости и некоторых других характеристик поверхностных слоев.

Поэтому были предложены новые способы их реализации, позволяющие более эффективно управлять параметрами, определяющими износостойкость. При этом имелось в виду создание возможностей гибкого изменения формируемых характеристик, особенно при переходе граничных зон между локальными участками рабочих поверхностей, изнашивающимися по различным механизмам.

С использованием указанных принципов на основе лазерной обработки разработаны способы формирования регламентированного уровня остаточных напряжений, регулярной шероховатости и одновременного упрочнения совокупности изнашиваемых поверхностей режущих инструментов (а.с. № 1481259).

Электроискровая обработка положена в основу электродеформационного упрочнения, способа создания антифрикционных покрытий (а.с. № 815595) и способа формирования слоев, стойких к действию водорода при изнашивании (а.с. № 1259147).

Важным элементом упрочняющей или восстанавливающей электроискровой обработки является последующее воздействие на обработанную поверхность различными видами дополнительной обработки [6].

Достаточно перспективным является сочетание электроискровых разрядов с деформационным упрочнением твердосплавными роликами. Повышенная износостойкость штампов, упрочненных подобным образом, позволяет в существенной степени нивелировать возможность получения в поверхностных слоях опасных микротрещин и достигать дополнительного эффекта термомеханического упрочнения.

Эластичное шлифование поверхностей после электроискровой обработки позволяет существенно оптимизировать совокупность параметров микрорельефа и обеспечить удаление дефектного поверхностного слоя, что обуславливает повышение износостойкости и снижение энергозатрат на трение в процессе эксплуатации упрочненного штампа.

Аналогичные результаты достигаются и при алмазном выглаживании поверхностей после их электроискрового упрочнения [7].

Для повышения эффективности электроискровой обработки целесообразно использовать новые электродные материалы и покрытия, например: твердые сплавы типа «СТИМ», сплавы на основе карбидов титана, вольфрама, боридов и оксида циркония, силицидных материалов, твердых сплавов с тугоплавкими и высокотвердыми добавками и др.

Использование этих материалов в качестве

электродов способствует большему переносу легирующих элементов на обрабатываемую поверхность, что позволяет существенно повысить сопротивляемость упрочненных поверхностных слоев действию активных сред, улучшению качественных характеристик покрытия и увеличению ресурса упрочняемого или восстанавливаемого штампа.

Выводы

Использование предложенных способов реализации лазерной и электроискровой обработок для упрочнения стальных и твердосплавных штампов для холодной листовой штамповки обеспечивает повышение их износостойкости до 2,0–2,5 раз по сравнению с традиционными вариантами этих видов упрочнения.

В условиях использования рассматриваемых видов холодной листовой штамповки во многих случаях целесообразным является применение эффективных технологических смазок. При этом рационально создавать на рабочих поверхностях деформирующих и направляющих элементов создавать регулярную шероховатость, позволяющую оптимизировать режим смазывания при высоких давлениях на фрикционном контакте. Так же желательно снижение сил трения в контакте деформирующий элемент-обрабатываемый материал, за счет создания антифрикционных металлополимерных протекторных слоев.

1. Аверкиев Ю.А. Технология холодной штамповки / Ю.А. Аверкиев, А.Ю. Аверкиев. – М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
2. Билибин К.И. Холодная штамповка: учеб. пособие по курсу «Технология электронных средств» / К.И. Билибин, В.П. Григорьев. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. - 68 с.
3. Михаленко Ф.П., Стойкость разделительных штампов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. Машиностроение, 1986. 224 с., ил.
4. Памфилов Е.А. Оптимизация упрочняющих технологий и их реализация с целью существенного повышения износостойкости штампового и дереворежущего инструмента: автореф... дисс. д-ра. техн. наук / ВНИИ ж.-д. трансп. - М., 1988. 39 с. ил.
5. Дальский А. М. Справочник технолога - машиностроителя. В 2-х т. С74 Т.1/ А. М. Дальский, А. Г. Косилова, Р. К. Мещеряков, А. Г. Суслов. - М.: Машиностроение-1, 2001. 912 с., ил.
6. Штамповка тонкостенных изделий с активизацией контактных сил трения / М.И. Поксваткин, А.А. Иванайский, С.В. Герман, Е.М. Басова // Актуальные проблемы в машиностроении. 2015. № 2. С. 132-136.
7. Пилюшина Г.А., Тиняев А.Ю. Восстановление деталей машин методом электроискрового легирования//Новые материалы и технологии в машиностроении. 2023. № 38. С. 111-115.
8. Казаков В.И., Пилюшина Г.А. Восстановление работоспособности деталей и инструментов путем нанесения электроискрового покрытия//Новые материалы и технологии в машиностроении. 2019. № 29. С. 37- 40

ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛНОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ГИДРАТАЦИИ ПОЛИСАХАРИДОВ

Панин С.С., Брызгалов Е.А., Яковенко Н.И., Довбененко М.С.

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, РФ; nikiforyj@yandex.ru

Исследована возможность применения волновых технологий для решения проблем гидратации полисахаридов. Показано, что волновая технология позволяет получить однородную смесь при пониженных температурах и ускорить процесс гидратации некоторых полисахаридов.

Классические технологические проблемы, с которыми сталкиваются при гидратации некоторых полисахаридов:

1. Частицы полисахарида при контакте с водой мгновенно гидратируются на своей поверхности, образуя липкий "кокон". Этот кокон препятствует проникновению воды внутрь частицы. В результате внутри остаются сухие, нерастворенные комки.
2. Температурная зависимость. При пониженных температурах значительно увеличивается время смешивания.

В результате вышеперечисленных проблем процесс занимает часы, а полученная смесь неоднородна, содержит комки и имеет нестабильные свойства.

В рамках работы изучались возможности применения волновой технологии для ускорения процесса гидратации полисахаридов и получения однородной смеси. В настоящее время процесс гидратации на основе полисахаридов осуществляется на типовом оборудовании, представляющие из себя роторные мешалки различной конфигурации, либо смесители, основанные на гидратации в потоке. Процесс гидратации полисахаридов традиционными способами при помощи лопастных роторных мешалок при нормальных условиях занимает значительное время, а при пониженных температурах сильно затруднён. Для проведения экспериментальных работ в данном направлении в НЦ НВМТ РАН был разработан волновой дезинтегратор (рис. 1). [1-3]



Рис. 1. Волновой дезинтегратор
1- реактор; 2 – двигатели крутильных колебаний; 3 – упругий элемент; 4 –привод вращения; 5 – частотный преобразователь.

Волновой дезинтегратор позволяет работать как в режиме вращения рабочего органа, как обычный дезинтегратор, так и в волновом режиме, совмещающем вращение с колебаниями.

В качестве привода колебаний в дезинтеграторе установлены 2 дебалансных двигателя с эффектом самосинхронизации (рис.1п2). Эффект самосинхронизации возникает в результате того, что роторы обоих двигателей вращаются в одной фазе. Двигатели возбуждают резонансные крутильные колебания, которые через упругий элемент (рис.1п3) передаются волновому реактору (рис.1п1).

После запуска установки полное перемешивание раствора полисахаридов на дезинтеграторе осуществлено приблизительно через 10сек. Эксперимент проводился при пониженной температуре ($t=5^{\circ}\text{C}$). Для сравнения растворение аналогичной рецептуры полисахаридов в лопастном лабораторном смесителе производилось в течение 20мин. На графике (рис.2) видно, что при обработке состава на лопастной мешалке набор вязкости на девятой минуте прекратился, а в рабочей ёмкости лопастной мешалки остались комки нерастворённого полисахарида.

Как видно из графика (рис.2) волновой дезинтегратор существенно ускоряет темп набора вязкости раствора по сравнению с традиционным перемешиванием (лопастная мешалка).

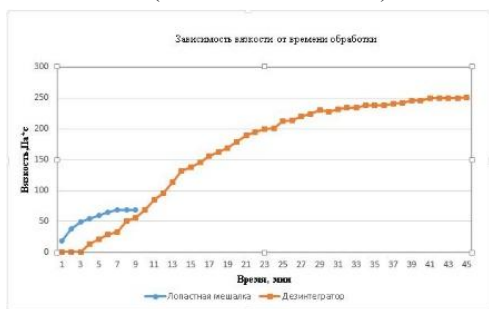


Рис. 2. Зависимость вязкости от времени обработки

Применение волнового дезинтегратора позволило получить однородную, безкомковую смесь полисахарида при пониженной температуре и значительно сократить время гидратации.

Данная работа выполнена в рамках научно-исследовательской работе программы ФНИ РФ на 2021–2030 гг. по теме 1–1 Зф. «Развитие научных основ волновых технологий и волновой техники для получения новых композитов с уникальными свойствами и новых способов медицинской диагностики» (FFGU-2024-0013), этап 2025г. «Разработка научных принципов создания новых высокоэффективных устройств и технологий для диспергирования и гомогенизации сред в процессах и технологиях перерабатывающей промышленности».

1. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Нелинейная волновая механика и технологии.- М.:Регулярная и хаотическая динамика.- 2008г
2. Р.Ф. Ганиев, Л.Е. Украинский, О.Р. Ганиев, С.Р. Ганиев, А.П. Пустовгар. Нелинейная волновая механика и технологии. Печатная монография.-М:Регулярная и хаотическая динамика, 2008г
3. Ганиев Р.Ф., Пучка Г.Н., Украинский Л.Е., Цапенко А.С. О нелинейных эффектах в многофазных средах// Сборник трудов VI-го Международного симпозиума по нелинейной акустике.- Москва.- 1975

АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАНСНОГО РЕЖИМА УСТАНОВОК ВОЛНОВОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ С ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ

Панин С.С., Довбненко М.С., Яковенко Н.И., Брызгалов Е.А.

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; dovbnenko_ms@mail.ru

В данной работе исследуется возможность применения промышленного оборудования в сочетании с собственными алгоритмами управления для поиска оптимальных параметров возбуждающего напряжения электродинамического привода колебаний.

Цель

В данной работе исследуется возможность применения промышленных частотных преобразователей как основного силового компонента системы управления электродинамическим приводом волнового смесителя, работающего в резонансном режиме.

Введение

На протяжении многих лет на базе НЦ НВМТ РАН создавались установки волнового перемешивания с различными типами возбуждения [1,3], в том числе роторным и электродинамическим. Каждый аппарат разрабатывался с целью интенсификации процессов перемешивания различных сред. В данной работе рассматриваются исключительно электродинамические возбудители, представляющие собой электромеханический прибор, состоящий из ротора с постоянными магнитами и статора с катушками. При подаче переменного напряжения на статорные обмотки ротор, как правило связанный с упругим элементом, начинает совершать крутильные колебания. Их амплитуда зависит от параметров питающего напряжения, а именно от частоты и величины напряжения.

Необходимость поиска оптимальных параметров питающего напряжения возникает как в ходе лабораторных испытаний, так и при потенциальном промышленном применении, поскольку параметры обрабатываемой среды могут меняться в процессе обработки или изначально различаться.

Задача формирования переменного напряжения заданной формы и частоты в современной промышленности давно решена и реализуется с помощью частотных преобразователей. Помимо непосредственного формирования напряжения, эти преобразователи также предоставляют информацию о потребляемой мощности, токе, косинусе угла (коэффициенте мощности) и т.д. Это позволяет построить систему управления электродинамическим приводом с минимальными аппаратно-программными затратами, без необходимости разработки собственных решений.

Основная концепция

Для построения любой системы автоматического управления требуется критерий управления. Известно, что в линейных механических резонансных системах критерием резонанса является разность фаз между возбуждающей силой и колебанием самой системы, равная $\pi/2$. Однако измерение данного фазового сдвига требует получения мгновенных значений тока в статоре, применения методов оцифровки и цифровой обработки сигналов, что, в свою очередь, значительно усложняет систему.

В связи с этим предлагается использовать значение коэффициента мощности, который достигает минимума на резонансной частоте. Его значение предоставляется по интерфейсу RS-485 непосредственно частотным преобразователем.

В качестве дополнительного источника контроля может служить акселерометр или преобразователь линейных перемещений, установленный непосредственно на рабочем органе. Контроль амплитуды важен не только в процессе поиска оптимальных параметров, но и для обеспечения защиты при превышении допустимых значений.

Выводы

В настоящее время реализована система на базе частотного преобразователя Delta C2000 и акселерометра в качестве прибора контроля амплитуды. Были разработаны алгоритмы поиска оптимальных параметров питающего напряжения и их последующей подстройки в процессе работы.

В результате испытаний было установлено, что система успешно находит резонансную частоту и поддерживает ее на протяжении всей работы лабораторной установки в холостом режиме.

В дальнейшем предполагается масштабирование системы и испытания алгоритмов управления с различными средами.

Данная работа выполнена в рамках научно – исследовательской работе программы ФНИ РФ на 2021–2030 гг. по теме 1 -1 3ф. «Развитие научных основ волновых технологий и волновой техники для получения новых композитов с уникальными свойствами и новых способов медицинской диагностики» (FFGU-2024-0013), этап 2025 г. «Разработка научных принципов создания новых высокоэффективных устройств и технологий для

диспергирования и гомогенизации сред в процессах
и технологиях перерабатывающей
промышленности»

1. Ганиев Р.Ф., Украинский Л.Е. Динамика частиц при воздействии вибраций. – Киев: Наукова думка, 1975. - 169 с.
2. Ганиев Р.Ф. (ред.) Колебательные явления в многофазных средах и их использование в технологии, Киев: Техника, 1980. - 142 с.
3. 3. Ганиев Р.Ф. (ред.) Волновая техника и технология. Научные основы, промышленные испытания и их результаты, перспективы использования. М.:Издательская фирма «Логос», 1993г. - 126 с

МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В МАШИНОВЕДЕНИИ. К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ

Панов А.Н.¹, Махутов Н.А.², Ромашова Е.Ю.², Ерофеев М.Н.², Гиршфельд П.А.²

¹ЮРС-РУСЬ, Санкт-Петербург, Россия; a.panov@tut.by

²Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; romashova@imash.ru

В настоящее время развитие машиноведения сосредоточено, интенсивно расширяется, с одной стороны, областях применения математических, электронных моделей и средств поддержки интеллектуальной деятельности, с другой – использования риск-ориентированного подхода в жизненном цикле техники и технологий. Указанное сочетание позволяет повысить оптимальность отношения «качество-цена-риски» для обеспечения конкурентноспособности продукции машиностроения, а также снизить сроки постановки продукции на производство. В докладе рассматриваются проблемы, пути развития методологии, моделей и методов обоснования приемлемости конструкторско-технологических рисков техники и технологий для обеспечения пренебрежимости рисков гармоничного применения физических моделей с математическими, электронными, а также численными методами.

Развитие машиноведения и машиностроения, в настоящее время, происходит по нескольким направлениям. Следует выделить разработку математических моделей, численных методов и т.п., а также программного обеспечения для моделирования физических объектов, что снижает трудоемкость создания новой техники и технологий, а также сокращает ресурсы на поставку продукции на производства за счет уменьшения проведения испытаний и т.д.

С 60-х годов 20 века [1-4] занимает особое место, а в настоящее время бурно развивается и интенсивно применяется в технике направление по созданию и применению встроенного в технику и технологии программного обеспечения, а также средств поддержки интеллектуальной деятельности («artificial intelligence»), что, на наш взгляд, ошибочно либо преднамеренно в технологиях маркетинга называется «искусственный интеллект». Интеллекта в программном средстве конечно же нет, имеется особый вид информационных технологий, который при переработке использует созданные человечеством глобальные массивы данных и знаний. Это своеобразный экскаватор-драга по переработке словесной руды. Для однозначного взаимопонимания в развитии терминов, ранее указанных в научной и технической литературе и уже стандартизируются (ГОСТ Р 57700.37 и др.) соответствующие термины и определения (математическая модель и т.д.), что крайне важно и без чего не представляется адекватное использование и развитие будущее в будущем средств поддержки интеллектуальной деятельности.

Вторым направлением развития машиноведения и машиностроения с 60-х годов 20 века выделим развитие [5] критичности оценочных категорий по предназначению при испытаниях и контроле, что позволяет оптимизировать затраты на создание техники. В настоящее время на основе детерминированного, допускового, статистического и вероятностного (например, прогнозирование надежности техники и т.д. [6]) подходов получило интенсивное (после 2000 г.) развитие и применение

методологии, основанной на рисках. Это представлено как в фундаментальных работах (например, «Безопасность России») [7], так и в отраслевых исследованиях и разработках [8-12]. На практике наиболее широко используется обобщенное определение термина «риск – воздействие неопределенности» (ISO 9000).

Следует отметить, что программное обеспечение, с одной стороны, решает задачи обеспечения соответствия требованиям (качество, надежность, безопасность и т.д.) основываясь только на результатах исследований, описания законов и закономерностей процессов в реальных объектах. С другой стороны – модели и методы информационных технологий создают дополнительные риски на результат в процессе их применения.

Отметим, что жизненный цикл объектов второй рукотворной природы (техники и технологий) включает этапы, в том числе, применения обязательных и добровольных технических нормативно-правовых актов (Технические регламенты, ГОСТ и т.п.)

Перечисленные проблемы, имеющиеся задачи, указанные направления развития и их взаимосвязь требуют дальнейшего интенсивного изучения, чему и посвящена представленная публикация.

Целью работы является проведение исследований, развитие и применение методологии, моделей и методик обоснования приемлемости конструкторско-технологических рисков объектов машиностроения на основе использования математических моделей, численных методов, а также средств поддержки интеллектуальной деятельности.

Задачи исследования:

1. Развить применение математического моделирования риск-ориентированного подхода при разработке технических регламентов и технических нормативно-правовых актов (ТР, ГОСТ и т.п.) для обоснования нормируемых показателей при достижении приемлемых рисков соответствия.

2. Обосновать **управление конструкторско-технологическими рисками** для зон зарождения повреждения - источников отказов техники с гармонизированным использованием физических, математических, электронных и цифровых моделей на этапе разработки типа конструкции объектов машиностроения.

3. Обосновать **управление конструкторско-технологическими рисками**, участвующих в процессах **средств производства, измерения** и т.д., при создании объектов машиностроения на этапе проектирования процессов изготовления, ремонта, восстановления, модернизации и утилизации с гармонизированным использованием физических и математических, электронных и цифровых моделей.

4. Сформулировать особенности и развить модели и методики **управления конструкторско-технологическими рисками** для технических систем со встроенным программным обеспечением («дуализм рисков») и применением средств поддержки интеллектуальной деятельности.

5. Развить критерии адекватности и достижения приемлемых конструкторско-технологических рисков допустимости совместного применения и/или исключения физических испытаний при использовании математических моделей, численных методов в технических регламентах и нормативно-правовых актах, а также при создании и совершенствовании конструкций.

6. Идентифицировать перспективные направления исследований и расширить использование на практике полученных результатов.

Методы, средства проведения исследований и разработок.

Исследования, измерение нагруженности, испытания материалов, конструкций; циклические испытания в рамках иерархических моделей конструкций; тензометрия; расчеты методом конечных элементов; статистическая оценка и вероятностное прогнозирование циклической долговечности; функциональные испытания элементов машин; полигонные и дорожные испытания; методики планирования приемлемости и анализа рисков продукции и процессов; логико-вероятностное моделирование, технологические процессы изготовления и т.д.. Разработаны методы и средства для изменения нагруженности и моделирования функциональных и ресурсных испытаний элементов и конструкций мобильных машин.

Результаты исследований, разработок для машиноведения и применения в практике машиностроения.

Развиты и получили применение на практике методологии, модели и методики обоснования приемлемости конструкторско-технологических рисков объектов машиностроения на основе

использования математических моделей, численных методов, а также средств поддержки интеллектуальной деятельности на основе развитой методологии и алгоритмов риск ориентированного проектирования техники и технологий:

1. Развита применение математического моделирования риск-ориентированного подхода при разработке технических регламентов и технических нормативно-правовых актов (ТР, ГОСТ и т.п.) для обоснования нормируемых показателей при достижении приемлемых интегральных рисков соответствия для типа продукции и процессов тиражирования. Разработана и широко используется серия государственных и межгосударственных стандартов на методики применения подхода, основанного на рисках при проектировании, производстве (СТБ 16943, СТБ 1506 и т.д.), а также на технические требования для наиболее критичных элементов мобильных машин, например, тормозные механизм, рулевой привод, элементы подвески и т.д. (ГОСТ 30729, ГОСТ 30731, ГОСТ 31341 и др.) [8 -10].

2. Разработаны и применены модели и методы, в том числе и гармонизированные физические модели и электронные, цифровые модели и численные (МКЭ) методы, на этапе разработки типа конструкции объектов машиностроения. Обосновано и применено управление конструкторско-технологическими рисками для зон зарождения повреждения - источников отказов конструкций (на примере мобильных машин). Указанное позволило сократить сроки и затраты на оценку по результатам физических испытаний и прогнозировать ресурс при варьировании конструкторско-технологических факторов на основе расчетно-экспериментальных методов для достижения приемлемых рисков соответствия.

Предложено применение планов управления и анализа рисков «типа продукции» [12].

3. Обосновано управление конструкторско-технологическими рисками, участвующими в процессах создания объектов машиностроения средств производства, измерения и т.д. на этапе проектирования процессов изготовления, ремонта, восстановления, модернизации и утилизации с гармонизированным использованием физических и цифровых моделей путем разработки карт потоков рисков процессов, планов управления рисками процессов и анализа рисков, включающих физическое и математических, электронных и цифровых моделей. Указанное позволило сократить сроки и затраты на оценку по результатам физических испытаний и прогнозировать риски событий, вариаций и бифуркаций конструкторско-технологических факторов для достижения приемлемых рисков соответствия процессов тиражирования [13].

4. Сформулированы особенности и развиты

модели и методики управления конструкторско-технологическими рисками для технических систем со встроенным программным обеспечением («дуализм рисков») и применением средств поддержки интеллектуальной деятельности путем разработки планов управления и анализа рисков вещественно-информационных систем (рис. 1) [14].

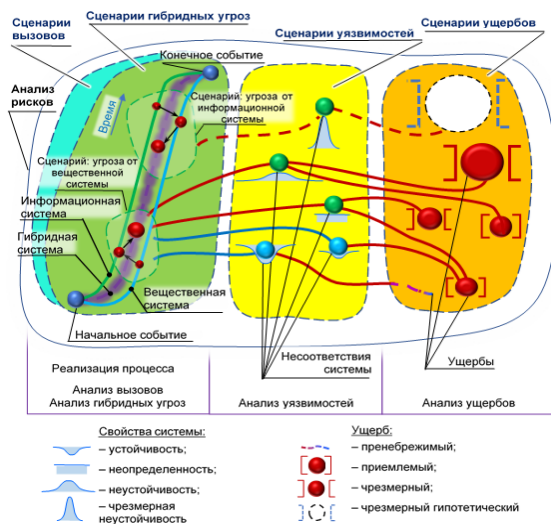


Рис. 1. Структура анализа рисков продукции со встроенным программным обеспечением – «дуализм рисков»

5. Развити критери адекватности и достижения приемлемых конструкторско-технологических рисков допустимости совместного применения и/или исключения физических испытаний при использовании математических, электронных и цифровых моделей, численных методов в технических регламентах и нормативно-правовых актах, а также при создании и совершенствовании конструкций для достижения приемлемых рисков соответствия процессов верификации и валидации [15].

6. Идентифицированы перспективные направления исследований и использования на практике полученных результатов (расширение видов моделирования на основе риск-ориентированного подхода, уточнение критериев и т.д.).

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0024

1. Искусственный интеллект: В 3 кн. Кн.1 Системы общения и экспертные системы: Справочник / Под ред. Э.В. Попова. - М.: Радио и связь, 1990. - 464 с.: ил.
2. Искусственный интеллект: В 3 кн. Кн.2 Модели и методы: Справочник / Под ред. Д.А. Поспелова. - М.: Радио и связь, 1990. - 464 с.: ил.
3. Искусственный интеллект: В 3 кн. Кн.3 Программные и аппаратные средства: Справочник / Под ред. В.Н. Захарова, В.Ф. Хорошевского. - М.: Радио и связь, 1990. - 368 с.: ил.
4. Искусственный интеллект: Применение в интегрированных производственных системах / Под ред. Э. Кысиака; Пер. с англ. А.П. Фомина; Под ред. А.И. Дашенко, Е.В. Левнера. - М.: Машиностроение, 1991. - 544 с.: ил.
5. Технологические методы и средства контроля в самолетостроении. Под ред. канд.техн. наук И.М. Дунаева. М.: Машиностроение, 1973, стр.148.
6. Прогнозирование надежности тракторов / В.Я. Анилович, А.С. Гринченко, В.Л. Литвиненко, И.Ш. Чернявский/ Под общ. ред. В.Я. Аниловича. - М.: Машиностроение, 1986-224 с., ил.
7. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная, технологическая и техносферная безопасность / Под общ. ред. Н.А. Махутова. Москва: Знание, 2018. 1016 с.
8. Горбачевич, М.И. Проектирование транспортных средств: нагруженность, повреждение, ресурс: Монография/ М.И. Горбачевич, А.Н. Панов, С.М. Минюкович; Под общ.ред. А.Н. Панова. - Мн. Технопринт, 2005. - 264 с.: ил
9. Анализ риска и повышение безопасности водо-водяных энергетических реакторов/ Н.А. Махутов, К.В. Фролов, Ю.Г. Драгунов и др.; под ред. Н.А. Махутова и М.М. Гаденина; Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. - М.: Наука, 2009. - 499 с.
10. Панов, А.Н. Научно-методические основы проектирования: системное обеспечение приемлемых рисков в автотракторосельхозмашиностроении: монография А.Н. Панов, И.И. Осмола, И.В. Шкадрецов, В.Б. Ловкис, Л.А. Маринич; под общ.ред. А.Н. Панов. - Минск: БГПА, 2009.482 с., ил.
11. В.В. Алексеев, С.И. Гавриленко, А.Н. Панов, В.Е. Столяров. Математические модели и методики обеспечения приемлемых рисков информационно-измерительных и управляющих систем транзитных газопроводов. СПб: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 160 с.
12. Панов А.Н., Ромашова Е.Ю. Основы методологии риск-ориентированного проектирования в машиностроении/ Машиностроение и инженерное образование. М. 2024 г. №1-2, с 8-16.
13. Панов А.Н., Ерофеев М.Н., Ромашова Е.Ю. Риск-ориентированное проектирование процессов ремонта, восстановления и модернизации объектов машиностроения/ Ремонт. Восстановление. Модернизация. М., 2024 г., №10, с. 21-34.
14. Панов А.Н., Ромашова Е.Ю. Дуализм управления рисками технических систем. применение средств повышения производительности интеллектуальной деятельности/ 8-я Международная научная конференция «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (FRITME-2024).
15. Панов А.Н., Ромашова Е.Ю., Складкова М.С. К вопросу о рисках применения цифровых моделей в машиноведении/ 8-я Международная научная конференция «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении» (FRITME-2024).

МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В МАШИНОВЕДЕНИИ. ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ ДЛЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

Панов А.Н.¹, Махутов Н.А.², Ромашова Е.Ю.², Ерофеев М.Н.², Гиршфельд П.А.²

¹ЮРС-РУСЬ, Санкт-Петербург, Россия; a.panov@tut.by

²Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; romashova@imash.ru

Развитие машиноведения сосредоточено, интенсивно развивается в областях применения риск-ориентированного подхода с одной стороны, с другой – использования узлов трения – процессы трибологии и триботехники. Последние с позиций риск-ориентированного подхода исследовано не достаточно. Управление по рискам позволяет повысить оптимальное соотношения «качество-цена-риски» для обеспечения конкурентноспособности продукции машиностроения и снизить сроки постановки продукции на производство. В докладе рассматривается проблема, развитие методологии, моделей и методов обоснования приемлемости конструкторско-технологических рисков узлов трения для обеспечения приемлемых рисков соответствия требованиям.

Отдельными отраслями знаний машиноведения следует выделить такие области, как трение, износ, смазки, свойства контактирующих поверхностей, моделирование процессов контакта [1, 2], физические и химические процессы в смазочных материалах и технологии смазывания [3], методы расчета и испытаний антифрикционных, фрикционных устройств, триботехнических материалов и узлов трения [4]. Следует отметить наличие огромного количества не соответствующих требованиям и ожиданиям сложных систем кинематических, гидравлических, электрических приводов, тормозных механизмов и т.д., в которых необходимо управлять узлами трения [5, 6].

Развитие машиноведения и машиностроения, в настоящее время, для конструктивных решений в которых имеются узлы трения в самом широком понимании и применении [1-6], на наш взгляд, следует направлять в указанные ниже области.

Особой проблемой является обеспечение соответствия требованиям функционирования узлов трения в жизненном цикле техники и технологий (рис. 1, 2), в том числе в экстремальных условиях эксплуатации, также процессов оперативного восстановления работоспособности в случае мгновенных отказов, прерывания обслуживания и обеспечения эксплуатационными материалами техники и технологиями в процессе изменения политико-экономических и военно-политических ситуаций [5-14].

Вторым направлением развития машиноведения и машиностроения следует назвать развитие критичности оценочных категорий по предназначению при контроле и испытаниях [7]. Для оптимизации затрат на создание техники по критериям «качество-цена-риски» (обобщенное ISO 9000 определение термина «риск – воздействие неопределенности») в настоящее время на основе детерминированного, допускового, статистического и вероятностного (прогнозирование надежности) и т.д. [6] подходов все более широко и интенсивно применяется риск-ориентированный подход как в фундаментальных работах (например, «Безопасность России») [8], так и в отраслевых исследованиях и разработках [9-13]. Наибольшее

распространение получают применение методик, основанных на управлении рисками, используемых в отраслях, в которых ущербы значительные либо чрезмерные.

Третьим направлением можно выделить нормирование технических требований, отражающих весь спектр нагруженности узлов трения, в том числе со множеством зон повреждений и различными механизмами повреждений в технических регламентах и нормативных документах (ТР, ГОСТ и тп.).



Рис. 1. Пример видов разрушения и износа элементов тормозного диска



Рис. 2. Пример видов разрушения и износа тормозных колодок

Целью работы является проведение исследований, развитие и применение методологии, моделей и методик обоснования приемлемости конструкторско-технологических рисков объектов машиностроения с узлами трения на основе использования физических, математических моделей, численных методов.

Задачи исследования:

1. Развить применение математического моделирования риск-ориентированного подхода при разработке технических регламентов и технических нормативно-правовых актов (ТР, ГОСТ и т.п.) для обоснования нормируемых показателей при достижении приемлемых рисков соответствия элементов машин с узлами трения.

2. Обосновать управление конструкторско-технологическими рисками для зон зарождения повреждения узлов трения - источников отказов техники с гармонизированным использованием физических моделей для экстремальных условий эксплуатации на этапе разработки типа конструкции объектов машиностроения.

3. Обосновать управление конструкторско-технологическими рисками, участвующих в процессах средств производства, измерения и т.д., при создании объектов машиностроения с узлами трения на этапе проектирования процессов изготовления, с гармонизированным использованием физических и математических, электронных и цифровых моделей.

4. Идентифицировать перспективные направления исследований и расширить использование на практике полученных результатов.

Методы, средства проведения исследований и разработок.

Исследования, измерение нагруженности, испытания материалов, конструкций; циклические испытания в рамках иерархических моделей

конструкций; тензометрия; расчеты методом конечных элементов; статистическая оценка и вероятностное прогнозирование циклической долговечности; функциональные испытания элементов машин; полигонные и дорожные испытания; методики планирования приемлемости и анализа рисков продукции и процессов; логико-вероятностное моделирование, технологические процессы изготовления и т.д.. Разработаны методы и средства для изменения нагруженности и моделирования функциональных и ресурсных испытаний элементов и конструкций мобильных машин.

Результаты исследований, разработок для машиноведения и применения в практике машиностроения.

Развиты и получили применение на практике методологии, модели и методики обоснования приемлемости конструкторско-технологических рисков объектов машиностроения с узлами трения:

1. Развита применение математического моделирования риск-ориентированного подхода при разработке технических регламентов и технических нормативно-правовых актов (ТР, ГОСТ и т.п.) для обоснования нормируемых показателей при достижении приемлемых интегральных рисков соответствия для типа продукции и процессов тиражирования, имеющих узлы трения. Разработана и широко используется серия государственных и межгосударственных стандартов на методики применения подхода основанного на рисках при проектировании, производстве (СТБ 16943, СТБ 1506 и т.д.), а также на технические требования для наиболее критичных элементов мобильных машин, например, тормозные механизм, рулевой привод, элементы подвески и т.д. (ТР ТС 018-2011, ГОСТ 30729, ГОСТ 30731, ГОСТ 31341 и др.) [8 -10] .

2. Разработаны и применены модели и методы на этапе разработки типа конструкции объектов машиностроения, имеющих узлы трения. Обосновано и применено управление конструкторско-технологическими рисками для зон зарождения повреждения - источников отказов конструкций (на примере мобильных машин). Указанное позволило сократить сроки и затраты на оценку по результатам физических испытаний и оценивать, и прогнозировать ресурс при варьировании конструкторско-технологических факторов на основе расчетно-экспериментальных методов для достижения приемлемых рисков соответствия.

3. Обосновано управление конструкторско-технологическими рисками, участвующих в процессах создания, объектов машиностроения средств производства, измерения и т.д. на этапе проектирования процессов изготовления узлов трения. Указанное позволило сократить сроки и затраты на оценку по результатам физических контроля и испытаний и прогнозировать риски

событий, вариаций и бифуркаций конструкторско-технологических факторов для достижения приемлемых рисков соответствия процессов тиражирования.

4. Идентифицированы направления исследований и расширено использование управления и анализа рисков узлов трения для практики (расширение видов моделирования на основе риск-ориентированного подхода, уточнение критериев и т.д.).

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0024

1. Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин: Справочник. - М.: Машиностроение, 1984. - 280 с., ил.
2. Справочник по триботехнике/ Под общ. Ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. В 3 т. Т.1. Теоретические основы. - М.: Машиностроение, 1989. - 400 с.: ил.
3. Справочник по триботехнике: В 3 т. Т.2. Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения// Под общ. Ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 1990. - 416 с.: ил.
4. Справочник по триботехнике: В 3 т. Т. 3. Триботехника антифрикционных, фрикционных, и сцепных устройств. Методы и средстатриботехнических испытаний /Под общ. Ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 1992. – 730 с.: ил.
5. Васильченко В.А. Гидравлическое оборудование мобильных машин: Справочник – М.: Машиностроение, 1983. – 301 с. , ил.
6. Прогнозирование надежности тракторов / В.Я. Анилович, А.С. Гринченко, В.Л. Литвиненко, И.Ш. Чернявский? Под общ. Ред. В.Я. Аниловича - М.: Машиностроение, 1986-224 с., ил.
7. Технологические методы и средства контроля в самолетостроении. Под ред. канд.техн. наук И.М. Дунаева. М., Машиностроение, 1973, стр.148.
8. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная, технологическая и техносферная безопасность / Под общ. ред. Н.А. Махутова. Москва: Знание, 2018. 1016 с.
9. Горбачевич, М.И. Проектирование транспортных средств: нагруженность, повреждение, ресурс: Монография/ М.И. Горбачевич, А.Н. Панов, С.М. Минюкович; Под общ.ред. А.Н. Панова. – Мн. Технопринт, 2005.-264 с.: ил
10. Анализ риска и повышение безопасности водо-водяных энергетических реакторов/ Н.А. Махутов, К.В. Фролов, Ю.Г. Драгунов и др.; под ред. Н.А. Махутова и М.М. Гаденина; Ин-т машиноведения им. А.А. Благонравова РАН. – М.: Наука, 2009. - 499 с.
11. Панов, А.Н. Научно-методические основы проектирования: системное обеспечение приемлемых рисков в автотракторосельхозмашиностроении: монография А.Н. Панов, И.И. Осмола, И.В. Шкадрцов, В.Б. Ловкис, Л.А. Маринич; под общ.ред. А.Н. Панов. – Минск: БГЦА, 2009.482 с. ил.
12. В.В. Алексеев, С.И. Гавриленко, А.Н. Панов, В.Е. Столяров. Математические модели и методики обеспечения приемлемых рисков информационно-измерительных и управляющих систем транзитных газопроводов. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 160 с.
13. Панов А.Н., Ерофеев М.Н., Ромашова Е.Ю. Риск-ориентированное проектирование процессов ремонта, восстановления и модернизации объектов машиностроения/ Ремонт. Восстановление. Модернизация. М., 2024 г., №10, с. 21-34.
14. Панов А.Н., Ромашова Е.Ю. Автоматизация риск-ориентированного проектирования техники // Международная конференция «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения»: сборник тезисов докладов конференции, посвященной 85-летию Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН – 2023. – С.225.

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ УЗЛОВ ПОСЕВНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ МЕТОДА НАЗНАЧЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ РЕМОНТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Пастухов А.Г.¹, Тимашов Е.П.¹, Вольвак С.Ф.¹, Бахарев Д.Н.², Волков М. И.¹,
Вергун В.И.¹

¹ Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина, Белгород, Россия;

pastukhov_ag@mail.ru

² Луганский государственный университет имени Владимира Даля, Луганск, Россия

Технология предназначена для решения научно-прикладной задачи обеспечения работоспособности дисковых сошников посевных машин с целью повышения урожайности и валового сбора зерновых культур за счет обеспечения постоянства глубины заделки семян при посеве. Научную новизну и практическую значимость технологии обуславливает реализация метода назначения дифференцированных ремонтных воздействий в зависимости от действительного технического состояния дисков сошников, определяемого диаметральной износом.

Введение

В Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации отмечается, в частности, что на вызов в обеспечении продовольственной безопасности и независимости страны необходимо развивать факторы ответа в научно-технической деятельности, связанные с повышением квалификации исследователей, разработкой инновационных технических систем и технологических процессов.

Применительно к конструкции узлов и агрегатов сельскохозяйственных машин отмечается наличие значительного количества одинаковых рабочих органов, при этом в процессе технического обслуживания и ремонта указывается на их различное техническое состояние, определяемое износом [1, 2].

Цель - решение научно-прикладной задачи разработки инновационной технологии обеспечения работоспособности на основе метода назначения дифференцированных ремонтных воздействий по параметрам износа дисковых сошников посевных машин.

Материалы и методы исследований

Порядок исследований включает следующие этапы: 1) анализ износа дисков, снятых с эксплуатации; 2) разработка схемы назначения ремонтных воздействий; 3) обоснование и разработка оригинальных способов восстановления дисков; 4) экспериментальная отработка технологических процессов ремонта и оценка их эффективности по результатам испытаний; 5) формирование технологии; 6) апробация и внедрение.

Анализ износа, снятых с эксплуатации дисков, выполняли после предварительного осмотра и фиксации дефектов, диски размечены по схеме «лепесток» на восемь зон через 45°, применяли микрометрирование штангенциркулем. Массив данных по замерам 96 дисков подвергали статистической обработке. На основании полученных данных сформировали ремонтные группы дисков по диапазону износа и предложили

виды воздействий. Для реализации ремонтных воздействий разработаны и прошли экспериментальную отработку технологические процессы и технические средства: электромеханического упрочнения рабочих кромок, приварки ремонтной детали, стендовых лабораторных ускоренных сравнительных испытаний на износ. По результатам экспериментальных исследований сформирована технология обеспечения работоспособности дисков сошников, проведена технико-экономическая оценка.

Результаты и обсуждение

Анализ научных работ и изучение нормативно-технической документации по дискам сошников сеялок СЗ-3,6 и СЗТ-3,6А показывает, что номинальный диаметр диска по рабочему чертежу составляет 350 мм, поэтому с учетом имеющихся данных по износу разделим анализируемый ряд дисков на размерные группы по признакам работоспособности [2-4]. Снятые с эксплуатации диски имеют следующие диапазоны изменения размеров (в порядке убывания диаметра дисков): 1) группа с диаметром от 350 до 340 мм (износ 0...10,0 мм), при данном износе лезвия качество выполнения агротехнических требований при посеве зерновых культур остается на необходимом 90 % уровне; 2) группа с диаметром от 340 до 334 мм (износ 10,0...16,0 мм), при данном диаметре глубина заделки семян составляет 60 % от требуемой нормы; 3) группа с диаметром от 334 до 326 мм (износ 16,0...24,0 мм), где минимальный диаметр принимается в качестве предельно допустимого.

Основываясь на выделенных по износу группах дисков, определяем процентную долю дисков, относящихся к следующим ремонтным группам: 1) первая группа – износ 0...10,0 мм имеют 10 % т.е. 9 дисков из ряда; 2) вторая группа – износ 10,0...24,0 мм имеют 37,6 % т.е. 37 дисков из ряда; 3) третья группа – износ более 24,0 мм имеют 52,4 % т.е. 50 дисков из ряда. Следовательно, группа дисков с износом более 24 мм составляет

наибольшую долю, для которых необходимо применять выбраковку или разрабатывать специальный технологический процесс восстановления с целью продолжения эксплуатации.

В процессе анализа видов, причин и проявлений дефектов дисков сошников проведена оценка механических свойств 10 дисков из 96, снятых с эксплуатации, отобранных по признакам сочетания разнообразных дефектов [4]. Получены достоверные и воспроизводимые данные по твердости с характеристикой описательной статистики, в частности коэффициент вариации равен - 0,198, что свидетельствует о приближении опытного распределения к теоретическому закону нормального распределения. Анализ опытных данных показывает, что рассеивание среднего значения твердости составляет порядка 60 %, размах значений в пределах 100 % от уровня максимальной твердости в пределах одного диска. В качестве причин такой неравномерности механических свойств могут быть низкое качество исходного материала (стали 65Г, 30MnB5 и др.), технологические дефекты термической обработки и последствия реальных условий эксплуатации.

С целью разработки мероприятий по обеспечению работоспособности дисковых сошников сеялок СЗ-3,6А и СЗТ-3,6А, на основании выделенных выше ремонтных групп, составим схему назначения ремонтных воздействий (РВ) в соответствии с наличием вторичных дефектов (ВД) и производственного брака (ПБ) по схеме технологического процесса восстановления дисков (рис. 1).

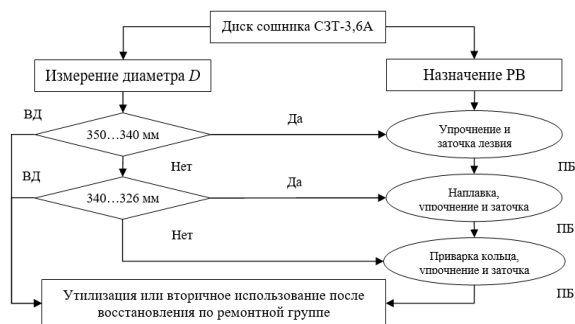
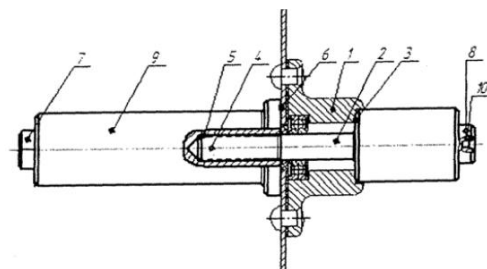


Рис. 1. Схема назначения ремонтных воздействий

При исследовании технологического процесса электромеханического упрочнения дисков разработаны приспособление для установки дисковых рабочих органов при упрочнении (рис. 2) и способ упрочнения режущей кромки диска сошника (рис. 3) [5].



- 1 – ступица диска; 2 – посадочная поверхность правой оправки; 3 – прижимная поверхность правой оправки; 4 – резьбовой стержень правой оправки; 5 – резьбовое отверстие левой оправки; 6 – торцевая поверхность ступицы диска; 7, 8 – шестигранные головки под ключ; 9 – левая оправка с цилиндрической поверхностью; 10 – центрирующее отверстие; (диск не обозначен)

Рис. 2. Приспособление по RU 2697909

Отработку электромеханического упрочнения проводили по плану полного двухфакторного трехуровневого эксперимента по влиянию на механические свойства дисков силы тока на обрабатывающем ролике и усилия прижатия ролика к детали с оценкой эффективности упрочнения по твердости поверхности [6, 7]. По результатам обработки данных получили регрессионное уравнение в виде полинома второй степени с достоверными коэффициентами по критерию Стьюдента и достаточной адекватностью по критерию Фишера при 95 % вероятности.

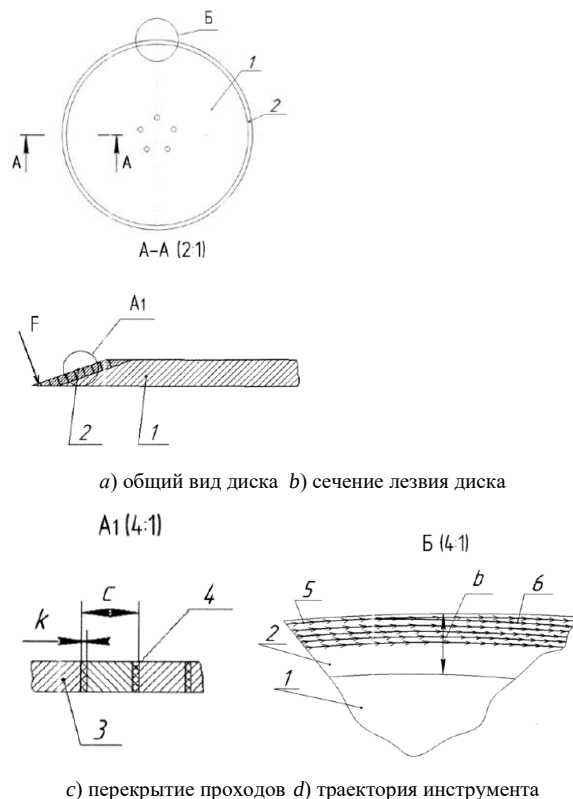


Рис. 3. Способ упрочнения по RU 2728198

На основании аналитического решения уравнения получены оптимальные режимы

электрохимического упрочнения при критериальном условии максимума твердости, которые с учетом конструктивных и технологических особенностей дисков составили: сила тока $I_{\text{ЭМУ}}=1150\pm 50$ А, усилие $F_{\text{ЭМУ}}=250\pm 50$ Н.

Для исследования технологического процесса восстановления дисков приваркой ремонтной детали разработано приспособление (рис. 4).

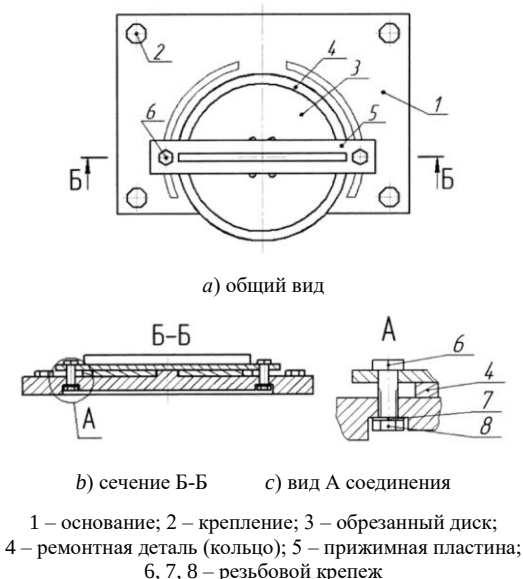


Рис. 4. Приспособление по RU 177811

При экспериментальной отработке разработан технологический процесс: формирование базы ремонтных деталей (кольца, полукольца, сегменты, полосовые обрезки из стали 65Г), подготовка изношенных дисков путем обрезки и шлифовки до постоянного диаметра (токарная обработка, плазменная резка), приварка подготовленных ремонтных деталей на приспособлении (сварка – ручная дуговая, электрод УОНИ-13/45), обработка сварного шва (зачистка, удаление окалины и снятие шлака), контроль твердости (шов, основной материал), заточка дисков (угол – 20° , размер фаски – 7...8 мм), окраска.

Для сравнительной оценки дисков на износостойкость разработан стенд (рис. 5) и методика ускоренных испытаний [8]. На оси стенда устанавливаются исследуемые диски – серийный и опытный, расположенные в неподвижной емкости с абразивной смесью и погруженные в нее на глубину обработки. Условия испытаний: абразивная смесь – 80 % чернозема типичного и 20 % песка, частота вращения – 920 мин^{-1} , время испытания – 82,2 ч, глубина погружения – 80 мм, временной промежуток контроля параметров – 2,3 ч.

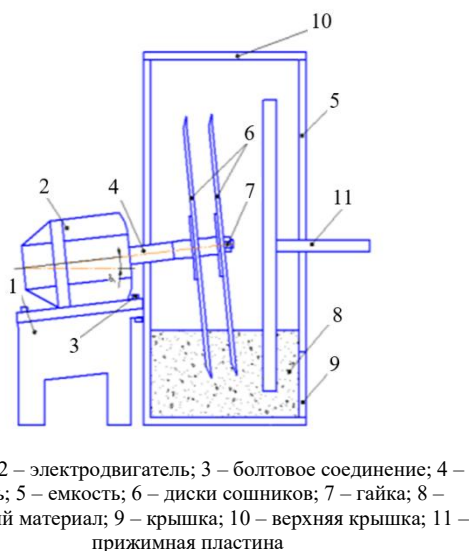


Рис. 5. Общий вид испытательного стенда

В процессе исследований проведен сравнительный контроль износа трех групп серийных (СД) и опытных дисков в виде серийных упрочненных (СУД), снятых с эксплуатации упрочненных (ЭУД) и восстановленных приваркой упрочненные (ВУД). Контроль осуществляли по геометрическим параметрам и механическим свойствам дисков: внешний диаметр, толщина, длина фаски режущей кромки, угол заточки режущей кромки, твердость поверхности. Результаты испытаний оценивались по изменению упомянутых параметров в виде износа дисков и снижения твердости рабочей поверхности в зависимости от времени испытаний, эквивалентного наработке в эксплуатации 650 га.

В качестве примера представлена графическая интерпретация результатов износа по внешнему диаметру для сравниваемых групп дисков (рис. 6).

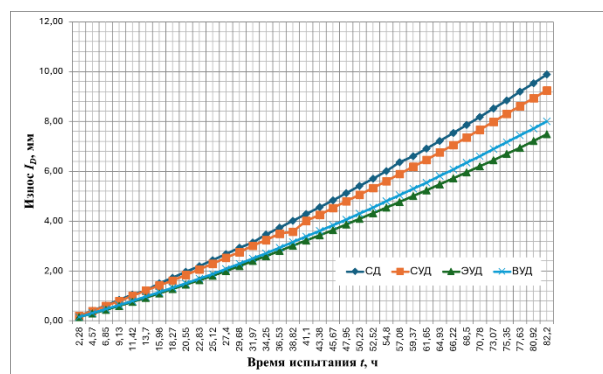


Рис. 6. Результаты испытаний дисков по износу внешнего диаметра D для сравниваемых групп

Выводы

Анализ сопоставительных результатов показывает: 1) твердость поверхности опытных дисков ЭУД и ВУД после испытаний в сравнении серийными дисками сохранилась выше на 31–43 %; 2) повышение долговечности по износу

сравниваемых групп опытных дисков по отношению к серийным составляет по внешнему диаметру в 1,07–1,31 раза, по толщине в 1,12–1,52 раза, по длине фаски режущей кромки в 1,02–1,36 раза, по углу заточки лезвия в 1,14–1,32 раза; приращение наработки дисков сошников в эксплуатации по результатам увеличения износостойкости может составить в среднем 46–204 га, а предварительная технико-экономическая оценка применения опытных дисков показывает снижение удельных эксплуатационных затрат на 5–39 %.

1. Черноиванов В.И., Лялякин В.П., Голубев И.Г. Организация и технология восстановления деталей машин: науч. издание. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2016. 568 с.
2. Супонев И.А., Ерохин М.Н. Физико-механические свойства почв и их воздействие на рабочие органы почвообрабатывающих машин // Чтения академика В.Н. Болтинского : сборник статей, Москва, 22–23 января 2025 года. Москва: ООО «Сам Полиграфист», 2025. С. 304–309.
3. Оценка износа рабочей поверхности плунжера гомогенизатора молока / А.Г. Пастухов, О.А. Шарая, И.Ш. Бережная, Е.М. Жуков // Труды ГОСНИТИ. 2016. Т. 124. №1. С. 130–137.
4. Пастухов А.Г., Кравченко И.Н., Волков М.И. Исследование износа дисковых сошников сеялки СЗТ-3,6А // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2019. № 3(23). С. 55–68.
5. Пастухов А.Г., Волков М.И. Разработка приспособления для закрепления диска сошника в токарном станке при упрочнении // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина". 2019. № 1(89). С. 49–54.
6. Пастухов А.Г., Шарая О.А., Бережная И.Ш. Экспериментальные исследования режимов электромеханического упрочнения детали типа "плунжер" // Труды ГОСНИТИ. 2017. Т. 129. С. 148–157.
7. Пастухов А.Г., Шарая О.А., Волков М.И. Экспериментальная отработка технологического процесса электромеханического упрочнения деталей из стали 65Г // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2021. № 2(30). С. 78–89.
8. Волков М.И. Методика испытаний на износ дисков сошников и результаты её отработки // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2024. № 3(43). С. 5–12.

К ПОВРЕЖДЕНИЮ КОНТАКТИРУЮЩИХ ДЕТАЛЕЙ СОВРЕМЕННЫХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ ВСЛЕДСТВИЕ КОНТАКТНОГО ИЗНАШИВАНИЯ И МАЛО/МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Петрова И.М., Буяновский И.А., Самусенко В.Д.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
им. А.А. Благоднарова Российской академии наук, Москва, Россия; impetr@mail.ru

В докладе кратко рассмотрено влияние рассеяния параметров определяющих накопление повреждений при упругом, упругопластическом динамическом нагружении и износе на функцию распределения долговечности (ресурса) элементов технических систем. Показана оценка отдельного влияния каждого параметра.

Дальнейшее развитие машин и механизмов характеризуется ростом требований к их техническим характеристикам с одновременным усложнением условий их эксплуатации [1, 2]. Значительный парк изделий машиностроения работает при динамическом нагружении, когда идёт износ и усталостное повреждение, что в значительной степени определяет их работоспособность и надёжность. В таких случаях накопленные повреждения могут быть оценены по выражению [1, 2].

$$D = \int_i^{N_f} \frac{dN}{N_{fi}} + \int_0^{\varepsilon_f} \frac{de}{e_f} + \int_0^L \frac{I_h dl}{H},$$

где $\int_i^{N_f} \frac{dN}{N_{fi}}$ – повреждение, накопленное при упругом динамическом нагружении;

$\int_0^{\varepsilon_f} \frac{de}{e_f}$ – повреждение, накопленное при упруго пластичном динамическом нагружении;

$\int_0^L \frac{I_h dl}{H}$ – повреждение, накопленное при трении.

При этом предполагается, что величины, входящие в данную формулу в общем случае, являются случайными величинами, подчиняющимися нормальному закону распределения. Их случайный характер зависит от рассеяния параметров, входящих в каждую из этих величин. Так, для износа $\int_0^L \frac{I_h dl}{H}$, эта величина зависит от пути трения, нагрузки, температуры, триботехнических свойств материалов, режима трения, наличия и типа смазки, температуры и т.д. Для динамического нагружения накопленные повреждения $\int_i^{N_f} \frac{dN}{N_{fi}}$ характеризуются функцией распределения долговечности, зависящей от параметров кривой усталости и параметров процесса нагружения.

Определение функции распределения долговечности рекомендуется использовать скорректированную линейную гипотезу $N_{\text{сум}} = \frac{a_p \sigma_{-1d}^m N_0}{\varepsilon^m \sum \sigma_{ait}^m}$, где a_p – расчетная сумма относительных долговечностей, определяется по ГОСТ 25.504, σ_{-1d} – предел выносливости, m – показатель наклона кривой усталости, N_0 – точка перегиба кривой усталости, ε – параметр, характеризующий

рассеяние процесса нагружения при реализации случайных процессов.

В общем случае все перечисленные параметры являются нормально распределенными случайными величинами. Тогда для их случайных значений σ_{-1d} ; $\lg N_0$; m ; ε можно записать: $\sigma_{-1d} = \overline{\sigma_{-1d}} + U_P S_{\sigma_{-1d}}$; $\lg N_0 = \overline{\lg N_0} + U_P S_{\lg N_0}$; $m = \overline{m} + U_P S_m$; $\varepsilon = \overline{\varepsilon} + U_P S_\varepsilon$; где величины $\overline{\sigma_{-1d}}$; $\overline{\lg N_0}$; $\overline{m}$; $\overline{\varepsilon}$ соответствуют их средним значениям, S – среднее квадратическое отклонение, указанных величин, U_P – квантиль нормального распределения, соответствующий вероятности P . Используя полученные случайные значения методом статистических испытаний Монте-Карло можно рассчитать функцию распределения долговечностей и оценить влияние различных факторов на ее рассеяние. Для примера на рис. 1 показана функция распределения долговечностей предохранительного шпинделя прошивного стана, линия 1 определена методом Монте-Карло, линия 2 расчет по скорректированной линейной гипотезе.

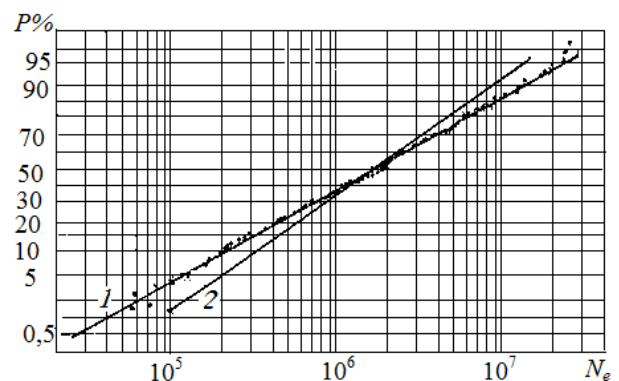


Рис.1. Функция распределения долговечности предохранительного шпинделя прошивного стана

Рис. 2 позволяет увидеть меру влияния различных факторов на рассеяние долговечности, где линия 1 – учитывается рассеяние всех параметров на накопление повреждений, линии 2; 3 – не учитывается рассеяние точки перелома и показателя наклона кривой усталости соответственно, 4; 5 – не учитывается рассеяние параметров нагружения и предела выносливости.

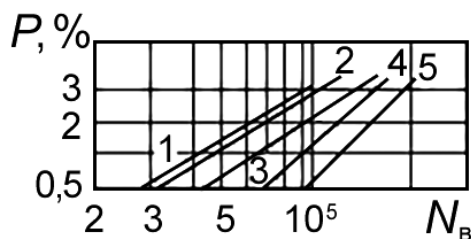


Рис. 2. Оценка степени влияния параметров, определяющих накопление повреждений при динамическом нагружении

Аналогично можно оценить влияние параметров износа на рассеяние долговечности. В общем случае интенсивность износа в соответствии с [1, 2], зависит от скорости перемещения в зоне контакта v , нагрузки P , параметров шероховатости R_a и твердости поверхности H . Случайные вариации перечисленных параметров приводят к вариациям значения накопленного износа по параметру долговечности. В ИМАШ под руководством Смирнова Н.И. проведено исследование влияния перечисленных факторов на коэффициент трения и интенсивность изнашивания. Анализ полученных данных позволяет оценить их рассеяние, которое позволит оценить рассеяние износа, особенно в области малых вероятностей отказа. В среднем суммарное значение рассеяния интенсивности изнашивания соответствует коэффициенту вариации равному 0,1. Тогда применяя метод Монте-Карло, можно построить функцию распределения предельной интенсивности изнашивания, показанную на рис. 3.

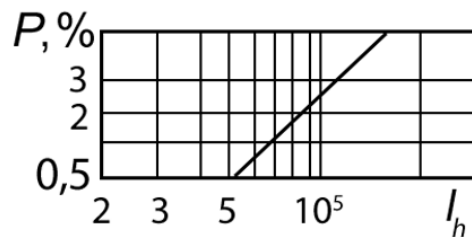


Рис. 3. Оценка степени влияния параметров, определяющих предельный износ при динамическом нагружении

Заключение

При динамическом нагружении в зоне фрикционного контакта элементов трибосопряжений накопление повреждений реализуется по типу много и малоциклового усталости. Применение метода Монте-Карло позволяет оценить влияние различных факторов: конструкционных, технологических, эксплуатационных на рассеяние долговечности, что особенно важно для оценки гарантийного ресурса и временных промежутков между регламентными работами.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0021_KM-2-13.

1. Petrova I.M. et al. Estimation of the ultimate strength of machine parts on the basis of linear hypothesis of fatigue and wear damages //International Journal of Applied Mechanics and Engineering. – 2002. – Т. 7. – С. 415-417.
2. Петрова И.М. и др. Структурные и функциональные закономерности накопления повреждений и разрушения металлов при динамическом нагружении и износе //Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2023. – Т. 89. – №. 10. – С. 74-82.

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Печейкина М.А.¹, Раков Д.Л.², Сухоруков Р.Ю.²

¹Московский энергетический институт (Национальный исследовательский университет), Москва, Россия

²Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; rdl@mail.ru

Современные промышленность характеризуется растущими требованиями к энергоэффективности, точности управления технологическими процессами. В этом контексте силовая электроника становится ключевым элементом систем автоматизации, обеспечивающим гибкое преобразование электрической энергии и точное регулирование режимов работы исполнительных механизмов. В работе проводится анализ современных подходов к управлению технологическими процессами с применением средств силовой электроники. Также при помощи морфологического анализа осуществляется систематизация знаний о современных средствах силовой электроники для управления технологическими процессами и оценка их эффективности.

Современные технологические процессы (ТП) все чаще базируются на применении силовой электроники, которая играет важнейшую роль в развитии машиностроения. Устройства силовой электроники, такие как преобразователи частоты, инверторы и импульсные источники питания, позволяют осуществлять точное управление электродвигателями, регулировать скорость и момент с высочайшей эффективностью. Это открывает широкие возможности для автоматизации производственных линий, создания роботизированных комплексов и гибких производственных систем. Благодаря силовой электронике становится возможным значительное снижение энергопотребления оборудования, повышение его быстродействия и надежности. Таким образом, силовая электроника является не просто элементом схемы, а фундаментом для создания инновационных и конкурентоспособных машин и механизмов.

Силовые полупроводниковые приборы (СПП) транзисторы, такие как IGBT (биполярные транзисторы с изолированным затвором) и MOSFET (полевые транзисторы с металло-оксидным полупроводником), отличаются высокой скоростью переключения и возможностью работы на повышенных частотах. IGBT сочетают в себе преимущества биполярных транзисторов и полевых транзисторов, что делает их идеальными для применения в инверторах, частотных преобразователях и системах управления электродвигателями. MOSFET, в свою очередь, особенно эффективны в высокочастотных преобразователях и импульсных источниках питания благодаря низкому сопротивлению в открытом состоянии и высокой скорости переключения.

СПП находят применение практически во всех областях современной промышленности и электротехники, например промышленная автоматизация, транспортные системы, возобновляемая энергетика, бытовая техника и др. [1,2]. Распространенными являются тиристоры, силовые транзисторы и силовые диоды [3].

В промышленности они используются в

частотных преобразователях для управления асинхронными двигателями, что позволяет значительно снизить энергопотребление и повысить точность управления ТП. В системах электроснабжения силовые полупроводниковые приборы применяются в устройствах компенсации реактивной мощности, статических компенсаторах и системах бесперебойного питания.

Развитие силовых полупроводниковых приборов идет по нескольким основным направлениям. Одним из наиболее перспективных является использование новых материалов, таких как карбид кремния (SiC) и нитрид галлия (GaN). СПП на основе этих материалов обладают значительно лучшими характеристиками по сравнению с традиционными кремниевыми устройствами. Они способны работать при более высоких температурах, имеют меньшие потери при переключении и могут функционировать на более высоких частотах.

Еще одним важным направлением развития является повышение степени интеграции СПП. Создание интеллектуальных силовых модулей, объединяющих в одном корпусе силовые ключи, драйверы управления и системы защиты, позволяет значительно упростить проектирование электронных устройств и повысить их надежность. Особое внимание уделяется разработке приборов с повышенной устойчивостью к внешним воздействиям и способных работать в экстремальных условиях. Одним из ключевых элементов электрических систем являются инверторы напряжений, преобразующие постоянный ток в переменный с регулируемыми параметрами. Основой инверторов служат СПП, от выбора которых зависят КПД, массогабаритные показатели, стоимость и надежность всей системы. Инверторы напряжений стали неотъемлемой частью современных производственных линий в машиностроении. Эти устройства выполняют критически важную функцию преобразования постоянного напряжения в переменное с регулируемыми параметрами, что позволяет:

- Обеспечивать плавный пуск и точное регулирование скорости электродвигателей

- Реализовывать сложные алгоритмы управления позиционированием
- Оптимизировать энергопотребление технологического оборудования
- Повышать надежность и долговечность электромеханических систем

Особенностью применения инверторов в машиностроении являются жесткие требования к динамическим характеристикам, точности поддержания параметров и устойчивости к перегрузкам. Это обусловлено спецификой ТП, таких как обработка металлов резанием, штамповка, литье под давлением, где электроприводы подвергаются значительным переменным нагрузкам. СПП можно разделить на несколько основных категорий, каждая из которых обладает следующими основными свойствами:

А. Биполярные устройства

- IGBT (Биполярный транзистор с изолированным затвором) – наиболее распространенный прибор в силовой электронике, сочетающий высокое напряжение и низкие потери проводимости.
- BJT (Биполярные транзисторы) – устаревающая технология из-за высоких потерь управления.
- Тиристоры (SCR, GTO, IGCT) – применяются в высоковольтных и силовых системах, но обладают низкой частотой переключения.

В. Униполярные приборы

- MOSFET (Полевые транзисторы) – отличаются высокой скоростью переключения, но ограничены по напряжению и току.
- Широкозонные приборы (SiC MOSFET, GaN HEMT) – обеспечивают меньшие потери и работу на высоких частотах.

С. Гибридные и модульные решения

- IPM (Интеллектуальные силовые модули) – включают драйверы и защиту.
- SiC-гибриды (IGBT + SiC-диод) – улучшенные динамические характеристики.

В таблице 1 дан сравнительный анализ технологических решений (ТР).

Таблица 1. Сравнительный анализ ТР

Параметр	Si IGBT	Si MOSFET	SiC MOSFET	GaN HEMT
Макс. напряжение	6.5 кВ	900 В	1.7 кВ	650 В
Макс. ток	1–5 кА	100–500 А	200–800 А	50–200 А
Частота переключени	50 кГц	500 кГц	1 МГц	10 МГц
Потери проводимост	Низкие	Высокие	Очень низкие	Низкие
Потери переключени	Высокие	Низкие	Очень низкие	Минимальные
Стоимость	Низкая	Средняя	Высокая	Очень высокая

Для классификации СПП возможно использовать морфологический анализ (МА),

базирующийся на построении морфологических матриц (ММ). МА, разработанный Ф. Цвикки, представляет собой систематический метод анализа сложных систем через построение ММ (Рис.1) [4,5].

		Элементы			
		P^1	P^2	P^3	P^4
Признаки	P_1	P_1^1	P_1^2	P_1^3	P_1^4
	P_2	P_2^1	P_2^2	P_2^3	
	P_3	P_3^1	P_3^2	P_3^3	P_3^4
	P_4	P_4^1	P_4^2		
	P_5	P_5^1	P_5^2	P_5^3	P_5^4

Рис. 1. Морфологическая матрица (экранная форма).

Суть метода заключается в системном разложении сложной проблемы на составляющие элементы с последующим комбинированием различных вариантов этих элементов для получения принципиально новых решений. МА особенно полезен на ранних стадиях проектирования, когда необходимо рассмотреть максимально широкий спектр возможных вариантов реализации технической системы. Его суть заключается в разложении объекта исследования на базовые параметры (морфологические признаки) и последующем комбинировании возможных вариантов каждого из них для генерации новых конфигураций. Основные этапы МА:

- Определение проблемы – формулировка задачи, требующей решения.
- Выделение ключевых атрибутов – разбиение системы на основные компоненты.
- Генерация альтернатив – составление списка возможных вариантов для каждого параметра.
- Построение ММ – комбинаторика вариантов для поиска новых решений.
- Оценка и отбор перспективных комбинаций – анализ технической реализуемости, экономической целесообразности и эффективности.

Методы МА используются в целом ряде инженерных областей. Также подход использовался на стадии технического предложения [6, 7], а также при исследованиях различных процессов – аддитивных технологий [8] и различных ТП [9-11]. В одном из исследований МА был использован для структурно-параметрического синтеза схем интегральных усилителей [12]. Применительно к теме метод МА позволяет:

- Структурировать все возможные варианты ТР
- Выявить неочевидные комбинации элементов
- Систематизировать выбор оптимальных ТР

- Способствовать инновационным разработкам

Для анализа и классификации рассматриваемых ТП синтезирована ММ, включающая тысячи потенциальных технических решений (рис.2). В качестве признаков можно выбрать следующие:

- Силовой ключ
- Сигнал управления
- Потери проводимости
- Потери переключения
- Демпферные цепочки
- Конструкция корпуса
- Максимальное напряжение, кВ
- Максимальный ток, кА
- Ток цепи управления, А
- Рабочая частота, кГц

Проведенный анализ подтвердил высокую эффективность применения СПП для управления технологическими процессами в различных отраслях промышленности. Внедрение ТР позволяет достичь значительного снижения энергопотребления, одновременно повышая точность поддержания технологических параметров и надежность оборудования. Перспективы дальнейшего развития связаны с внедрением широкозонных полупроводниковых материалов, многоуровневых топологий преобразователей, а также современных методов математического моделирования и оптимизации. Комплексный подход к проектированию силовых электронных систем, учитывающий взаимовлияние всех элементов, позволяет создавать энергоэффективные и надежные ТР для промышленной автоматизации. Его структурированный подход позволяет не только оптимизировать существующие ТР, но и выявлять принципиально новые конфигурации систем и методов управления, что способствует преодолению современных технических вызовов.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией)

FFGU-2024-0022

1. P.A. Rashitov, M.G. Astashev, D.I. Panfilov, et al. "Control Systems for Semiconductor Power Regulators in Distribution Networks," Russ. Electr. Engin. 95, 2024, pp. 449–457. doi: 10.3103/S1068371224700494
2. M.G. Astashev, D.I. Panfilov, A.V. Chasov, and P.A. Rachitov, "Toward the calculation of balancing devices for three-phase three-wire power-transmission lines," Russ. Electr. Eng., vol. 93, 2022, no. 6, pp. 368–373. doi: 10.3103/S1068371222060025.
3. Voronin, I.P., Voronin, P.A. Circuitry and Technological Methods to Improve the Technical Characteristics of Power Thyristors. Part 1. Lockable Thyristors with External Control. Russ. Electr. Engin. 95, 298–301 (2024). <https://doi.org/10.3103/S1068371224700299>
4. Zwicky, F., 1966, Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild, Droemer/Knaur, München, Zürich, 206 p.
5. R.Hülagü, and , Ş. Timur, "Using Morphological Chart for Analysing Existing Designs," Archives of Design Res., vol. 37(1), 2024, pp.27-41.
6. Pecheikina M.A., Rakov D.L., Sukhorukov R.Y. Structural synthesis and the search for new engineering solutions in the conceptual design phase. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. T. 49. № 8. С. 712-719.
7. Rakov D.L., Sukhorukov R.Y. Classification and analysis of additive technologies based on the morphological approach. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2021. T. 50. № 7. С. 616-621.
8. Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю., Гаврилина Л.В. Анализ и выбор технологических процессов и систем управления для эффективного синтеза микродуговых покрытий. Проблемы машиностроения и автоматизации. 2017. № 1. С. 75-80.
9. Митряева О.Е., Печейкина М.А., Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю. Синтез инновационных технологических процессов для микродугового оксидирования. Вестник научно-технического развития. 2020. № 7 (155). С. 24-29.
10. Rakov D.L., Sukhorukov R.Y., Pecheikina M.A. Choosing and evaluating fabrication processes by means of a computer-aided innovation support system based on the morphological approach. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2019. T. 48. № 2. С. 173-178.
11. Клименко Б.М., Печейкина М.А., Раков Д.Л., Щепкин Н.П. Применение морфологического подхода для оценки технических решений и патентования изобретений на примере установки для микродугового оксидирования. Изобретательство. 2015. Т. 15. № 10. С. 23-31.
12. Добуш, И. М., Анатолий Алексеевич Калентьев, А. А. Метель and А.Е. Горяинов. Морфологический анализ интегральных свч-усилителей с распределенным усилением. Вопросы радиоэлектроники. 2020. № 6 (2020). С.40-46

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФТОРСОДЕРЖАЩИХ ПАВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ ПРИСАДОК В КОНСИСТЕНТНЫЕ СМАЗКИ

Пикина А.М.¹ Лапсарь О.М.²

[*pikina@rgau-msha.ru](mailto:pikina@rgau-msha.ru)

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)» 125319, Российская Федерация, г. Москва, Ленинградский проспект, 64.

² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

Анализ процесса износа подвижных сопряжений в зависимости от таких факторов, как нагрузка, скорость вращения, температура, смазочная среда, указывает на низкие противоизносные и антифрикционные свойства применяемых смазок. Введение добавок, представляющих собой фторсодержащие поверхностно-активные вещества (ПАВ) в смазки с мыльными загустителями, позволяют снизить коэффициент трения и повысить износостойкость поверхностей подвижных сопряжений на 30...50%. коллоидной стабильностью, способные не только концентрироваться на границе раздела фаз, но и образовывать мицеллярные системы в объеме смазки.

Введение

Условием реализации гидродинамического трения является наличие слоя смазочного материала, толщина которого при приложенных нагрузках превышает высоту микронеровностей сопряженных поверхностей. Гидродинамическое трение не вносит значительный вклад в износ деталей пар трения, но имеет большое влияние на эксплуатационные характеристики: мощность, удельных расход топлива и т.д.

Граничное трение в подвижных сопряжениях реализуется при больших нагрузках, малых оборотах, а также в начальный период взаимного перемещения пар трения, реверс и окончание движения.

На практике в эксплуатации находятся механизмы, в которых вращательное движение преобразуется в линейное - винтовые пары основными элементами которых являются винт и гайка. Одной из областей применения являются подъемные механизмы. В данных механизмах действуют большие осевые нагрузки, вызывающие граничное трение в подвижных сопряжениях. Роль смазки в этом случае имеет большое значение для уменьшения износа элементов пар трения. Повысить смазочную способность существующих смазок возможно введением дополнительных присадок. Большой интерес представляют ПАВ с фторуглеродным радикалом. Адсорбция таких ПАВ на твердых поверхностях снижает поверхностную энергию с 1800–6000 мН/м до 4–6 мН/М, коэффициент трения снижается в разы, тангенциальное усилие сдвига смазки на твердой поверхности уменьшается в 70 раз.

Материалы и методы

Для получения консистентных смазок с высокими трибологическими свойствами в качестве присадки использовалась перфторкарбоновая кислота [1-2]. На первом этапе получают эмульсию, представляющую собой дисперсную систему, где в качестве дисперсной среды используют различные

масла, а в качестве дисперсной фазы фторсодержащие ПАВ. Триботехнические свойства полученных смазок определяли в лабораторных условиях на четырехшариковой машине трения ЧМТ-1 по ГОСТ 9490–75. Противозадирные – по нагрузке сваривания (P_c), противоизносные – по диаметру пятна износа ($D_{и}$). Коллоидная стабильность определялась по количеству масла, выделившегося при температуре 100°C в течение 24 часов из отпрессованной смазки.

Для определения коэффициента трения исследования проводились на машине трения модели ИИ 5018, в качестве пары трения были выбраны пара колодка-ролик, причем колодка изготовлена из стали 65, ролик из серого чугуна СЧ21

Результаты и обсуждение

Испытания показали лучшие результаты у образца за номером 3. Образец 1 при испытаниях показал крайне нестабильные результаты, переходный процесс после увеличения нагрузки протекает дольше, чем у других образцов.

В трех образцах смазок были улучшены показатели трибологических свойств, за счет введения 0,5% присадки по сравнению с контрольным образцом.

Нагрузка сваривания увеличилась от 4,4 до 5,4 раз, диаметр пятна износа уменьшился от 21 до 38%, при увеличении коллоидной стабильности в 3 раза. Из трех образцов с лучшими качествами является образец 3.

В процессе эксплуатации вышки происходит накопление продуктов износа пар трения, что приводит к более интенсивному разрушению механизма. Износ винтовых механизмов зависит от величины нагрузки, как видно из результатов, нижний механизм изнашивается более интенсивно по сравнению с верхним, за счет больших нагрузок.

Модификация консистентной смазки 0,5% фторсодержащими ПАВ позволило уменьшить износ в 47 раз, также следует отметить

незначительное увеличение при повышении нагрузки.

Заключение

Разработанный модификатор при использовании его в качестве добавки к консистентным смазкам обеспечивает качественную прирабатываемость трущихся поверхностей, в результате чего происходит как заметное снижение коэффициента трения скольжения материалов винтовых пар, так и существенное уменьшение износа трущихся поверхностей.

1. Противоизносная и противозадирная добавка к пластичным смазкам [Текст]: пат. 2266315 Рос. Федерация: МПК⁷ С 10 М 131/08 / Рябинин Н.А., Рябинин А. Н., Гайдар С. М.; заявитель и патентообладатель Гайдар С. М. – № 2004115714/04; заявл. 25.05.2004.; опубл. 20.12.2005. Бюл. № 35. – 8 с.

2. Кравченко И.Н., Карелина, М.Ю., Зубрилина Е.М., Коломейченко А.А. [Ресурсосберегающие технологии получения функциональных наноструктурированных покрытий высокоскоростными методами нанесения](#)//Вестник Донского государственного технического университета. 2015. Т. 15. № 3 (82). С. 19-27. <https://doi.org/10.12737/12590>
3. Карелина М.Ю. [Влияние фторорганических поверхностно-активных веществ на эксплуатационные характеристики ДВС](#)//Технико-технологические проблемы сервиса. 2015. № 1 (31). С. 12-16. EDN: UNWQEJ
4. Янкилевич, А. М. Сухие адаптивные смазочные материалы MODENGY™ / А. М. Янкилевич // Трубопроводная арматура и оборудование. – 2022. – № 1(118). – С. 8. – EDN HEASVE.
5. Топилина, С. В. Разработка способа производства высокотемпературной пластичной смазки на основе сульфат кальция / С. В. Топилина // XXIX Региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области : Сборник материалов конференции, Волгоград, 16 сентября – 15 2024 года. – Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2024. – С. 43-44. – EDN LHFLDO.

ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ УЗЛОВ ТРЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАВ

Пикина А.М.¹ Ветрова С.М.²

*pikina@rgau-msha.ru

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)» 125319, Российская Федерация, г. Москва, Ленинградский проспект, 64.

² Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева; 127434, Российская Федерация, г. Москва, Тимирязевская ул., 49

Исследования, направленные на разработку сальниковых уплотнений шпинделей трубопроводной арматуры высоких параметров, насосов, а также подвижных и неподвижных соединений в машинах. В работе приведены результаты оптимизации технологии гидрофобизации графитовых сальниковых колец фторсодержащими поверхностно-активными веществами (фтор-ПАВ).

Введение

Известны используемые в трубопроводной арматуре графитовые сальниковые уплотнения, включающие корпус с сальниковой камерой, уплотняемый шток, сальниковую набивку в виде уплотнительных колец.

Недостатком этих графитовых сальниковых уплотнений является их высокая коррозионная активность. Коррозионная активность графитовых сальниковых уплотнений определяется рядом причин, в том числе гигроскопичностью материала, из которого они изготовлены, поглощением воды, например, насыщенного кислородом водяного пара из атмосферного воздуха, что приводит к коррозии контактирующих с ними металлических поверхностей, в частности штоков или шпинделей трубопроводной арматуры.

Цель исследования

Оценить возможность применения в качестве импрегната фторсодержащих поверхностно-активных веществ для придания гидрофобности, снижения коэффициента трения и повышения температуры применения графитовых сальниковых уплотнений.

Материалы и методы

В качестве импрегната используют фтор-ПАВ – эпилам «Автокон-0,5» ТУ 2229-008-27991970-95, представляющий раствор перфторкислоты марки 6МФК-180 в перфторметилциклогексане. [1]

При нанесении раствора на твердую поверхность происходит адсорбция молекул ПАВ за счет функциональной группы. Гидрофобная часть молекулы – фторуглеродный радикал образует поверхность с более низкой поверхностной энергией [5-6].

Результаты и обсуждение

Таблица 1. Результаты исследований на гидрофобность графитовых колец

Наименование	Плотность колец ρ , г/см ³
Кольцо КГУ-1 со штатной плотностью $\rho_1=1,4 \pm 0,02$ г/см ³	$\rho_1=1,415 \pm 0,01$ г/см ³
Кольцо КГУ – 1 со штатной плотностью $\rho_1=1,4 \pm 0,02$ г/см ³ после насыщения водой	$\rho_1=1,629 \pm 0,01$ г/см ³
Кольцо КГУ – 1 со штатной плотностью $\rho_1=1,4 \pm 0,02$ г/см ³ после эпиламинирования	$\rho_1=1,424 \pm 0,01$ г/см ³
Кольцо КГУ – 1 со штатной плотностью $\rho_1=1,4 \pm 0,02$ г/см ³ после эпиламинирования и насыщения водой	$\rho_1=1,425 \pm 0,01$ г/см ³
Кольцо КГУ-1 со штатной плотностью $\rho_2=1,8 \pm 0,02$ г/см ³	$\rho_2=1,813 \pm 0,01$ г/см ³
Кольцо КГУ – 1 со штатной плотностью $\rho_2=1,8 \pm 0,02$ г/см ³ после насыщения водой	$\rho_2=1,947 \pm 0,01$ г/см ³
Кольцо КГУ – 1 со штатной плотностью $\rho_2=1,8 \pm 0,02$ г/см ³ после эпиламинирования	$\rho_2=1,818 \pm 0,01$ г/см ³
Кольцо КГУ – 1 со штатной плотностью $\rho_2=1,8 \pm 0,02$ г/см ³ после эпиламинирования и насыщения водой	$\rho_2=1,818 \pm 0,01$ г/см ³

Таблица 2. Результаты исследования влияния эпиламинирования на величину крутящего момента

Наименование	Крутящий момент холостого хода M_{xx} сальникового узла из графитовых колец КГУ-1 клиновой задвижки КПЛВ. 492664301
Кольца графитовые уплотнительные КГУ-1 исходные	$7,10 \pm 0,5$ Нм
Кольца графитовые	$5,12 \pm 0,5$ Нм

уплотнительные КГУ-1 эпиламинированные	
---	--

Таким образом, из независимости плотности р эпиламинированных графитовых уплотнительных колец по сравнению с исходными кольцами, от насыщения их горячей водой, мы можем сделать вывод о негигроскопичности (гидрофобности) эпиламинированных сальниковых колец (набивок). Из снижения крутящего момента холостого хода $M_{хх}$ вращения ходовой втулки ходовой резьбовой пары клиновой задвижки мы можем сделать вывод о снижении коэффициента трения μ эпиламинированных колец графитовых уплотнительных типа КГУ-1 по сравнению с исходными примерно на $\sim 28\%$.

Поскольку поверхность пор составляет основную часть удельной поверхности исходных графитовых уплотнительных колец, то пропитывание и заполнение пор импрегнатом с высокой температурой термодеструкции - Фтор-ПАВ эпиламом, позволяет существенно уменьшить долю связующего или пропитывающего компонента, как правило с невысокой температурой размягчения, например, фторопластом или нефтяным пеком, обычно применяемым при изготовлении (прессовании) сальниковых набивок. Уменьшение доли низкотемпературного связующего позволяет повысить температуру эксплуатации графитовых сальниковых набивок (уплотнительных колец). Использование полезной модели позволяет создавать негигроскопичные (гидрофобные) графитовые сальниковые кольца (набивки), температура применения которых повышена до 400°C , а также снижать коэффициент трения подобных эпиламинированных графитовых набивок.

В таблице 2 приведены сравнительные результаты крутящего момента холостого хода $M_{хх}$, измеренного с помощью тарированного динамометрического ключа НГ 781.002-01 №12, со вставкой НГ 781.058-05 длиной 410 мм, индикатором ИЧ $0 \div 10$ мм, 1 классом точности с

разрешением 0,01 мм по ГОСТ 577-68, на двух сальниковых набивках из исходных и эпиламинированных графитовых колец КГУ-1.

Заключение

Применение технологии эпиламинирования с использованием в качестве импрегната фторсодержащие ПАВ позволило улучшить эксплуатационные свойства сальниковых уплотнений:

- придать гидрофобность графитовым сальниковым кольцам и, как следствие придать коррозионную стойкость поверхностям в хоне трения;
- снизить коэффициент трения в узле.

1. [Исследование эффективности триботехнических препаратов на основе наноматериалов](#)/ Карелина М.Ю., Гайдар С.М.// [Грузовик](#). 2015. № 4. С. 17-29.
2. [Адсорбция ФТОР-ПАВ и ее влияние на смазку трибосопряжений в условиях граничного и гидродинамического трения](#)/Гайдар С.М., Волков А.А., Карелина М.Ю.//[Труды ГОСНИТИ](#). 2015. Т. 118. С. 113-124.
3. [Эпиламинированный пористый материал и способ его получения](#)/ Гайдар С.М., Серяков А.В., Захаров Л.П., Васильев Д.Е.// Патент на изобретение RU 2283322 C1, 10.09.2006. Заявка № 2005120618/04 от 04.07.2005.
4. [Увеличение эксплуатационного ресурса сельхозтехники путем поверхностно-энергетической модификации поверхностей трибосопряжений фторуглеродными поверхностно-активными веществами](#)/ Бугакова Н.Ю., Гайдар С.М., Карелина М.Ю., Приходько В.М.// [Технология металлов](#). 2019. № 4. С. 24-31.
5. [Противоизносная и противозадирная добавка к пластичным смазкам](#)/Рябинин Н.А., Рябинин А.Н., Гайдар С.М., Ляшенко М.Н., Паркова Г.И.// Патент на изобретение RU 2266315 C1, 20.12.2005. Заявка № 2004115714/04 от 25.05.2004.
6. [Эпиламинированный графит и способ его получения](#)/ Гайдар С.М.Патент на изобретение RU 2329946 C1, 27.07.2008. // Заявка № 2006146311/15 от 26.12.2006.
7. [Перспективы применения нанотехнологических добавок в смазочные материалы машин и оборудования лесного комплекса](#)/Гайдар С.М.// [Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник](#). 2012. № 7. С. 138-139.

ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОТ ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИИ

Пилюшина Г.А., Памфилов Е.А.

Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия; gal-pi2009@yandex.ru

Исследованы технологические аспекты, формирования покрытий, нивелирующие процессы фреттинга в стыковых зонах деталей резьбовых соединения и обеспечивающие их последующую трансформацию в процессе эксплуатации. Предложен способ формирования на стыковых поверхностях неподвижного соединения особых структурированных металлических покрытий, создающих промежуточную аморфную среду и заполняющую дегерметизирующие пустоты. Результаты исследований позволили оптимизировать режимы формирования герметизирующих защитных покрытий резьбовых соединений при фреттинге гидравлических и пневматических систем технологического оборудования.

Введение

Резьбовые соединения являются одними из наиболее распространенных соединений деталей машин. Такой способ соединения используется и при сборке различных трубопроводов пневматической и гидравлической аппаратуры. Сборка таких металлических соединений осуществляется путем уплотнения контакта деталей резьбовой затяжкой гайками или муфтами. При этом их основными функциональными требованиями является обеспечение герметичности гидравлических и пневматических приводов.

Хотя резьбовые соединения относятся к неподвижным малая величина амплитуды относительного перемещения деталей создает особые условия трения на небольших площадках действительного контакта, а продукты износа (окислы металлов), которые не могут выйти из зоны трения, создают высокое давление и абразивное воздействие на основной металл, тогда и образуются поверхностные микротрещины и каверны фреттинг-коррозии, что и способствует дегерметизации рассматриваемых соединений [1-4].

С точки зрения термодинамики неподвижные резьбовые соединения — это активные механохимические гетерогенные системы, при разрушении которых гетерогенные механохимические реакции твердое тело - газ и твердое тело - жидкость начавшись на поверхности, развиваются в глубину материала. Поверхностно-активные вещества, имеющиеся в рабочих средах, увеличивают дефекты структуры соединения, пластифицируя поверхности (эффект Ребиндера). В итоге количество утечек в герметизирующем контакте катастрофически увеличивается, а при разборке соединения выявляются поверхностные дефекты в виде язв, микротрещин и налипания металла [5].

На возникновение и развитие фреттинг-коррозии может влиять много факторов, но определяющими все же являются микрогеометрия контакта деталей соединения и условия его эксплуатации. Герметичность резьбового соединения определяется пористостью и капиллярной насыщенностью контакта, что не исключает возможность протекания фреттинг-коррозии, инициируемой относительно малыми

перемещениями деталей при осуществлении рабочих процессов гидравлических и пневматических устройств.

Материалы и методы исследований

Для борьбы с фреттинг-коррозией применяют различные технологические методы, регулирующие физико-химические процессы, происходящие в контактной зоне соединения. Но для соединений, обеспечивающих герметичность стыка наиболее целесообразным является нанесение или введение в зону контакта восстанавливающего материала, обладающего повышенной пластичностью и позволяющего заполнить места протекания рабочих сред за счет образования промежуточных металлических или полимерных слоев. При закручивании такого соединения происходит текстурирование и аморфизация микрообъемов материала, которые создают условия для анизотропии механических, физических и химических свойств, что и приводит фактически к изменению комплекса как геометрических, так и физико-механических свойств поверхностных слоев [6].

Формирование пластичных пленок из меди, олова, цинка, кадмия и других подобных металлов создает увеличение площади фактического контакта путем распределения и равномерного заполнения неплотностей и микропор. Такие герметизирующие слои оказывают позитивное влияние на показатели усталостной прочности неподвижного соединения, которая в процессе эксплуатации не только не снижается, но и может быть существенно повышена путем формирования благоприятного уровня остаточных напряжений сжатия с одновременным устранением дефектов поверхности. В то же время аморфные металлические покрытия, формируемые на поверхностях сопряженных деталей, обеспечивают увеличение силы трения за счет увеличения площади фактического контакта даже при приложении незначительных контактных нагрузок, что способствует повышению герметичности стыка и предохраняет его от фреттинга.

Особое место в этом вопросе занимают так называемые «сервитные» пленки, образующиеся и существующие в процессе трения,

сопровождающегося сложными триботехническими явлениями. Такие пленки не разрушаются при деформировании, так как действующие нагрузки локализируются в промежуточном слое, покрывающим микронеровности стальных деталей, что исключает их участие в процессе микротрения, и основные трибологические явления происходят в самой сервовитной пленке [7-8].

Формирование сервовитной пленки на функциональных поверхностях соединений зависит от вида и свойств материалов деталей и условий их контактного взаимодействия. Так при трении бронзы по стали при разделении их тонким слоем глицерина происходит перенос атомов легирующих элементов бронзы в смазочный материал, так как глицерин действует как слабая кислота. Интенсификация процесса трения способствует диффузионному притоку дополнительных атомов легирующих элементов к поверхности. Эти атомы также диффундируют в смазочный слой, что преобразует поверхностный слой бронзы в медный. Растворение бронзы продолжается, пока на стальной и бронзовой поверхностях слой меди достигнет толщины 1...2 мкм. Наступает химическое равновесие, характеризующееся установившимся режимом избирательного переноса, которое сохраняется в течение всего периода контактного взаимодействия функциональных поверхностей.

Сервовитная пленка может образовываться при трении одноименных материалов, например, сталь - сталь при наличии в смазке порошков бронзы, меди, свинца или серебра. Для химической активации переносимого материала в глицерин можно добавить кислоту. В результате восстановления окисных пленок порошки, растворяющиеся в смазочном материале, и схватываются со сталью, образуя прочную металлическую пленку.

Выполненные исследования физико-химических характеристик и структуры сервовитных пленок позволили сделать вывод, что материал пленки находится в состоянии, подобном квазирасплаву. Такая пленка не способна к наклепу, имеет малое сопротивление сдвигу, обладает высокой пористостью, не содержит окислов, потому способна к схватыванию. В процессе взаимодействия ее частицы свободно переходят с одной поверхности трения на другую без образования повреждений и увеличения силы трения [9].

Эти свойства сервовитной пленки достаточно эффективны для борьбы с фреттинг-коррозией и в качестве герметизирующих покрытий, устраняя протекания рабочих сред через дефекты соединения. При этом материал покрытия в условиях циклических микроколебаний деталей соединения должен образовывать сервовитные пленки, являющиеся препятствием для возникновения фреттинг-коррозии, а также легко

перераспределяться в объеме контактной зоны соединяемых деталей, нивелируя геометрические погрешности формы, шероховатости, волнистости и обеспечивая герметичность уплотнения.

Формирование покрытия достигается за счет действия сил адгезии (металлической связи) вследствие диффузии контактной зоны резьбового соединения.

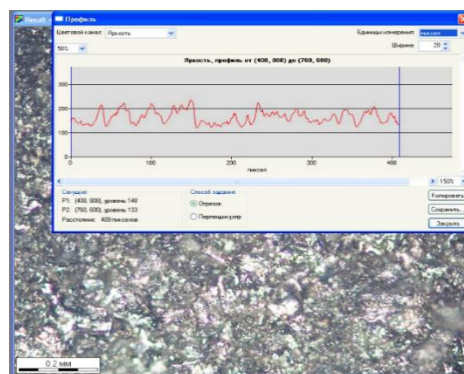
Результаты и их обсуждение

На основе анализа технологичности, экономичности и эффективности имеющихся методов нанесения покрытия была разработана технология формирования защитного покрытия резьбового соединения, включающая в себя несколько этапов [10].

На начальном этапе на одну предварительно нагретую поверхность разъемного соединения (350-400°C) наносится газопламенное медное покрытие толщиной 8-10 мкм (1050-1100°C), а на другую поверхность детали выполняется химическое осаждение меди толщиной 2...4 мкм из раствора сернокислой меди и серной кислоты при температуре 15-25°C. Газопламенное напыление и химическое осаждение материала обеспечивает достаточно прочные адгезионные связи, препятствующие срыву покрытий с материала подложки при приложении смещающей или вибрационной нагрузки. А все относительные микроперемещения осуществляются во внутреннем промежуточном слое соединения.

Следующим важным этапом является в технологической приработке деталей соединения в смеси глицерина и ледяной уксусной кислоты при осевой нагрузке 30Н, возвратно-вращательном и осциллирующем движении под углом 3-5° с частотой 10Гц. Технологическая приработка обеспечивает прочность сцепления покрытия с поверхностью детали и обуславливает последующую трансформацию структуры в процессе эксплуатации.

На рисунке 1 представлены покрытия деталей неподвижного гидравлического соединения до и после выполнения технологической приработки.



а)

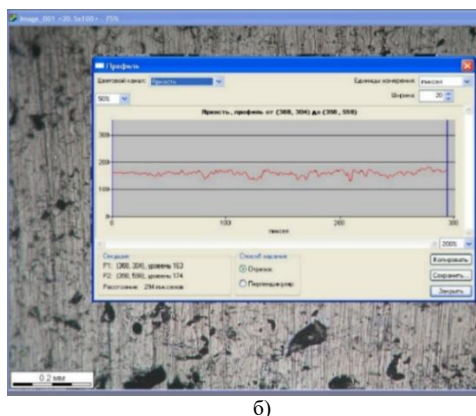


Рис. 1. Поверхности деталей соединения: а) до технологической приработки; б) после технологической приработки

Покрытие наносилось на детали неподвижного разъемного соединения гидропривода автогрейдера по предложенной схеме [10]. После выполнения технологической приработки (рис. 1, б) и трансформации структуры стыковой зоны соединения отмечено снижение шероховатости, что определяло повышенную стойкость контактирующих поверхностей фреттинг-коррозии.

Для устранения возможной утечки рабочей среды через контактную зону на одну из деталей неподвижного соединения наносился специальный лабиринтный микрорельеф высотой 20-30 мкм и шагом 0,2-0,3 мм.

Неплохие результаты сопротивляемости фреттинг-износу показали образцы с покрытием методом ФАБО. Обработка выполнялась с использованием технологической жидкости (10 частей глицерина и 2 части ледяной уксусной кислоты).

Исследования износостойкости резьбовых соединений с покрытиями, сформированными различными технологическими способами выполнялись в сравнении с серийными соединениями, эксплуатируемыми в гидроприводах станочного оборудования и мобильных машин (рис. 2).



Рис. 2. Износостойкость разъемных соединений: 1 – серийный образец; 2 – газотермическое и химическое покрытие деталей; 3 – покрытие ФАБО; 4 – восстановленный серийный образец

Серийные образцы изготовлены из стали 35 по 7 качеству точности (ГОСТ 21858-78) не имели покрытия. Другие образцы подвергались газопламенному напылению, химическому осаждению, а также покрытию методом ФАБО. Для газопламенного напыления применялась медная проволока диаметром 3,2 мм, а для нанесения

покрытия методом ФАБО – латунь Л-62. Сила прижима латунного прутка составляла 50 Н, скорость натирания 0,6...0,8 м/с. Интенсивность подачи технологической жидкости в зону контакта при выполнении ФАБО составляла 0,5 см³/мин.

В эксперименте участвовали также восстановленные гидравлические соединения. Перед нанесением покрытия изношенные поверхности тщательно очищались эластичными лепестковыми кругами и обезжиривались. После нанесения покрытий детали подвергались технологической приработке.

Выводы

Экспериментально подтверждена эффективность герметизирующих покрытий для защиты резьбовых соединений от фреттинг-коррозии. Образцы с герметизирующими покрытиями превышают износостойкость серийных образцов в четыре раза.

Выполнение технологической приработки деталей с нанесенными покрытиями по рекомендуемой схеме позволяет обеспечить направленную трансформацию структуры материала покрытий.

ФАБО позволяет получать функциональные поверхностные слои с заданными свойствами, особенно при использовании химически активной технологической среды, ускоряющей процесс микротрансформации покрытия.

Предложенные герметизирующие покрытия достаточно эффективны для восстановления работоспособности изношенных резьбовых соединений.

1. Голего Н.Л., Алябьев А.Я., Шевеля В.В. Фреттинг-коррозия металлов. – Киев: Техника, 1974. – 272 с.
2. Марченко Е.А. О природе разрушения поверхности металлов при трении. – М.: Наука, 1979. – 118 с.
3. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД. М.: Машиностроение, 1993. – 240 с.
4. Перфильева Н.В. Динамическая модель механического контактирования условно-неподвижных соединений: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. – Томск, 2003. – 39 с.
5. Гаркунов Д. Н. Триботехника: учеб. для вузов. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.
6. Основы трибологии (трение, износ, смазка): Учеб. для техн. вузов / Под ред. А.В.Чичинадзе. – М.: Центр «Наука и техника», 1995. – 778 с.
7. Потеха В. Л. Трибодилатометрия. – Гомель: ГГТУ, 2000. – 374 с.
8. Пилюшина Г.А., Пыриков П.Г., Памфилов Е.А., Капустин В.В. К вопросу обеспечения герметичности соединений на основе технологического индуцирования // Вестник Донского государственного технического университета. – 2019 – 19(2) – 170-178.
9. Пилюшина Г.А., Памфилов Е.А. Формирование промежуточных покрытий в условно неподвижных соединениях// Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел и деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. –Тверь: ТГТУ, 2018. –№ 11. – С. 60-65.
10. Патент № 2499171 РФ. Способ изготовления неподвижных разъемных соединений / Е.А. Памфилов, Г.А. Пилюшина, П.Г. Пыриков, С.В. Тяпин. – Заявка № 2011148194/06 от 25.11.2011; опубл. 27.05.2013, Бюл. №15.

АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОЙ ПЛЕНКИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ СОПРЯЖЕНИЙ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Поляков С.А.^{1,2}, Куксенова Л.И.¹, Кулешова Е.М.²

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия;

²Московский Государственный Технический Университет имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия;
kuleshova.em@mail.ru

В работе рассмотрены возможные механизмы формирования и устойчивости пленки, формирующейся на поверхностях трения сопряжений скольжения, при использовании наномодифицированных смазочных материалов. Показаны результаты триботехнических испытаний нанодисперсной смазочной композиции, полученной с использованием нанодисперсной суспензии серпентина и солей жирных кислот.

Цель

Целью работы является анализ процессов формирования остаточной пленки на поверхностях сопряжений скольжения, а также анализ механизма роста устойчивости сформированной пленки к разрушению при действии внешней нагрузки на сопряжение.

Введение

Вопрос повышения износостойкости сопряжений скольжения всегда был и остается весьма актуальным для ряда машин и механизмов. Одним из основных подходов к повышению износостойкости и снижению трения сопряжения является подбор смазочных материалов. В частности, весьма распространенным является применение различных добавок к смазочному материалу. Высокую эффективность показывают добавки, в состав которых входят соли жирных кислот, это явление было обнаружено достаточно давно [1], также ряд работ показывает повышение трибологических характеристик сопряжений скольжения при использовании нанодисперсных частиц серпентина [2]. Но особенно высокую эффективность показывает сочетание нанодисперсных частиц и солей жирных кислот.

Материалы и методы

Для анализа состава и структуры пленки необходимо рассмотреть исходный нанодисперсный материал, полученный на основе нанодисперсной суспензии серпентина, в состав которой входят наноразмерные частицы (с размерами 50–100 нм) были разработаны с использованием солей жирных кислот мягких металлов, образующих периферию мицелл с ядрами из наночастиц [3].

Полученная добавка к смазочному материалу исследовалась как в лабораторных, так и стендовых испытаниях. Для анализа получаемого состава и структуры пленки использовалась машина трения «диск-три пальца» (диск – сталь 45, пальцы – ЛАС53), на которой указанные образцы прирабатывались по методике ГОСТ 23. 224-86 [3], а образующуюся на поверхностях трения пленку исследовали методами профилографирования по

ГОСТ 23. 224-86, рентгеноструктурного анализа и стандартного микрозондового анализа. Аналогичные эксперименты проводились при возвратно – поступательном движении образцов на машине МТ-8 по методике ГОСТ 23. 224-86, где также методом профилографирования фиксировалась остаточная пленка значительной толщины (от 100 нм и более), которая существенно усиливает приработочные эффекты, несущую способность и износостойкость поверхности [4].

Результаты и их обсуждение

Основной результат испытаний показан на рис.1. Результаты лабораторного эксперимента, проводившегося по методике ГОСТ 23.224-86 в условиях граничной смазки и использовании трех видов смазочного материала: №1 – И20А (индустриальное масло); №2 – И20+СС (СС – суспензия наноразмерных частиц серпентина); №3 – И20А + СС + СЖК (СЖК – соли жирных кислот мягких металлов) показаны в виде диаграммы Герси – Штрибека – изменения коэффициента трения при использовании различных смазочных материалов в зависимости от параметра Зоммерфельда – на рис. 1.

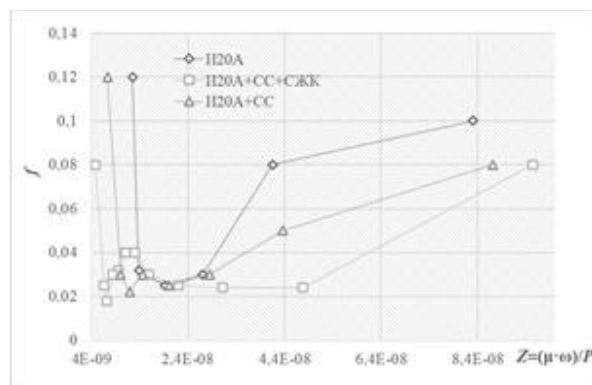


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от параметра Зоммерфельда (толщины смазочного слоя (дана в условных единицах)) при использовании различных смазочных материалов: №1 – И20А; №2 – И20+СС; №3 – И20А + СС + СЖК.

Из рис. 1 видно, что при использовании смазочного материала №1 получается классическая

зависимость коэффициента трения от параметра Зоммерфельда с одним минимумом, разделяющим области гидродинамической и граничной смазки, тогда как добавление наноразмерных частиц в композиции №2 и №3 приводит к возникновению «второго минимума» коэффициента трения. Причем для смазочного материала №3 этот минимум смещен в область более высоких давлений.

Анализ поверхности трения показал присутствие остаточной пленки толщиной до 1 мкм, составляющей приповерхностный слой латуни. Микрозондовый анализ химического состава приповерхностных слоев энерго-дисперсионным методом на электронном сканирующем микроскопе Genesis XM 4 System 30, укомплектованным Si детектором с ультратонким окном, охлаждаемым жидким азотом, показал, что в анализируемых слоях латуни легирующие элементы – цинк и алюминий, уходят из поверхностных слоев, что рентгеноструктурно выражается в заметном уменьшении периода решетки a (табл. 1). Поскольку плотность дислокаций по данным рентгеноструктурного анализа также уменьшается, в них происходит избирательное растворение и соответствующая ему релаксация напряжений. Данные явления можно проиллюстрировать результатами рентгеноструктурного анализа, показанными в табл. 1.

Таблица 1. Изменение физического уширения рентгеновских линий (мкрад) и периода решетки (относительные единицы) в процессе трения с НСМ.

Этап исследования	Физическое уширение, мкрад	Изменение a (относительные единицы)
После механической обработки	28	1
После трения с НСМ	15	0,995

Заключение

1. При использовании рассмотренного НСМ на поверхности трения образуется остаточная пленка с толщиной не менее 100 нм, играющая роль твердой смазки в сопряжении скольжения.

2. Остаточная пленка обладает гетерогенной структурой с включением наночастиц и особыми вязкопластическими свойствами, обусловленными механизмом деформации по модели орегонатора [3,5], что обеспечивает высокую степень деформации этой пленки без ее разрушения при давлениях, превышающих допустимые в условиях гидродинамики.

3. Применение указанной добавки к смазочному материалу повышает параметры технического состояния сопряжений скольжения, в том числе, допустимую нагрузку.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0020, FFGU-2024-0021.

1. Киселев Б.Р., Замятина Н.И., Годлевский В.А. Оценка задиростойкости червячной пары при использовании трибоактивных присадок // Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2013, №10, 15–19
2. Albagachiev A.Y., Tokhmetova A.B. Tribotechnical properties of nanomodifier 2 // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. — 2020, no. 10, 870 — 873
3. Поляков С.А., Куksenova Л.И., Кулешова Е.М. Особенности формирования несущей способности сопряжений скольжения при использовании наномодифицированных смазочных материалов // Трение и износ. — 2019 (40), №6, 712—719
4. Кулешова Е. М. Определение зависимости интенсивности изнашивания от нагрузки по результатам триботехнических испытаний при использовании пленкообразующих смазочных материалов // Сборка в машиностроении, приборостроении. — 2020, № 3, 116-121.
5. G. Nicolis, I. Prigogine. Self-organization in nonequilibrium systems. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley and Sons, New York –London–Sydney– Toronto. 1977.

ЧАСТИЧНАЯ КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ СОЗДАНИИ НОВЫХ МАШИН

Раков Д.Л.¹

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; rdl@mail.ru

В работе рассматривается проблема управления сложностью и повышения эффективности процессов проектирования новых машин, технологических и технических систем (ТС). Обосновывается необходимость перехода от полного перебора всех возможных технических решений (ТР) к целенаправленному синтезу рациональных вариантов. В качестве методологической основы предлагается синтез двух подходов: классического морфологического анализа, позволяющего систематизировать все возможные элементы системы и их состояния, и процедуры частичной кластеризации, направленной на выделение групп функционально и структурно совместимых решений. Анализируются ограничения метода и перспективы его развития.

Современный этап развития машиностроения и приборостроения характеризуется резким усложнением создаваемых технических и технологических систем. Повышение требований к функциональности, энергоэффективности, экологичности, адаптивности и стоимости жизненного цикла ставит перед конструкторами и инженерами задачи, решение которых традиционными эвристическими методами становится малоэффективным. Процесс создания новой машины превращается в многокритериальную оптимизационную задачу в условиях высокой неопределенности и необходимости учета огромного количества взаимосвязанных параметров.

Одной из ключевых проблем на концептуальной стадии проектирования является задача синтеза принципиальных вариантов будущей ТС. Классический подход, основанный на анализе известных аналогов и их постепенной модернизации, зачастую приводит к эволюционному развитию, не позволяющему осуществить прорывной скачок в производительности или качестве. В то же время, попытка полного перебора всех мыслимых комбинаций ТР ведет к комбинаторному взрыву.

В этом контексте методы системного анализа, направленные на структурирование проблемы и целенаправленный поиск ТР, приобретают первостепенное значение. Одним из таких методов является морфологический анализ (МА), разработанный Ф.Цвикки [1,2]. Данный метод предоставляет систематизированный подход к генерации полного спектра возможных ТР путем декомпозиции системы на ключевые атрибуты (признаки) и идентификации всех возможных состояний (альтернатив) этих атрибутов. Однако, несмотря на свою мощь как инструмента генерации идей, классический МА при большой мощности морфологического множества имеет указанный выше проблему комбинаторной сложности. Не все комбинации, сгенерированные в морфологической матрице (ММ), являются реализуемыми, технологически осуществимыми или экономически целесообразными.

Морфологический анализ представляет собой

метод системного структурирования и исследования множества всех возможных ТР. основополагающий принцип МА был сформулирован Ф. Цвикки как «всеобъемлющий, систематический охват всех возможных решений данной проблемы». Для достижения этой цели проблема подвергается последовательной декомпозиции.

На первом этапе формулируется задача или функция, которую должна выполнять проектируемая ТС. На втором выполняется идентификация ключевых атрибутов, которые существенным образом характеризуют ТС и влияют на выполнение ее главной функции. Эти атрибуты должны быть относительно независимыми в том смысле, что они описывают различные аспекты системы. Далее для каждого атрибута выявляется полный спектр всех возможных, альтернатив его реализации. Затем осуществляется построение ММ (или морфологического ящика), которая представляет собой многомерную таблицу, где строки соответствуют атрибутам, а столбцы (или ячейки в каждой строке) – возможным значениям этих атрибутов. Результирующее морфологическое пространство образуется из множеств значений всех значений альтернатив. Теоретически, любая комбинация, состоящая из одного значения каждого атрибута, является потенциальным ТР задачи. Именно эта мультипликативная природа морфологического пространства определяет преимущества и недостатки подхода - полноту охвата, включая неочевидные и инновационные комбинации ТР, а также комбинаторный взрыв, который делает практический перебор и оценку всех комбинаций невозможными при большой размерности задачи.

Таким образом, возникает острая необходимость в разработке методов, которые, сохраняя преимущества МА в плане системности и полноты охвата, позволяли бы эффективно сужать пространство поиска, отсекая некоторое количество вариантов ТР и выделяя группы перспективных решений. Целью работы является разработка теоретических основ и практического алгоритма частичной кластеризации морфологического множества для эффективного синтеза новых

машин.

Была создана модифицированная методика МА и процедуры кластеризации, что позволяет перейти от перебора комбинаций в ММ (Рис.1) к структурированному пространству решений, сгруппированных по признаку совместимости. В отличие от известных методов попарного отсеечения несовместимых комбинаций, предлагаемый подход оперирует кластерами [3-5].

		Элементы			
		P^1	P^2	P^3	P^4
Признаки	P_1	P_1^1	P_1^2	P_1^3	P_1^4
	P_2	P_2^1	P_2^2	P_2^3	
	P_3	P_3^1	P_3^2	P_3^3	P_3^4
	P_4	P_4^1	P_4^2		
	P_5	P_5^1	P_5^2	P_5^3	P_5^4

Рис. 1. Морфологическая матрица (экранная форма).

Значимость исследования состоит в том, что внедрение методики в процесс проектирования позволяет существенно сократить временные и интеллектуальные затраты на стадии технического предложения, минимизировать риски при выборе путей развития ТС, а также способствует выявлению неочевидных, инновационных комбинаций технических решений, которые могли бы остаться незамеченными при использовании традиционных подходов.

Классическая задача кластеризации предполагает разбиение всего множества объектов на непересекающиеся группы (кластеры) таким образом, чтобы объекты внутри одного кластера были «похожи» друг на друга, а объекты из разных кластеров – «отличались». Сгенерированные кластеры анализируются. Критериями качества кластера служат:

- Размер: количество ТР в кластере.
- Среднее значение оценок: совокупная перспективность ТР, входящих в кластер.
- Среднее значение инновационности.
- Плотность: отношение числа фактических связей совместимости внутри кластера к максимально возможному.

Кластеры ранжируются по этим критериям, и наиболее интересные из них передаются на дальнейшую, более детальную проработку. На каждом шаге выбирается локально оптимальное решение. Он не гарантирует нахождения глобально оптимального набора кластеров, но на практике обеспечивает приемлемое качество решения при разумных вычислительных затратах. Для снижения размерности задачи могут быть использованы методы частичной кластеризации [6,7].

Концепция частичной кластеризации — это метод группировки объектов или решений, при котором не все элементы обязательно должны быть

отнесены к определённому кластеру (Рис.3). В контексте синтеза и анализа ТР частичная кластеризация помогает управлять неопределённостью и разнообразием потенциальных ТР. Особенности и назначение частичной кластеризации:

- Гибкость группировки: в отличие от полной кластеризации, где все объекты или решения должны быть кластеризованы, неполная кластеризация позволяет отнести некоторые элементы к «неопределённому» классу или вообще не отнести ни к одному кластеру. Это может быть полезно, когда данные содержат аномалии, шум или не могут быть однозначно классифицированы (рис. 2).
- Обработка неоднозначных ТР: В инженерной практике и процессе принятия решений часто встречаются случаи, когда некоторые решения невозможно однозначно отнести к одной и той же группе из-за наличия противоречий или недостатка информации. Частичная кластеризация позволяет справляться с такими неоднозначными ситуациями.
- Оптимизация и снижение рисков: Неполная кластеризация помогает избежать неправильной категоризации или перегруппировки, что особенно важно при синтезе сложных ТР.

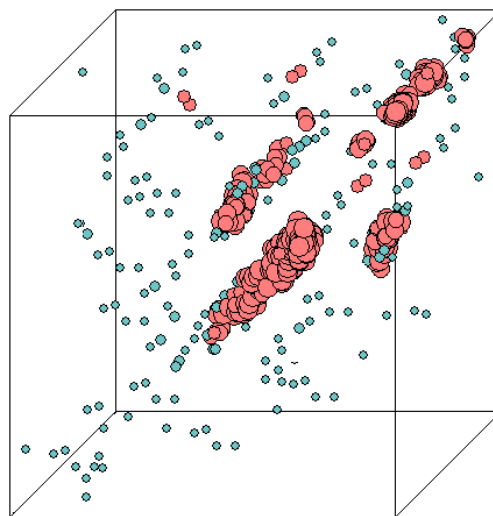


Рис. 2. Морфологическое пространство ТР.

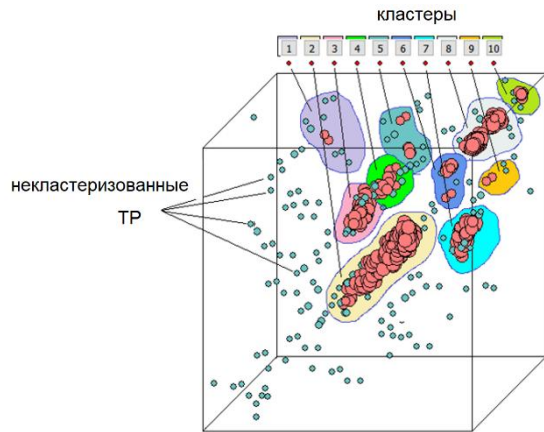


Рис. 3. Частичная кластеризация ТР.

Метод частичной кластеризации на базе МА является эффективным инструментом для структурирования процесса создания новых машин и ТС. Ключевые преимущества метода:

- Сокращение пространства поиска так как метод позволяет сократить количество вариантов ТР, подлежащих глубокому анализу, путем выделения кластеров.
- Структурирование проектной информации так как кластеры предоставляют наглядное и логичное представление о различных вариантах ТР, облегчая принятие решений.
- Стимулирование инноваций за счет того, что систематический охват морфологического пространства и выявление устойчивых комбинаций позволяет обнаруживать неочевидные, гибридные решения.
- Метод допускает итеративность. По мере получения новой информации атрибуты и альтернативы могут быть скорректированы, и кластеризация проведена заново.

В работе была представлена комплексная методика частичной кластеризации ТС, основанная на синтезе принципов морфологического анализа и процедур кластеризации. Предложен конкретный алгоритм итеративного формирования таких кластеров, основанный на оценке бинарной совместимости и весовых коэффициентах

перспективности ТР. Метод позволяет преодолеть фундаментальную проблему комбинаторного взрыва, присущую классическому МА, и перейти от хаотичного перебора к целенаправленному синтезу рациональных и инновационных ТР, сгруппированных в виде кластеров. Несмотря на наличие определенных ограничений, в первую очередь связанных с субъективностью экспертных оценок на начальном этапе, предлагаемая методика обладает значительным потенциалом для внедрения в практику проектирования. Дальнейшее развитие метода видится в его интеграции с современными технологиями искусственного интеллекта и базами знаний, что позволит автоматизировать процесс оценки совместимости и вывести процедуру синтеза новых машин на качественно новый уровень системности и обоснованности.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0022

1. Zwicky, F., 1966, Entdecken, Erfinden, Forschen im morphologischen Weltbild, Droemer/Knaur, München, Zürich, 206 p.
2. R.Hülagü, and , Ş. Timur, "Using Morphological Chart for Analysing Existing Designs," Archives of Design Res., vol. 37(1), 2024, pp.27-41.
3. Pecheikina M.A., Rakov D.L., Sukhorukov R.Y. Structural synthesis and the search for new engineering solutions in the conceptual design phase. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2020. T. 49. № 8. С. 712-719.
4. Rakov D.L., Sukhorukov R.Y., Pecheikina M.A. Choosing and evaluating fabrication processes by means of a computer-aided innovation support system based on the morphological approach. Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2019. T. 48. № 2. С. 173-178.
5. D. Rakov, "Okkam - advanced morphological approach as method for computer aided innovation (CAI), " MATEC Web Conf., vol.298, 00120, 2019,
6. J. Yin, P. Wang, S. Sun and Z. Zheng, "Incomplete Multi-View Clustering via Multi-Level Contrastive Learning," in IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 37, no. 8, pp. 4716-4727, Aug. 2025, doi: 10.1109/TKDE.2025.3568795.
7. Xia D, Yang Y, Yang S. Incomplete Multi-View Clustering via Auto-Weighted Fusion in Partition Space. Tsinghua Science and Technology, 2023, 28(3): 595-611. <https://doi.org/10.26599/TST.2022.9010025>

АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС РЕДУКТОРОВ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ

Раша Аларус¹ (Сирия), Зорин В.А.¹

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Сложная геометрическая форма зубчатых колес, высокие требования к прочности, износостойкости, точности обработки поверхности, минимальным остаточным напряжениям и надежности деталей делают процесс их изготовления традиционными методами сложным, относительно длительным и сопровождающимся значительными потерями материала. В данной статье проведен анализ новых конструкционных материалов для изготовления зубчатых колес редукторов токарных станков методом аддитивной технологии – 3D печати - инновационным методом цифрового производства изделий машиностроения.

Коробка передач позволяет эксплуатировать металлорежущие станки в различных режимах на различных скоростях, достаточных для создания крутящего момента и усилий, необходимых для обработки детали с определенными техническими характеристиками, кроме того, это позволяет изменять направление вращения вала или осуществлять так называемый обратный ход [1].

Основные нагрузки, действующие на зубчатые колеса коробки передач токарного станка

Характер работы зубчатых колес коробки передач, заключается в том, что они передают крутящие моменты с изменением их величины в широком диапазоне и на переменных скоростях. Зубья шестерен работают в условиях трения качения с проскальзыванием, сопровождаемых интенсивным выделением тепловой энергии, вибрацией, механическими ударами и износом, что отрицательно сказывается на точности и качестве изготовления деталей.

В процессе работы обрабатываемого центра на шестерни коробки передач воздействуют циклические, статические и динамические нагрузки. Циклические нагрузки возникают в результате непрерывной и повторяющейся передачи крутящего момента и преодоления сил трения, что приводит к изгибающим, сдвигающим и усталостным напряжениям.

Статическая нагрузка возникает в результате кратковременной перегрузки, приводящей к разрушению или изменению геометрии зубьев. Динамические нагрузки являются нестабильными, возникают при запуске или внезапной остановке рабочего процесса, отклонении геометрии зуба, вибрации и механических ударов.

При проектировании зубчатых колес в качестве основного режима нагружения зубьев шестерен рассматриваются длительные циклические нагрузки. Остальные нагрузки учитываются с помощью поправочных коэффициентов при расчете прочности редуктора [2].

Результаты анализа темпов развития машиностроительных процессов позволяют прогнозировать интенсификацию использования 3D-печати, поскольку она способствует снижению веса деталей, потерь материалов и

производственных затрат, а также позволяет эффективно и быстро тестировать новые или модифицированные конструкции [3].

Трехмерная печать, как гибкий технологический процесс, позволяет изготавливать детали сложной геометрической формы и внутренней структуры материала, использовать новые конструкционные материалы с заранее заданными свойствами, которые трудно обеспечить традиционными методами производства, без использования пресс-форм или дополнительных видов производственного оборудования, в то время как количество отходов материала сокращается практически до нуля, поскольку поврежденные отпечатки или остатки процесса печати могут быть повторно использованы для изготовления новых деталей.

Конструкционный материал для печати зубчатых колес редукторов токарных станков должен обладать высокой механической прочностью и достаточной жесткостью, хорошими свойствами по термической стабильности, износостойкости, коррозионной стойкости, что позволяет ему выдерживать изгибные и контактные нагрузки, противостоять разрушению зубьев при продолжительной эксплуатации.

Анализ наиболее известных материалов для трехмерной печати

Зубчатые колеса из материала PETG, напечатанные на FDM-принтере, имеют более длительный срок службы, чем шестерни из материала PLA, на 22%, а из материала ABC - на 37%. При сравнении износостойкости оказалось, что величина износа зубчатых колес из материала PETG при прочих равных условиях ниже, чем у шестерен из ABC и PLA, на 30% и 40% соответственно [4].

Исследование коррозионных и термических свойств зубчатых колес, изготовленных из пяти различных типов нейлона (нейлон 618, нейлон 645, сплав 910, оникс и нейлон, обработанный методом штамповки) показали, что шестерни из оникса и нейлона 618 имеют относительную стабильность при нагрузке менее 10 нм, но шестерни из оникса немедленно выходили из строя при любой перегрузке [5]. Время работы

шестерен из нейлона 618 было более продолжительным, а уровень шума - лучшим среди пяти материалов [5].

Армирование полиамида РА углеродным волокном CF позволяет увеличить прочность при растяжении на разрыв на 136%. Относительное удлинение при разрушении, с другой стороны, снизилось с 19,6% до 1,3%. Это означает, что материал стал более жестким и прочным, но при этом более хрупким по сравнению с нейлоном.

Добавление углеродного волокна улучшает сцепление между слоями материала и повышает его механическую стойкость, поскольку снижает вероятность расслоения, повышает стабильность размеров и уменьшает деформацию [6].

Образцы, напечатанные методом (FFF) из полимера РА с усилением углеродного волокна или стекла на 25% и на 35 % получили следующие характеристики:

При соотношении 25 %

- Прочность при растяжении на 17,01% выше, прочность при изгибе - на 21,4%, а модуль упругости при изгибе на 91,2% выше, чем у чистого нейлона.
- углеродные волокна равномерно смешиваются со смолой, что обеспечивает высокую адгезионную способность.

При соотношении 35%

- Количество пузырьков увеличивается, и волокна собираются вместе, что снижает прочность на растяжение и изгиб.
- Модуль упругости при растяжении достигает максимального значения, что на 125,37% выше, чем у чистого нейлона.
- Ударопрочность деталей повышается с увеличением содержания углеродного волокна в составе материала.[7]

Согласно отчету "Metals Market – Industry Trends and Forecast to 2028", опубликованному Data Bridge Market Research, ожидается, что рынок металлов для трехмерной печати будет демонстрировать совокупные ежегодные темпы роста на уровне 30,77% в течение прогнозируемого периода с 2021 по 2028 год, и ожидается, что его стоимость достигнет 8464,700 миллионов долларов США.

Следует отметить, что металлы для трехмерной печати изготавливаются в виде порошка или нитей, из титана, никеля, нержавеющей стали, алюминия и других материалов [8].

Сравнительный анализ перечисленных композитов для выбора оптимального материала для печати шестерен редукторов PLA

Проявляет наименьшую износостойкость, прочность при растяжении средняя (50–70 МПа), обладает высокой твердостью, но низкой устойчивостью к долговременным нагрузкам, поэтому демонстрирует хрупкие свойства при высоких нагрузках и неустойчив к вибрациям и ударам. Деформация начинается при температуре около 60 °С.

ABS:

Прочность при растяжении варьируется от 34 до 50 МПа, выдерживает температуры до 100 °С, обладает большей ударной вязкостью по сравнению с PLA.

PETG:

Прочность при растяжении достигает 63 МПа, демонстрирует удовлетворительную износостойкость и трение по сравнению с PLA и ABS. [5,9]

Nylon

618:

Прочность при растяжении в диапазоне 70–84 МПа. Показывает лучшие показатели по износостойкости, трению, сопротивлению вибрациям и ударам, однако гигроскопичен и имеет более высокую стоимость.[10]

РА-CF30 и РА-GF30:

РА-CF30 обладает лучшими свойствами при растяжении, изгибе и упругости, чем РА-GF30, что, в свою очередь, обеспечивает более высокую ударопрочность и меньшую стоимость.[11]

Металлические композиты обладают наилучшей стойкостью к истиранию и трению, а показатели прочности при растяжении более чем в четыре раза превышают показатели вышеперечисленных полимерных материалов. Однако стоимость специализированного печатного оборудования и затраты на изготовление зубчатых колёс из порошковых металлических материалов или металлических нитей существенно выше, чем полимерных композитов, в дополнение к сложности самого процесса печати.

Заключение и выводы

1. Металлические композиционные материалы оправданно применять для изготовления шестерен, работающих в критических условиях эксплуатации, где есть смысл нести расходы и трудности, связанные с их производством.

2. Полимерные композиционные материалы, армированные стекловолокном и углеродными волокнами являются идеальными материалами для печати зубчатых колес, подверженных высоким нагрузкам, вибрации и коррозии.

3. Нейлон 618 с точки зрения эксплуатационных характеристик, коррозионной стойкости и срока службы может быть использован для изготовления шестерен, не подверженных повышенным нагрузкам.

4. PETG – находит применение для изготовления шестерен с точки зрения стоимости и простоты печати, но он подходит для высоких динамических

нагрузок.

5. Полимерные композиционные материалы на основе PLA и ABS не подходят для печати шестерен редукторов.

1. Н.Я. Ниберг. Машиностроение. Энциклопедический справочник, том 11, Москва, Масгиз, 1948, С 456.
2. Б.П. Тимофеев. М.Ю. Сачков, ПЕРЕДАТОЧНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПРИВОДОВ, Санкт-Петербург, Университет ИТМО, 2015, С 103.
3. Отчёт 'Размер мирового рынка 3D-печати, его доля и анализ воздействия COVID-19 по типу принтера , по типу печати , по компонентам , по конечным пользователям и по регионам . , Анализ и прогноз 2022 - 2032 гг', Spherical Insights, 2024,Ид отчёта SI3098, С 200.
4. Mert Safak Tunaliloglu. Bekir Volkan Agca., Wear and Service Life of 3-D Printed Polymeric Gears, Polymers, 2022, Том 14, Номер 10, С 11.
5. Ye Zhang, Chris Purssell. Ken Mao. Simon Leigh., A physical investigation of wear and thermal characteristics of 3D printed nylon spur gears, pre-proof, 2019, С 24.
6. Mumin Tutar, A Comparative Evaluation of the Effects of Manufacturing Parameters on Mechanical Properties of Additively Manufactured PA and CF-Reinforced PA Materials, Polymers, 2022, Том 15, Номер 1, С 15.
7. Yesong Wang. Feilong. Zixuan Sun. Chenyu Gu. Kunkun Fu. Xiangming Zhao., Effect of Fiber Content on the Preparation and Mechanical Properties of 3D Printed Short Carbon Fiber Reinforced PA Composites, Polymers, 2025, Том 17, номер 5, С 17.
8. Varun Juyal, Глобальный рынок нитей для 3D-печати – тенденции отрасли и прогноз до 2028 года, DATA BRIDGE, 2021 , С 350.
9. Sara Wickstrom, PETG vs PLA vs ABS: 3D Printing Strength Compariso, Spherical Insights,2021.
10. James Li, Advanced 3D Printing Materials: A Comprehensive Guide to Performance, Applications, and Innovations, Firstmold,2024.
11. Comparison & Analysis Of PA6 - GF30 & PA6 - CF30 - Carbon Fiber Compounds Manufacturer | Supplier, Carbon (Xiamen)

К ВОПРОСУ О РИСКАХ ЗАМЕНЫ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В ТЕХНИЧЕСКИХ НОРМАТИВНЫХ АКТАХ ПРИ ВЕРИФИКАЦИИ СООТВЕТСТВИЯ ТРЕБОВАНИЯМ

Ромашова Е.Ю.¹

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; romashova@imash.ru

С появлением мощных вычислительных средств стало возможным широкое использование математического моделирования рабочих процессов в машиностроении, что позволяет ускорить процесс выхода продукции на рынок и сократить сроки разработки. В докладе рассматривается проблема, условия и особенности замены на цифровые модели, цифровые двойники физических испытаний в технических нормативных актах.

Вводу в эксплуатацию объектов машиностроения традиционно предшествуют испытания образцов техники, оборудования и пр., проводимые с целью экспериментального определения конструктивных и эксплуатационных характеристик машин (устройств, агрегатов) для выявления их соответствия техническим требованиям или для опытного изучения процессов, происходящих в машинах.

В настоящее время, ряд испытаний целесообразно проводить, используя расчетные модели. При это важно понимать, какой использовать критерий оценки результатов моделирования.

Например, Правило ЕЭК ООН №66 «Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения крупногабаритных пассажирских транспортных средств в отношении прочности их силовой структуры» допускает заменять физический эксперимент расчетными моделями, при этом критерием применения такой замены является – «соответствие целостности остаточного пространства при моделировании». Физический эксперимент проводится следующим образом: опрокидывание транспортного средства из статичного положения на бок, (следует отметить, что не отражает положения при реальной аварийной ситуации) (рис.1, рис.2). Если целостность остаточного пространства при моделировании опрокидывания не нарушается, то официальное утверждение предоставляется.

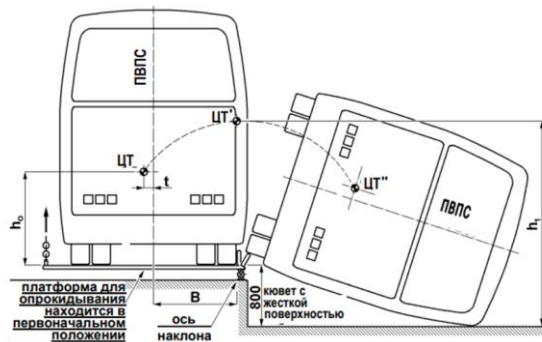


Рис. 1. Испытание на опрокидывание комплектного транспортного средства с указанием траектории перемещения центра тяжести из первоначального положения неустойчивого равновесия



Рис.2. Пример опрокидывания автобуса в результате дорожно-транспортного происшествия

Предлагается математическая модель, учитывающая взаимовлияние рисков [1-3] недостоверности физической модели и расчетной. При этом критерием является приемлемый ущерб (рис.3) [2]. С увеличением точности эксперименты длятся долго, что приводит к задержке выпуска продукции; при малой точности не обосновано увеличивается вероятность причинения ущерба жизни людей. С точки зрения практического применения, критерий расчета становится более объективным – избегаем необоснованных требований при принятии решений замены в технических актах и регламентах физических испытаний на математические модели с применением риск-ориентированного подхода при принятии решений.

$$R^T + R^{MM} \leq [R] \quad (1)$$

где R^T - риск недостоверности физической модели (тест);

R^{MM} - риск недостоверности математической модели;

$[R]$ - совокупный риск.

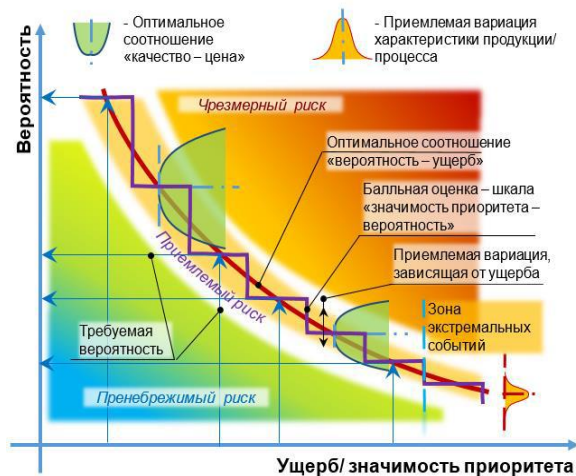


Рис. 3. Модель обеспечения приемлемых рисков

Развитие моделей, методик анализа и управление рисками в процессе риск-ориентированного проектирования в жизненном цикле с использованием математических и цифровых моделей, в том числе на всех этапах жизненного цикла, в том числе «восстановление/ремонт», тиражирования, процесса производства, взаимовлияния рисков вещественной части на физическую и наоборот, является актуальной задачей.

Решение задачи сокращения сроков проектирования, испытаний и подготовки производства на основе применения математических моделей и численных методов на основе риск-ориентированного подхода позволит достигать оптимальных, конкурентоспособных показателей качество–цена–риски соответствия техники и технологий, а также обосновано их использовать в технических нормативных актах при верификации соответствия требованиям.

Научный доклад выполнен в рамках выполнения научной темы FFGU-2024-0024.

1. Махутов Н.А. и др. Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты. Техногенная, технологическая и техносферная безопасность / Под общ. ред. Н.А. Махутова. Москва: Знание, 2018. 1016 с.
2. Панов А.Н., Ерофеев М.Н., Ромашова Е.Ю. Риск-ориентированное проектирование процессов ремонта, восстановления и модернизации объектов машиностроения/ Ремонт. Восстановление. Модернизация. М., 2024 г., №10, с. 21-34.
3. Панов А.Н., Ромашова Е.Ю. Автоматизация риск-ориентированного проектирования техники // Международная конференция «Машины, технологии и материалы для современного машиностроения»: сборник тезисов докладов конференции, посвященной 85-летию Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН – 2023. – С.225.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВРЕМЕНИ ОТРАБОТКИ ТУРБИННОГО МАСЛА НА ЕГО ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧЕТЫРЕХШАРИКОВОЙ МАШИНЫ ТРЕНИЯ

Самусенко В.Д.¹, Яковлева В.А.², Татур И.Р.², Буяновский И.А.¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия; samusenkovd@gmail.com

²РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия

Проведены трибологические испытания масла TANECO Turbine VG32 на четырехшариковой машине трения. Оценивалось изменение противоизносных свойств по диаметру пятна износа в лабораторных условиях. Наблюдалось снижение противоизносных свойств в диапазоне 500–2000 ч отработанного времени, после чего противоизносные свойства восстанавливались, что вероятно связано с доливом масла в систему.

Турбинные масла эксплуатируются в турбоагрегатах длительное время, что требует от них сохранения своих физико-химических свойств в установленных пределах максимально возможное время [1].

В процессе длительной эксплуатации масло неизбежно подвергается воздействию высоких температур, окислению, обводнению и накоплению продуктов износа и загрязнений [2, 3]. Эти процессы приводят к постепенному ухудшению исходных

характеристик масла, что может негативно сказаться на защите узлов трения. В этом контексте оценка

влияния отработанного времени на изменение трибологических свойств масла становится одной из важнейших задач. Трибологические показатели напрямую определяют уровень износа деталей машины и, соответственно, долговечность и надежность дорогостоящего оборудования. Исследование динамики этих свойств в зависимости от наработки позволяет установить предельно допустимое время эксплуатации масла, а также определить эффективность режима доливки «свежего» масла.

В РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина на основе гидроизомеризованного масла VHVI-6 производства АО «ТАНЕКО» с пакетом присадок разработано турбинное масло класса вязкости 32, получившее название TANECO Turbine VG32 (СТО 78689379-36-2018), физико-химические показатели которого приведены в табл. 1.

Для определения соответствия турбинного масла TANECO Turbine VG32 условиям эксплуатации проведена его подконтрольная эксплуатация на турбокомпрессоре Аэроком 43-125/10,2 УХЛ4 [4].

Цели и задачи

Данное исследование ставило задачу оценить изменение трибологических свойств в процессе эксплуатации масла. Пробы масла TANECO Turbine VG32 для трибологических испытаний были отобраны через 500, 1000, 1500, 2000, 4000, 6000 и 8000 ч эксплуатации в турбокомпрессоре.

При опытно-промышленных испытаниях турбокомпрессора образцы турбинного масла TANECO Turbine VG32 анализировали показатели: кинематическая вязкость, кислотное число, цветность,

Таблица 1. Физико-химические показатели турбинного масла TANECO Turbine VG32

Наименование показателя	Метод	Значение показателя
Вязкость кинематическая при 40 °С, мм ² /с	ГОСТ 33	29,508
Индекс вязкости	ASTM D2270	134
Кислотное число, мг КОН/г масла	ГОСТ 11362	0,05
Температура вспышки в открытом тигле, °С	ГОСТ 4333	234
Температура застывания, °С	ASTM D97	-15
Содержание воды, %	ГОСТ 2477	Следы
Класс чистоты	ГОСТ 17216	13
Содержание механических примесей, %	ГОСТ 6370	Отс.

температура вспышки, деэмульгирующую способность, пенообразование, содержание воды, содержание механических примесей, класс промышленной чистоты, антикоррозионные свойства, прирост продуктов окисления, окислительная стабильность, термоокислительная стабильность. Дополнительно определяли содержание металлов и окислительную стабильность по ВКО (метод Лапина – Шора).

Турбинное масло TANECO Turbine VG32 рассматривалось как возможная замена турбинного масла Mobil Teresstic T 32.

Трибологические испытания проводили на стандартной четырехшариковой машине ЧМТ-1 по ГОСТ 9490-75.

Результаты и обсуждение

После 1500 ч эксплуатации турбинного масла TANECO Turbine VG32 в турбокомпрессоре Аэроком 43-125/10,2 УХЛ4 доливали «свежее». Общее количество доливаемого масла за время эксплуатации 8000 ч – 330 л.

На рис. 1 приведены результаты трибологических испытаний отобранных образцов масла на

четырёх-шариковой машине на износ за 1 ч при нагрузке 196 Н, также на рисунке добавлены моменты долива масла в маслобак во время

эксплуатации турбокомпрессора Аэроком 43-125/10,2 УХЛ4.

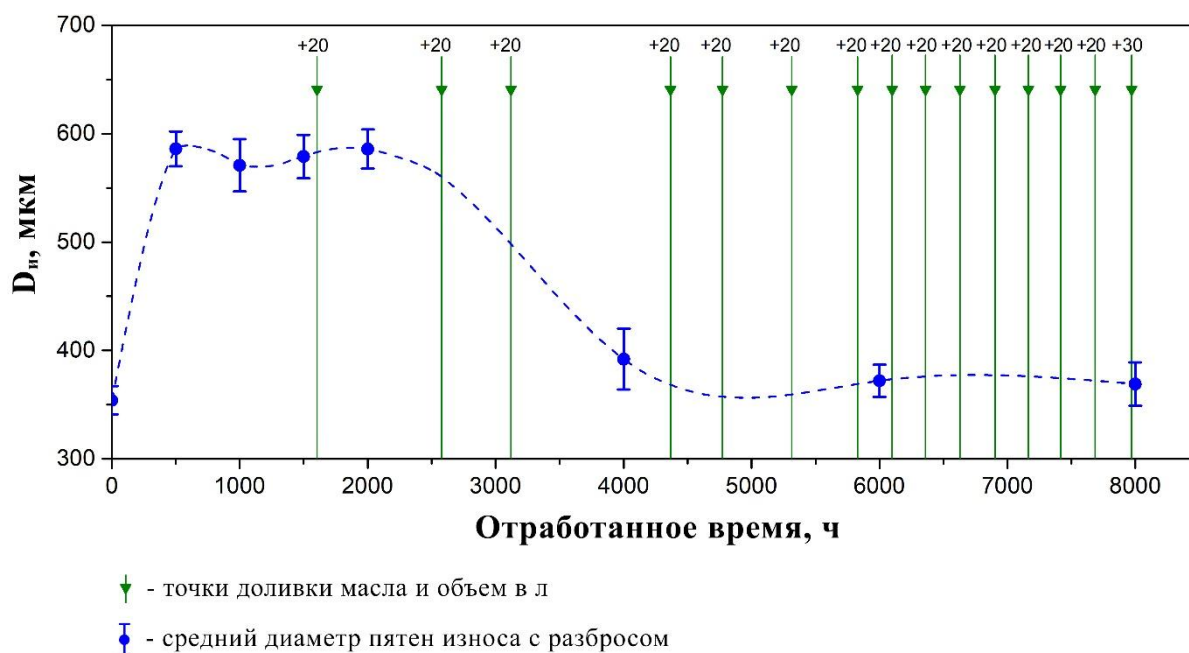


Рис.1. Средний диаметр пятен износа в зависимости от отработанного времени и точки доливки свежего масла

Как видно из рис. 1 противоизносные свойства снижаются со временем эксплуатации масла (500 ч), после чего стабилизируются примерно на одном уровне (до 2000 ч), и с началом активной доливки масла противоизносные свойства восстанавливаются почти до начальных значений и остаются на этом уровне до конца эксплуатации (8000 ч).

Вероятно, снижение диаметра пятен износа при 4000 ч и далее связано с началом постоянной доливки масла в систему, что приводит к поступлению свежей порции масла с присадками, за счет которых и снижается износ, так как физико-химические свойства за период эксплуатации масла в системе менялись не значительно.

Заключение

Турбинное масло TANECO Turbine VG32 по физико-химическим показателям и окислительной стабильности не уступает турбинному маслу Mobil Teresstic T 32, и оно может быть использовано при эксплуатации турбокомпрессора Аэроком 43-125/10,2 УХЛ4 [4].

На начальном этапе у турбинного масла TANECO Turbine VG32 незначительно снижаются противоизносные свойства, однако в результате постоянной доливки масла после 1500 ч

эксплуатации, противоизносные свойства стабилизировались и показывают результат близкий к свежему маслу, что является по всей видимости следствием обновления масла. В масляную систему начинает поступать свежий объем масла с присадками, которые и обеспечивают противоизнос-ные свойства маслу.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Научоёмкие технологии создания машин будущего» Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Москва, Россия).

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0023

1. Herguth W.R., Warne T.M. (ed.). Turbine lubrication in the 21st century. – ASTM International, 2001. – Т. 1407.
2. Livingstone G.J., Thompson B.T., Okazaki M.E. Physical, performance, and chemical changes in turbine oils from oxidation. – 2007.
3. Zachary J. Evaluating Performance Degradation in Gas Turbines: A Challenging Task //ASME Power Conference. – 2005. – Т. 41820. – С. 1149-1155.
4. Татур И.Р., Зурбашев А.В., Яковлева В.А. и др. Опыт-промышленные испытания турбинного масла TANECO Turbine 32 на турбокомпрессоре АЭРОКОМ 43-125/10,2 УХЛ // Мир нефтепродуктов. – 2024. – № 4. – С. 26-30.

ОСОБЕННОСТИ НАСТРОЙКИ И РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ШЕСТИЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА RUKA В ЗАДАЧАХ, ТРЕБУЮЩИХ ВЫСОКОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ

Сафонова Н.К.¹, Щербов Р.М.^{1*}

¹НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

*E-mail (scherbovrn@imec.msu.ru):

В докладе рассматривается задача стабилизации неустойчивого положения равновесия шара, расположенного на горизонтальной платформе, подвешенной к захвату манипулятора RUKA. Целью исследования является разработка алгоритма управления наклоном платформы, обеспечивающим заранее заданные параметры переходного процесса движения шара. Для этого построена математическая модель системы, проведен анализ её управляемости и устойчивости, предложен в виде обратной связи алгоритм стабилизации неустойчивого положения равновесия.

Отдельно рассматривается архитектура системы: шестиосевой манипулятор RUKA с шаговыми приводами, программное обеспечение (ПО) среднего слоя Surpal, транспортная шина CAN FD, коммуникационное ПО верхнего уровня ROS2. Особое внимание уделяется комплексному подходу к снижению временных задержек на всех уровнях программной архитектуры: от алгоритмов верхнего уровня и оптимизации коммуникаций (CAN FD, ROS2) до особенностей прошивки драйверов двигателей (STM32G474, TMC5160). Представлены прикладные подходы, обеспечивающие требуемое быстродействие для стабилизации неустойчивой системы.

Численные и экспериментальные исследования подтверждают эффективность предложенных теоретических и архитектурных подходов. Результаты работы могут быть использованы для оптимизации алгоритмов управления коллаборативными роботами, а также для тестирования и улучшения систем управления роботом-манипулятором.

Особый интерес в современной робототехнике и теории управления вызывают системы с ограниченной величиной управляющих воздействий, что требует разработки специальных алгоритмов, способных стабилизировать объект при наличии нелинейностей в системе и внешних возмущений [1]. Одной из таких задач является стабилизация шара на горизонтальной платформе, подвешенной на захвате шестиосевого манипулятора. Важно, что положение равновесия шара в заранее заданной точке даже при горизонтальном расположении платформы является неустойчивым.

Целью данной работы является создание алгоритма управления наклоном платформы, который обеспечивает заранее заданные параметры переходного процесса движения шара.

Актуальность задачи стабилизации неустойчивых механических систем, обусловлена их теоретической сложностью и практической значимостью в робототехнике. Такие задачи относятся к классу проблем с ограниченными управляющим воздействием и существенными нелинейностями, успешное решение которых необходимо для создания роботов, работающих в недетерминированных условиях, включая коллаборативных роботов (коботов), антропоморфных роботов, а также систем активной стабилизации. Целью данной работы является разработка и экспериментальная проверка алгоритма управления и программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего заданные параметры переходного процесса при стабилизации шара на платформе подвешенной на манипуляторе.

Для проведения исследований в лаборатории робототехники НИИ Механики МГУ имени М.В.Ломоносова разработан шестизвонный манипулятор RUKA. В основе его управления

лежит решение прямой (ПЗК) и обратной задач кинематики (ОЗК) в пространстве бикватернионов [2],[3], предложенный подход обеспечивает высокую вычислительную эффективность. Использование бикватернионов позволяет снизить расчетную сложность решения ОЗК и ПЗК на 30% и 50% соответственно [4] по сравнению с традиционными методами на основе матриц поворота и углов Эйлера, что критически важно для повышения частоты цикла управления.

Построена нелинейная математическая модель системы «манипулятор–платформа–шар», проведён анализ её управляемости и устойчивости [5].

Для точного оценивания вектора состояния системы (положения и скорости шара) используется фильтр Калмана, в прогнозном звене которого заложена построенная нелинейная модель. Это позволяет существенно повысить точность и помехозащищенность оценки по сравнению с численным дифференцированием сигналов с датчиков.

Ключевым аспектом работы является ключевая программно-аппаратная архитектура, спроектированная для минимизации временных задержек на всех уровнях.

Для задач управления робототехническими системами, особенно неустойчивыми, используется классификация операционных систем реального времени, описанная далее.[6]

1. Системы жесткого реального времени (Hard Real-Time), где невыполнение задачи в заданный срок считается критическим. Пример: антиблокировочная система торможения в автомобиле, управление подушками безопасности. 2. Системы мягкого реального времени (Soft Real-Time), в которых изменение времени отклика допустимы и приводят лишь к снижению качества работы системы, но не к катастрофическим

последствиям. Пример: потоковое видео, аудио-коммуникации. 3. Твердые системы реального времени (Firm Real-Time) - промежуточный класс, где редкие сбои допустимы, но их частое возникновение делает систему непригодной к использованию.

Задача стабилизации шара манипулятором RUKA относится к классу систем жесткого реального времени. Пропуск итераций в цикле управления может привести систему к границе устойчивости, что в свою очередь приведет к невозможности управления и срыву эксперимента.

Стандартное ядро Linux (например, дистрибутивы Ubuntu, Debian) не является системой жесткого реального времени. Использование стандартного ядра приводит к следующим известным проблемам:

1. Задержка вытеснения - время между возникновением прерывания и началом выполнения соответствующей задачи ядра может быть недетерминированным и достигать десятков миллисекунд.

2. Инверсия приоритетов - ситуация, когда низкоприоритетная задача блокирует ресурс, необходимый высокоприоритетной задаче.

3. Влияние фоновых процессов: Процессы ядра (например, связанные с файловой системой, журналированием, передачей данных по сети) могут непредсказуемо задерживать выполнение критических задач.

Совокупность данных проблем может приводить к смещению временного интервала итерации управляющего цикла на сотни миллисекунд, что в случае с решением задач управления именно неустойчивыми системами критично для обеспечения устойчивости решения.

Для исключения влияния известных проблем применен патч PREEMPT_RT [7], который трансформирует стандартное ядро Linux в систему, пригодную для задач мягкого и жесткого реального времени, путем внесения фундаментальных изменений:

1. Полная вытесняемость ядра означает, что высокоприоритетная пользовательская задача контроллера управления может прервать выполнение низкоприоритетной задачи, запущенной от имени ядра, радикально снижая задержки.

2. Замена спин-блокировок на мьютексы. Спин-блокировки, которые в стандартном ядре приводят к "холостому" ожиданию процессора, заменяются на вытесняемые мьютексы. Это позволяет переключаться на другие задачи, пока ресурс заблокирован.

3. Обработчики прерываний выполняются как отдельные, планируемые потоки ядра с назначаемыми приоритетами. Это предотвращает ситуацию, когда длительный обработчик прерывания блокирует все другие процессы.

4. Повышение разрешения системных таймеров

(порядка микросекунд) обеспечивает точность выдерживания частоты цикла управления.

Несмотря на существенные изменения в ядре Linux при применении PREEMPT_RT, используемая операционная система в остальном остается стандартным Linux, что позволяет применять широкий инструментарий пакетов классических репозиториях.

Для обеспечения детерминированного отклика в системе управления манипулятором RUKA на уровне операционной системы предприняты следующие шаги:

1. Собрано и установлено ядро Linux с активным патчем PREEMPT_RT.

2. В конфигурации ядра выбран режим полной вытесняемости (CONFIG_PREEMPT_RT=y).

3. Процесс, содержащий алгоритм управления манипулятором, запущен с политикой планирования SCHED_FIFO (First-In-First-Out). Данной политике был назначен наивысший статический приоритет (например, 99). Таким образом процесс контроллера получает ресурс процессора немедленно, как только он готов к выполнению, и работает до тех пор, пока не завершит свою итерацию или не будет вытеснен процессом с более высоким приоритетом.

4. На время экспериментов отключено системное логирование (systemd-journald) и другие фоновые службы, создающие нагрузку на ввод-вывод и процессор.

5. Использована функция isolcpus для изоляции одного ядра процессора от общего планировщика задач. Это позволяет закрепить процесс контроллера на выделенном ядре, чтобы другие процессы системы ему не мешали.

6. Частота процессора зафиксирована на максимальном значении для исключения задержек, связанных с динамическим изменением частоты.

Бенчмарки, проведенные с помощью утилиты cyclictst, показали, что максимальная задержка в системе с PREEMPT_RT снижена с ~15000 мкс в стандартном ядре до ~70 мкс в оптимизированном. Такое снижение на два порядка величины обеспечило необходимый детерминизм для стабильной работы контура управления манипулятором RUKA на частотах выше 1 кГц.

Для выполнения высокоуровневых алгоритмы управления и планирования траектории манипулятора, использован ROS2 [8], что обеспечивает модульность, масштабируемость и удобство разработки. Для уменьшения задержек на этом уровне программной архитектуры применено управление политикой Уровня Сервиса (QoS) и применен best-effort профиль QoS для подписчиков и издателей реализующих обратную связь от системы компьютерного зрения. Смена типа DDS используемого в ROS2 фактически не дала статистически различимых изменений снижения задержек. Для улучшения скорости расчетов ROS2-нода, реализующая алгоритмы контроллера,

написана на C++. При сравнении быстродействия алгоритмов контроллера, написанного на C++ с прототипом данной ноды, написанной на Python3, было зафиксировано повышение скорости расчетов более чем на порядок. Кроме того, с целью снижения джиттера в ROS2 также, как и в Linux отключено журналирование в момент проведения экспериментов для исключения внезапных задержек.

Для детерминированной коммуникации между узлами использовался протокол Cyphal [9], работающий поверх высокоскоростной шины физического уровня CAN FD. Структуры данных для передачи телеметрии о положении приводов и нисходящих команд управления специально спроектированы таким образом, чтобы целиком помещаться в один расширенный фрейм CAN FD. Это позволило избежать накладных расходов, связанных с фрагментацией и сборкой пакетов.

Низкоуровневое управление шаговыми приводами реализовано на микроконтроллере STM32G474 в связке с драйверами TMC5160. В прошивке драйвера используется подход, при котором основной цикл управления получает из Cyphal только лишь уставки и применяет их при выставлении режимов для драйверов двигателя через SPI. Оптимизация прошивки, включая использование прямого доступа к памяти (DMA) и прерываний с высоким приоритетом, позволило минимизировать задержки на уровне исполнительных механизмов. Кроме того, отказ от использования RTOS для основного цикла и запрет на применение уставок управления внутри прерываний приема сообщений позволили более четко управлять частотой цикла и улучшили возможности отладки.

Результаты и обсуждение

Численные и экспериментальные исследования подтвердили работоспособность и эффективность предложенного подхода. Установлено, что разработанная архитектура позволяет достичь необходимого быстродействия для стабилизации неустойчивого объекта в реальном времени. Комплексный подход к оптимизации задержек — от использования низкозатратных алгоритмов расчета состояния системы до оптимизации программного обеспечения на всех уровнях системы управления — оказался решающим фактором для успешного выполнения задачи.

Разработанный комплекс алгоритмов и программно-аппаратных решений позволяет эффективно управлять неустойчивыми динамическими системами. Результаты работы могут быть использованы:

- В коллаборативной робототехнике для повышения точности и плавности движений.
- В качестве тестового стенда для валидации алгоритмов управления и коммуникационных протоколов.
- В образовательных целях для изучения нелинейного управления робототехники и мехатроники.

Перспективы дальнейших исследований включают внедрение адаптивных и нелинейных законов управления, уточнение описания системы с учетом неголономности движения шара и упругости кронштейнов крепления, а также исследование влияния временных задержек на устойчивость системы в замкнутом контуре.

1. Формальский А.М. Управление движением неустойчивых объектов. - М.: Физматлит, - 2013. - 232 с.
2. Челноков Ю.Н. Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения. Геометрия и кинематика движения. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006 – 512 с.
3. Климов К.В., Рогачев А.А., Сафонова Н.К., Щербов Р.М. Решение задачи кинематики шестизвенного манипулятора RUKA в аппарате бикватернионов. // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2025. - №4. 45-50 с.
4. Решение обратной задачи кинематики для 6-ти звенного манипулятора в пространстве бикватернионов. Сафонова Н.К.// в сборнике Тезисы Конференции-конкурса молодых ученых Научно-исследовательского института механики МГУ имени М.В. Ломоносова, 14-15 октября 2024 года / под ред. проф. В. А. Самсонова, Издательство Московского университета Москва.
5. Метод назначения спектра в синтезе управления, стабилизирующего неустойчивое равновесие шара, подвешенного на манипуляторе 2025 Сафонова Н. К. // в сборнике Тезисы Конференции-конкурса молодых ученых Научно-исследовательского института механики МГУ имени М.В. Ломоносова, 13-15 октября 2025 года.
6. Kopetz H, Steiner W., Real-Time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Applications. Springer 2022.
7. Проект Real-Time Linux. [Электронный ресурс] /. — Режим доступа: <https://wiki.linuxfoundation.org/realtime/start> — Дата обращения: 20.09.2025.
8. Метаоперационная система ROS2 [Электронный ресурс] /. — Режим доступа: <https://docs.ros.org/en/jazzy/> — Дата обращения: 20.09.2025.
9. OpenCyphal [Электронный ресурс] /. — Режим доступа: <https://opencyphal.org> — Дата обращения: 20.09.2025

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ МИГРАЦИЯ ОБЛАСТИ МАКСИМАЛЬНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ УГЛЕПЛАСТИКА В ПРОЦЕССЕ МЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Северов П.Б.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; alpinprom@yandex.ru

С применением акустико-эмиссионного метода экспериментально доказано наличие миграции области максимальных повреждений углепластика при повторном квазистатическом нагружении в условиях стесненной деформации. Проведённое исследование демонстрирует общий подход к описанию неупругой деформации и разрушения различных твердых тел как процесса их эволюции в полях действующих сил.

Цель

В соответствии с традиционными представлениями механики деформируемого твёрдого тела, локальное разрушение в твёрдом теле происходит при достижении предельного напряжения. В простейшем случае одноосного растяжения такое напряжение определяется по диаграмме деформирования тестового образца из применяемого материала. Предельное состояние реальных конструктивных элементов реализуется в зонах концентрации напряжений. Но окончательное макроскопическое разрушение происходит не обязательно строго в этих зонах, а, как правило, на некотором расстоянии от них. В работе предпринята попытка экспериментальным путем доказать наличие пространственно-временной миграции области максимальных повреждений однонаправленного углепластика при повторном квазистатическом растяжении образца в условиях стесненной деформации. Критерием достоверности предлагаемого метода выступает определяемое в работе перемещение указанной области вдоль образца до места окончательного разрушения.

Материалы и методы

Образец для испытаний «рис. 1» вырезан из однонаправленной плиты углепластика на основе эпоксидного связующего вдоль укладки углеродных волокон. Геометрические размеры образца: общая длина ≈ 330 мм, размеры минимального поперечного сечения рабочей зоны $26,15 \times 4,06$ мм, длина рабочей зоны ≈ 40 мм, радиус кривизны рабочей зоны ≈ 120 мм. Ось абсцисс x совпадает с продольной осью симметрии образца. Начало оси абсцисс выбрано на расстоянии 61,2 мм слева от минимального поперечного сечения рабочей зоны.

Повторное квазистатическое растяжение образца осуществлялось в условиях стесненной деформации. Перемещение активного захвата увеличивалось при этом на 100 мкм от цикла к циклу. На участках увеличения перемещения скорость перемещения захвата поддерживалась постоянной, 5 мкм/сек. Длительность выдержек для максимального и минимального значений перемещения, а также длительность участков уменьшения перемещения в каждом цикле

нагружения до первоначального значения 0,05 мм составляла 20 секунд.

Пространственно-временная миграция области максимальных повреждений определялась методом акустической эмиссии. Из всего массива акустико-эмиссионных (АЭ) импульсов, зарегистрированных за все время нагружения образца, отобраны 2953 пары импульсов, удовлетворяющих критерию нахождения в зоне линейной локации между центрами преобразователей АЭ. Каждой паре отобранных импульсов соответствовал один лоциро-ванный источник АЭ. Все остальные парные и непарные импульсы из рассмотрения удалялись.

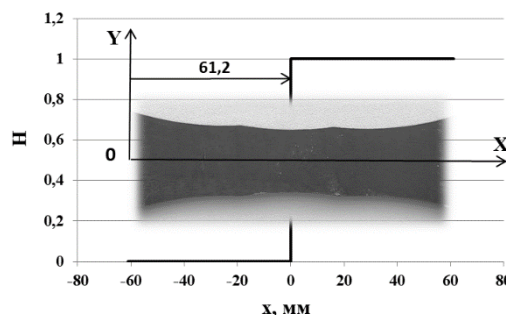


Рис. 1. Образец до испытания с указанием потенциального места разрушения в зоне концентрации напряжений

Окончательное разрушение в гипотетически идеальном случае можно представить в виде мгновенного разделения образца на две части без предшествующего процесса накопления повреждений в объеме материала. Один импульс и один выброс энергии описываются функцией Хэвисайда, однозначно указывающей на потенциальное место разрушения по координате $x = 61,2$ мм в зоне концентрации напряжений. Будем считать это первым вариантом координаты места окончательного разрушения образца. Такая ситуация показана на «рис. 1».

Результаты и их обсуждение

Распределение 2953 источников АЭ по длине образца показано на «рис. 2». При фиксированной минимальной разности времени прихода упругой волны напряжения на пьезоэлектрические датчики 1 мкс и скорости волны 1,6 мм/мкс координаты x_i

источников АЭ определялись с дискретностью 0,8 мм. Второй вариант координаты места окончательного разрушения образца получим осреднением всего количества координат источников АЭ - 57,58 мм. Это значение находится слева от координаты минимального поперечного сечения рабочей зоны образца. Допустимо ли считать такой способ оценки координаты места окончательного разрушения убедительным? Скорее всего, нет, так как среднее значение всего количества координат источников АЭ точно указывало бы на место окончательного разрушения только в том случае, если бы микроразрушения произошли одновременно во всех зарегистрированных источниках АЭ, распределение которых представлено на «рис. 2».

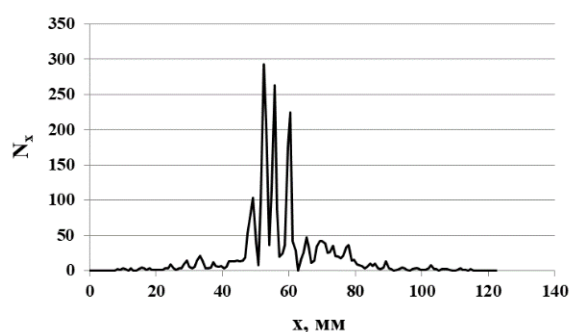


Рис. 2. Распределение 2953 источников АЭ по длине образца с шагом 0,8 мм

Такое разрушение можно рассматривать в качестве гипотетически возможного мгновенно-статического разрушения с распределенными по объему материала не влияющими друг на друга повреждениями. Однако при нагружении образца происходит зарождение и взаимодействие повреждений, механические свойства материала постоянно изменяются во времени вследствие накопления повреждений.

На «рис. 3» показана последовательность координат источников АЭ, зарегистрированных во времени эксперимента. На этом и следующем рисунках

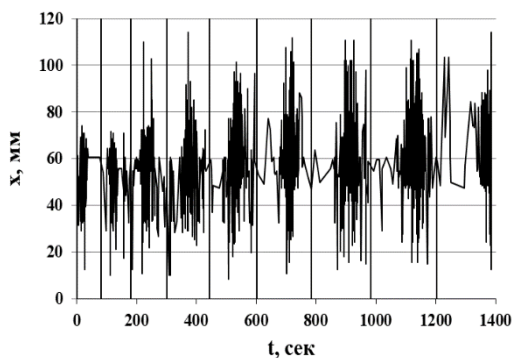


Рис.3. Координаты источников АЭ по длине образца во времени

вертикальные линии разграничивают соседние циклы нагружения. В данном случае пространственно-временную миграцию области максимальных повреждений углепластика оценим путем осреднения координат источников АЭ в каждом цикле нагружения, а также посредством полиномиальной аппроксимации последовательности их координат. Указанные оценки приведены на «рис. 4».

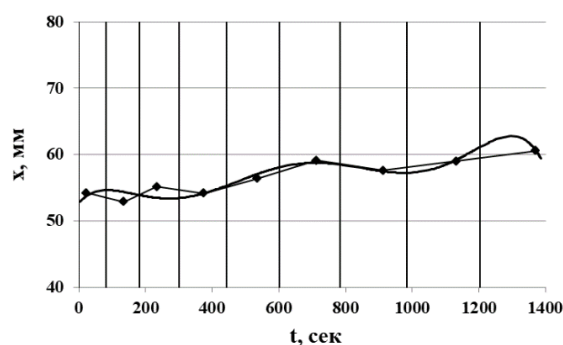


Рис. 4. Рабочая зона образца. Средняя координата источников АЭ в каждом цикле нагружения в зависимости от среднего времени событий в этом же цикле (кусочно-линейная кривая) и полиномиальная аппроксимация координат источников АЭ во времени (гладкая кривая)

Третий вариант координаты места окончательного разрушения образца получим осреднением координат источников АЭ в последнем девятом цикле нагружения – 60,53 мм.

Для более точного определения координаты места окончательного разрушения образца подробно рассмотрим девятый цикл нагружения, в котором произошло макроскопическое разделение на две части. После этого рассмотрим также последние шесть секунд нагружения образца непосредственно перед окончательным разрушением.

На «рис. 5» показана последовательность координат источников АЭ по длине образца во времени, зарегистрированных в девятом цикле нагружения.

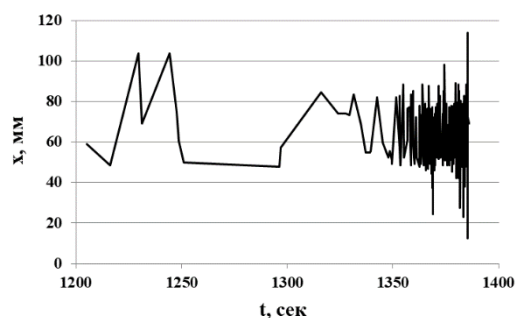


Рис.5. Девятый цикл нагружения. Координаты источников АЭ по длине образца во времени

Пространственно-временную миграцию области максимальных повреждений углепластика в

последнем цикле нагружения оценим аналогичным способом: осреднением координат источников и их полиномиальной аппроксимацией. Для этого девятый цикл нагружения разобьём по времени следующим образом: с 1205 по 1355 секунду, с 1355 по 1380 секунду на равные промежутки длительностью по 5 секунд и с 1380 секунды до момента разрушения образца на 1385,88 секунде. Указанные оценки приведены на «рис. 6». Четвертый вариант координаты

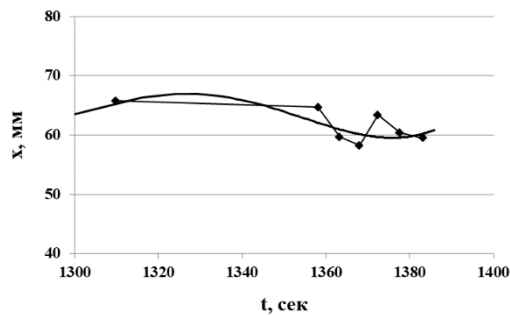


Рис. 6. Девятый цикл нагружения. Средняя координата источников АЭ на каждом временном промежутке в зависимости от среднего времени событий на этом же промежутке (кусочно-линейная кривая) и полиномиальная аппроксимация координат источников АЭ во времени (гладкая кривая)

места окончательного разрушения образца получим осреднением координат источников АЭ на временном промежутке с 1380 секунды до момента разрушения образца – 59,46 мм.

На «рис. 7» показана последовательность координат источников АЭ по длине образца во времени, зарегистрированных на последних шести секундах нагружения непосредственно перед окончательным разрушением. Аналогичным способом оценим

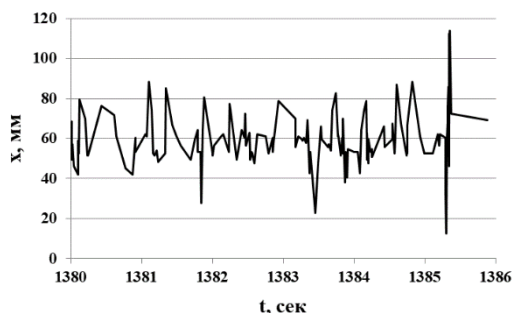


Рис. 7. Последние шесть секунд нагружения. Координаты источников АЭ по длине образца во времени

пространственно-временную миграцию области максимальных повреждений углепластика на последних шести секундах нагружения непосредственно перед окончательным разрушением. Указанные оценки приведены на «рис. 8». Последний вариант координаты места окончательного разрушения получим осреднением

координат источников АЭ на последней секунде нагружения перед разрушением образца – 65,54 мм. В результате проведенного исследования получили пять вариантов координаты места окончательного разрушения образца из углепластика при повторном квазистатическом растяжении в условиях стесненной деформации: в зоне концентрации

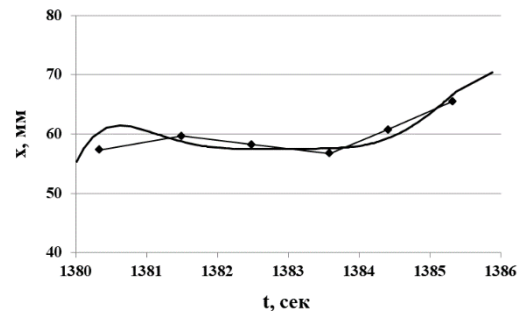


Рис. 8. Последние шесть секунд нагружения. Средняя координата источников АЭ за каждую секунду в зависимости от среднего времени событий за эту же секунду (кусочно-линейная кривая) и полиномиальная аппроксимация координат источников АЭ во времени (гладкая кривая)

напряжений – 61,2 мм; осреднением всего количества координат источников АЭ – 57,58 мм; осреднением координат в последнем цикле нагружения – 60,53 мм; осреднением координат на шести секундах до разрушения – 59,46 мм и осреднением координат на последней секунде до разрушения – 65,54 мм.

На «рис. 9» показаны две части разрушенного в результате проведенного эксперимента образца. После несложных измерений определена координата места окончательного разрушения – 64,5 мм. Таким

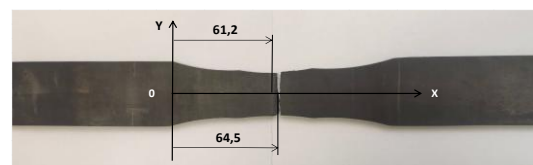


Рис. 9. Образец после испытания с указанием координаты места окончательного разрушения

образом наилучшим приближением к месту окончательного разрушения оказалось осреднение координат источников АЭ на последней секунде до разрушения – 65,54 мм.

Выводы

Экспериментально доказана пространственно-временная миграция области максимальных повреждений [1] однонаправленного углепластика при повторном квазистатическом растяжении образца в условиях стесненной деформации.

При помощи метода акустической эмиссии,

позволяющего отслеживать накопление повреждений в процессе нагружения, установлено перемещение области максимальных повреждений углепластика вдоль образца до места окончательного разрушения.

Работа выполнена за счет средств

Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0020.

1. Макаров П.В., Еремин М.О. Модель разрушения хрупких и квазихрупких материалов и геосред // Физическая мезомеханика. 2013. Т.16. №1. С. 5-26.

СТРУКТУРНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ОТКАЗОВ ТОРЦОВЫХ ЧЕРНОВЫХ ФРЕЗ

Сидорова Д.М.¹

¹ РТУ МИРЭА-Российский технологический Университет, Москва, Россия; dasha.sidorova1110@yandex.ru

В докладе представлена классификация отказов режущего инструмента, использующая структурное представление о режущем инструменте. Классификация представляет собой двухмерную матрицу, различающую отказы по уровням и степеням.

Целью существования любой продукции является обеспечение её эффективности и качества. Исходные данные для оценки этих характеристик получают путём анализа отказов продукции при её эксплуатации. Поэтому важное место в решении данной задачи принадлежит созданию классификации отказов продукции. Классификацию рассмотрим на примере режущего инструмента.

Большим недостатком существующих классификаций отказов инструмента является нечеткое представление о структуре его конструкции и взаимосвязи с ней вариантов отказов. Для устранения данного недостатка воспользуемся обобщенной структурной моделью конструкции, представленной в работе [1].

Кратко опишем представленную модель конструкции. Так как структурно различные уровни конструкции одинаковы, то на рисунке представлен лишь некоторый отдельный уровень её обобщенной структуры. На каждом из уровней в иерархии конструкции предусматриваются количественный и качественный подуровни. На качественном подуровне конструкция делится на основание, промежуточную и рабочую части, на количественном подуровне каждая из этих частей может состоять как из одного, так и из нескольких элементов. Вспомогательные части конструкции обеспечивают взаимодействие основных частей конструкции. Они имеют свою – особую структуру, представленную на рисунке 1 в виде тройных связей, обозначающих процессы предварительного ориентирования, базирования и закрепления.

Для получения наименований терминов, определяющих отдельные классификационные уровни конструкций, воспользуемся уже имеющимся опытом их описания.

Причём, для ухода от шкалы наименований уровни конструкций будем оговаривать по наименованию их рабочих частей, указывающих на процесс, который обеспечивает данная конструкция. Кроме того, конкретизируем ситуацию, для примера описав процесс фрезерования плоскости некоторой детали торцовой фрезой с механическим креплением сменных многогранных пластин.

Обобщая результаты анализа терминологии по материалам ГОСТ 14.004-83, ГОСТ 23004-78, ГОСТ 3.1109-82, ГОСТ 3.1702-79, ГОСТ 21495-76, ГОСТ 25751-83, ГОСТ 25761-83, ГОСТ 25762-83 получаем наименования уровней локальной классификации конструкций, включающей режущий инструмент:

- промышленность всей страны,
- отрасль промышленности,
- территориально-экономический регион,
- производственные фирмы или научно-производственные объединения,
- предприятие,
- группа однородных цехов,
- цех,
- производственный участок, линия или отделение механической обработки,
- рабочее место фрезеровщика,
- фрезерный станок,
- рабочая часть фрезерного станка (рабочее пространство),
- режущий инструмент (торцовая фреза),
- рабочая часть инструмента,
- рабочий элемент инструмента (зуб фрезы),
- режущая часть инструмента (сменная многогранная пластина),
- режущий элемент инструмента (лезвие)

То есть данный перечень представляет иерархическую часть конструкций, включающую режущий инструмент. Нас интересуют уровни, начиная с режущего инструмента и ниже. Необходимость учёта уровня конструкции инструмента при анализе его отказов показана в работе [2].

Многообразие отказов устанавливается по тем следам, которые оставляют процессы, в которых участвует инструмент на протяжении всего его жизненного цикла.

Тогда, согласно приведённым выше структурной модели и классификационным уровням конструкции будем различать следующие уровни отказов инструмента:

- отказ инструмента в целом, когда требуется замена его целиком;
- отказ рабочей части инструмента, т.е. сразу нескольких его рабочих элементов;
- отказ одного рабочего элемента инструмента;
- отказ режущей части инструмента, т.е., например, твердосплавной пластины;
- отказ режущего элемента, т.е. отдельного лезвия, например многогранной режущей пластины.

Прежде, чем приступить к анализу отказов инструмента и его элементов на отдельном уровне, примем следующее положение: отказавшими будем считать части инструмента и инструмент в целом, подлежащие замене в процессе устранения отказа.

Повреждению при эксплуатации наиболее

подвержены именно те части конструкции режущего инструмента, которые ближе всего расположены к области протекания процесса резания, т.е. его рабочая часть.

На основании анализа современных представлений о качественном составе отказов режущего инструмента, могут быть выработаны определения, согласно которым для его режущих частей существуют три стадии отказов, определяемые терминами: износ, скол, поломка. Эти термины в настоящее время имеют наибольшую применимость при определении состояния режущих частей после работы.

К износу относятся случаи образования на режущих кромках дефектов в виде износа, а также выкрашивания и мелких сколов режущих кромок, величина которых не превышает предельно допустимого износа, и требующие обновления режущих кромок, без учета состояния режущей части (пластины) после эксплуатации, предшествующей данному периоду наработки на отказ. Такие отказы предполагают постепенный выход инструмента из строя.

К сколу относятся дефекты, имеющие характер излома, величина которого может не превышать предельно допустимого износа при появлении на кромках не являющихся режущими, во всех остальных случаях величина таких дефектов превышает предельно допустимый износ. Наличие дефектов такой стадии отказа позволяет использовать твердосплавную пластину в качестве режущей хотя бы еще один раз без учета ее состояния после эксплуатации, предшествующей данному периоду наработки на отказ.

К поломке относятся случаи изломов режущих пластин, не позволяющих далее использовать твердосплавную пластину без учета ее состояния после эксплуатации, предшествующей данному периоду наработки на отказ.

У остальных деталей и узлов инструмента, например, державок, подкладок, корпусов фрез и так далее, также имеют место три стадии выхода из строя, характеризующихся следующими определениями:

а) когда эти детали постепенно выходят из строя, т.е. с постепенным накоплением повреждения – первая стадия;

б) когда выход из строя происходит внезапно (сразу), но детали могут быть отремонтированы (это рационально) и вновь использованы – вторая стадия;

в) когда внезапный выход из строя является окончательным и восстановление деталей невозможно или нецелесообразно – третья стадия.

Из вышеизложенного видно, что имеется явная аналогия между определениями износа, скола и поломки режущих элементов и определениями стадий выхода из строя других деталей и узлов конструкции инструмента. Следовательно, износ можно отнести к I-ой стадии выхода из строя

режущей части инструмента, скол ко II-ой, а поломку к III-ей.

Итак, имеется аналогия между стадиями выхода из строя различных уровней конструкций инструментов. Т.е. появилась определенность с точки зрения степени потери работоспособности основными частями инструмента. Но осталась некоторая неопределенность объема конструкции, выходящего из строя при той или иной стадии отказа с точки зрения вспомогательных частей инструмента. Однако заметим, что выход из строя вспомогательных частей, вызывает отказы соответствующих основных частей конструкции инструмента.

Теперь, для построения классификации, следует принять следующие положения, уточняющие взаимосвязь стадий и уровней отказа конструкции инструмента.

Отказ инструмента на определенном уровне происходит в случае, если использованы, т.е. поочередно получили разрушения различных стадий все рабочие элементы нижнего уровня, входящие в состав элемента рассматриваемого уровня, что равносильно

I-ой стадии отказа рассматриваемого уровня.

II-ая стадия отказа элемента рассматриваемого уровня предусматривает одновременный отказ II-ой и III-ей стадий сразу нескольких, но не всех элементов нижнего смежного уровня.

III-я стадия отказа рассматриваемого уровня предусматривает отказ всего элемента одновременно, т.е. невозможность его дальнейшего использования. При этом ряд элементов нижнего смежного уровня, в том числе и рабочие, могут не иметь повреждений, но в связи с повреждениями смежных элементов этого уровня их дальнейшее использование в составе отказавшего элемента рассматриваемого уровня невозможно.

Очевидно, что рациональной можно считать работу инструмента лишь при получении им разрушений I-ой стадии.

Классификацию отказов инструмента представим в виде матрицы, объединяющей уровни и стадии отказов элементов его конструкции и показанной в таблице 2.

По вертикальной оси матрицы располагаются стадии отказов инструмента, по горизонтальной – уровни отказа, определяющие выходящий из строя объем инструмента.

Как видим, данная классификация позволяет упорядочить представления об отказах инструмента, отнеся к их соответствующим уровням и стадиям.

Однако, полученная классификация отказов режущего инструмента, как уже было замечено выше, не оговаривает выхода из строя вспомогательных частей его конструкции. Кроме того, за скобками рассмотрения остался анализ взаимосвязей между видами выхода из строя продукции, ее собственными параметрами и условиями применения, т.е. определение причинно-

следственных связей.

Данное исследование было проведено по выполнению за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2025-0002.

1. Пухальский В. А., Сидоров И.М., Албагачиев А.Ю.

Структурный подход к обеспечению качества продукции // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. Выпуск 10, Изд. ТулГУ, Тула, 2024, с. 107-110

2. Пухальский П. В., Пухальский В. А. Анализ статистических данных состояния торцовых фрез после их работы //СТИН №4, 2011, с. 9-13

РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕНИЯ ПРИВОДА ОРИЕНТАЦИИ В ВАКУУМЕ

Смирнов Н.И.¹, Волков М.В.²

¹ Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; smir1947@yandex.ru

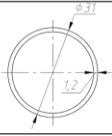
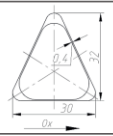
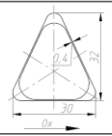
² ООО «Бюро 1440»

В работе представлены результаты исследования возможности модернизации конструкции каркасов планарных солнечных батарей, улучшение их массово-габаритных характеристик. Приведено описание разработанного трибологического стенда для исследования трения в механическом приводе ориентации солнечных батарей и предварительные результаты испытаний пластичных смазочных материалов на воздухе.

В подавляющем большинстве космических аппаратов в качестве первичного источника энергии используют солнечные батареи, характеризующиеся простотой конструкции, надежностью, экологической безопасностью и минимальным влиянием на электронику и радиоэлементы космического аппарата. Основными компонентами являются фотоэлектрическая панель, система разворачивания, система ориентации в пространстве, работающие в условиях космической радиации, экстремальных температур, ограниченного пространства на ракете. Ресурс изделия в значительной степени обеспечивается конструктивными элементами и приводом. При исследовании 400 спутников США установлено, что 10% из них имели проблемы с механизмами при разворачивании [1]. Оптимизация системы «панель – привод ориентации» по критериям массово-инерционных характеристик и ресурса – важное направление при конструировании солнечных батарей.

Задачами исследования является разработка оптимальной конструкции, обеспечивающей минимальный вес, необходимую жесткость каркаса и ресурс электромеханического привода [2]. Для реализации первого требования выбрана концепция неравнопрочной конструкции каркаса за счет применения треугольного сечения, табл.1.[3].

Таблица 1. Сравнительные характеристики образцов труб

Конструкция трубы	Круглое сечение трубы	Треугольное сечение со сплошной стенкой	Треугольное сечение с решетчатой стенкой
Сечение			
$m_{\text{эксп.}} \text{ г/м}$	0,188	0,140	0,133
$M_{\text{эксп.}} \text{ кгс·м}$	52	25	25
$E_{\text{эксп.}} \text{ кгс/мм}^2$	21000	21000	21000

На основе результатов оптимизации создана модель для проверки прочности и жесткости профиля в САПР (рис. 1).

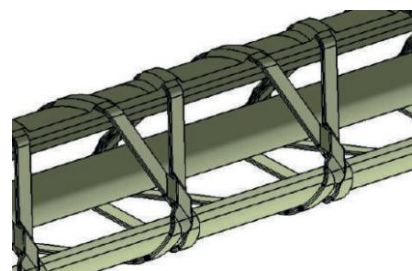


Рис. 1. Оптимизированная послойная модель трубы с треугольным сечением

В результате аналитического метода подобраны трубы треугольного сечения, обладающие массовым преимуществом до 32 % по сравнению с используемыми на данный момент углепластиковыми трубами круглого сечения, обладающими аналогичными жесткостями. Собранный каркас подвергался статическим испытаниям на изгиб. Статические испытания имитируют максимальную нагрузку на участке выведения космического аппарата и на этапе раскрытия крыла солнечной батареи, а также подтверждают качество сборки каркаса.

Ориентация солнечной батареи на орбите производится электромеханическим приводом, обеспечивающем низкие скорости и малые углы поворота, табл.2.

Таблица 2. Основные характеристики привода

Скорость поворота	0,06 до 0,15 °/с
Угол поворота привода	+90° до -10°
Момент привода	2 ^{+0,2} Нм
Температура эксплуатации привода	-40°С до +60 °С

Редукция вращения двигателя осуществляется волновым редуктором с передаточным числом 120 и максимальным КПД 64%. Для смазывания трибологических сопряжений в заданных условиях предпочтение отдают пластичным смазочным материалам (ПСМ) [1], трибологические свойства которых в редукторе космического аппарата необходимо исследовать с применением корректных методик и испытательных стендов, в максимальной степени воспроизводящих реальные условия, что являлось второй частью задачи.

Структура работы включает три этапа:

-исследование трибологических свойств пластичных смазочных материалов на модельных образцах при воздействии факторов космического пространства;

-исследование трибологических свойств пластичных смазочных материалов в подшипниках качения;

-исследование ресурса редуктора.

Для реализации первого этапа исследований разработан трибомодуль pin-on-disk для проведения испытаний в вакууме и на воздухе, рис.2.

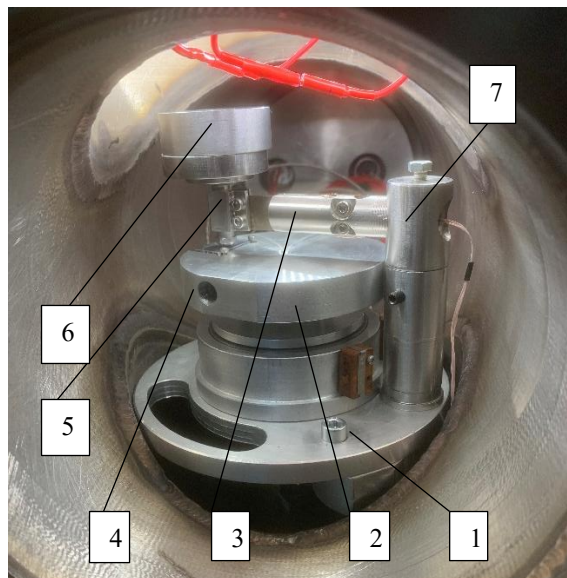


Рис. 2. Общий вид трибомодуля pin-on-disk

В корпусе 1, установленном с помощью двух стоек на нижнем фланце вакуумной камеры собран вращающийся столик 2, на верхней поверхности которого крепится образец – пластина 25х15х3 мм из стали 30ХГСА, термообработанная на HRC31 и с чистой поверхностью 0,04мкм. Вращение столика осуществляется посредством вала и магнитной муфты нижнего фланца. Соединение вала со столиком - через керамическое кольцо из Al_2O_3 . Тем самым обеспечивается изолирование образца от корпуса. Необходимый температурный диапазон образца достигается за счет встроенного в столик электронагревателя, либо азотного охладителя.

Одной из проблем испытаний в вакууме при отрицательных температурах является способ создания и поддержания отрицательной температуры образца при его вращении. Это решается комбинацией следующих технических решений. Газообразный или жидкий азот подается во внутреннюю полость столика через отверстие 4, в который вворачивается узел крепления фторопластовой трубки, другим концом соединенной с нижним фланцем. Выход азота оформлен аналогично. За счет большой длины трубки не оказывают критического влияния на узлы крепления. Второе техническое решение относится к методике испытаний в режиме возвратно-вращательного перемещения столика с образцом.

На вращающейся стойке 7 установлен штوك 3 с тензобалкой внутри. На другом ее конце закреплен корпус 5, внутри которого во фторопластовой втулке перемещается поршень с закрепленным контробразцом в виде шарика $\phi 4,7$ мм. Осевая сила на образцы создается грузом 6, действующим на поршень сверху.

Измерительная система и управление шаговым двигателем выполнены на базе контроллера NI cDAQ – 9132 и NImDAQ.

Особенностью методики испытаний является предварительное воздействие на ПСМ термоударов и радиационного воздействия. В качестве ПСМ используются смазки на основе циклопентана перфторполиэфира, кремнийорганики.

Основными критериями работоспособности ПСМ являются коэффициент трения и износостойкость. Предварительные измерения кинетики этих величин позволили определить условия проведения опытов. Коэффициент трения измеряется в течение 60 мин. Для надежного определения величины износа опыты проводят в течение 600 мин. Износ измеряется профилометрированием изношенной поверхности.

Предварительные испытания на воздухе при скорости скольжения 0,003 м/с показали слабую зависимость коэффициента трения от величины силы практически для всех типов ПСМ в пределах 0,1...0,16, причем наименьшие значения у смазок на основе перфторполиэфиров. Смазки на основе циклопентана имеют коэффициент трения в пределах 0,13...0,16. У смазок на перфторполиэфиров выше и износостойкость. Вместе с тем, по данным [4] ПСМ на основе циклопентана имеют лучшие характеристики в вакууме. Но испытания проводили при существенно большей частоте вращения и соответственно скорости скольжения.

На втором и третьем этапах планируется проведение испытаний ПСМ в составе подшипников и реального редуктора на ресурс.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Наукоёмкие технологии создания машин будущего» Института машиноведения им. А.А. Благоднарова РАН (Москва, Россия).

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0023

1. W. Shapiro, F. Murray, R. Howarth, R. Fusaro. Space mechanisms lessons learned study. NASA Technical Memorandum 107046. 1995.
2. Ануфриенко В.Е., Байбородов А.А., Васильев Т.С., Кузоро В.И., Григорьев Е.А., Волков М.В. Панель солнечной батареи. Пат. № 2703800 РФ, 2019. Бюл. №30.
3. М.И.Волков, В.В.Двирный Каркас солнечной батареи из труб треугольного сечения / Космические аппараты и технологии, №3 (37) 2021. Том 5. С.160-164.
4. M. Marchetti, W.R. Jones, Jr. J. Sicre. Relative lifetimes of MAPLUB® greases for space applications. NASA/TM—2002-211875, 2002.

ТРИБОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ ЛОПАСТНЫХ НАСОСОВ

Смирнов Н.И.

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; smir1947@yandex.ru

Разработана методология исследования трибологических и динамических процессов электроприводных лопастных насосов с учетом их взаимовлияния. Приведены критерии подобия модели и натуре при моделировании трибологических процессов. Получены расчетные зависимости износа сопряжений насосной секции и ступени от различных факторов.

На работоспособность электроприводных лопастных насосов (ЭЛН) в значительной степени влияют трибологические процессы и динамика. Износ трибосопряжений приводит к увеличению динамики; динамика в свою очередь формирует характер и форму поверхности трения. Поэтому эти процессы необходимо рассматривать как взаимосвязанные. На практике преобладают исследования трибологических процессов при стационарных условиях, с применением моделей и испытательных стендов, не воспроизводящих реальных условий. Не разработаны методы решения динамических задач с учетом износа трибосопряжений. Это приводит к возникновению трудно объяснимых отказов насосов или непрогнозируемым износом и разрушениям [1].

Задачей исследования является разработка расчетно-экспериментального метода исследования трибодинамических процессов ЭЛН. Стратегия исследования, рис.1, состоит из следующих составляющих:

- численное моделирование динамики системы с целью определения частотного спектра поперечных и крутильных колебаний, резонансных частот,

- расчет предельного состояния корпуса и вала ЭЛН по критерию прочности при заданной величине износа радиальных сопряжений,

- трибодинамические испытания насосных секций с варьированием типоразмера, конструктивных особенностей, среды испытаний с целью получения кинетики и изменения износа по длине секции, формы износа трибосопряжений и виброскорости корпуса секции,

- разработка физической модели процесса изнашивания сопряжений насосной секции: радиальных сопряжений (ступеней и подшипников), осевых сопряжений (ступени, упорного подшипника), торцовых уплотнений,

- разработка комплекса испытательных стендов и методик испытаний деталей и узлов насосов и двигателей для исследования трибологических процессов.

Исследование динамики системы с учетом износа радиальных сопряжений [2] позволили получить основные характеристики процесса:

- конструктивные особенности насоса, в первую очередь отношение длины к диаметру, влияют на динамику – в области 10-13 Гц имеется 10-11 собственных частот колебаний, что характеризует «закритические» условия работы;

- в процессе износа радиальных сопряжений, вызванного первоначально исходным дисбалансом рабочих колес, могут реализовываться синхронная и асинхронная прецессия вала. Частота асинхронной прецессии для расчетного случая $\sim 9,1$ Гц,

- изменение величины износа по длине насоса - неравномерное и зависит от конструктивных особенностей, в частности от расстановки промежуточных износостойких подшипников,

- форма вращения вала должна учитываться при разработке трибологической модели ступени и секции.

Трибологический аспект заключается в определении износостойкости насосной секции, которая определяется преимущественно износостойкостью ступеней и подшипников. Основная сложность в исследовании процесса изнашивания субтильных механических систем заключается в их длине (3...5м), что исключает широкое использование натурных испытаний. При модельных испытаниях необходимо обеспечить реальную динамику, т.е. синхронную и асинхронную прецессию рабочего колеса. Поэтому применили метод физического моделирования на основе афинного подобия модели и натуре. Откуда получили подобие динамических прогибов натуре и модели при условии равенства критериев подобия $\pi_1 = \frac{a^0}{m^0 L^2} = idem$, $\pi_2 = EI^0 / L^4 m^0 \omega^0 = idem$, где: I^0 , m^0 , a^0 , L , ω соответственно момент инерции сечения, погонная масса, момент инерции массы, длина ротора, частота вращения в произвольно выбранном сечении ротора. С использованием полученных критериев разработаны модельные стенды.

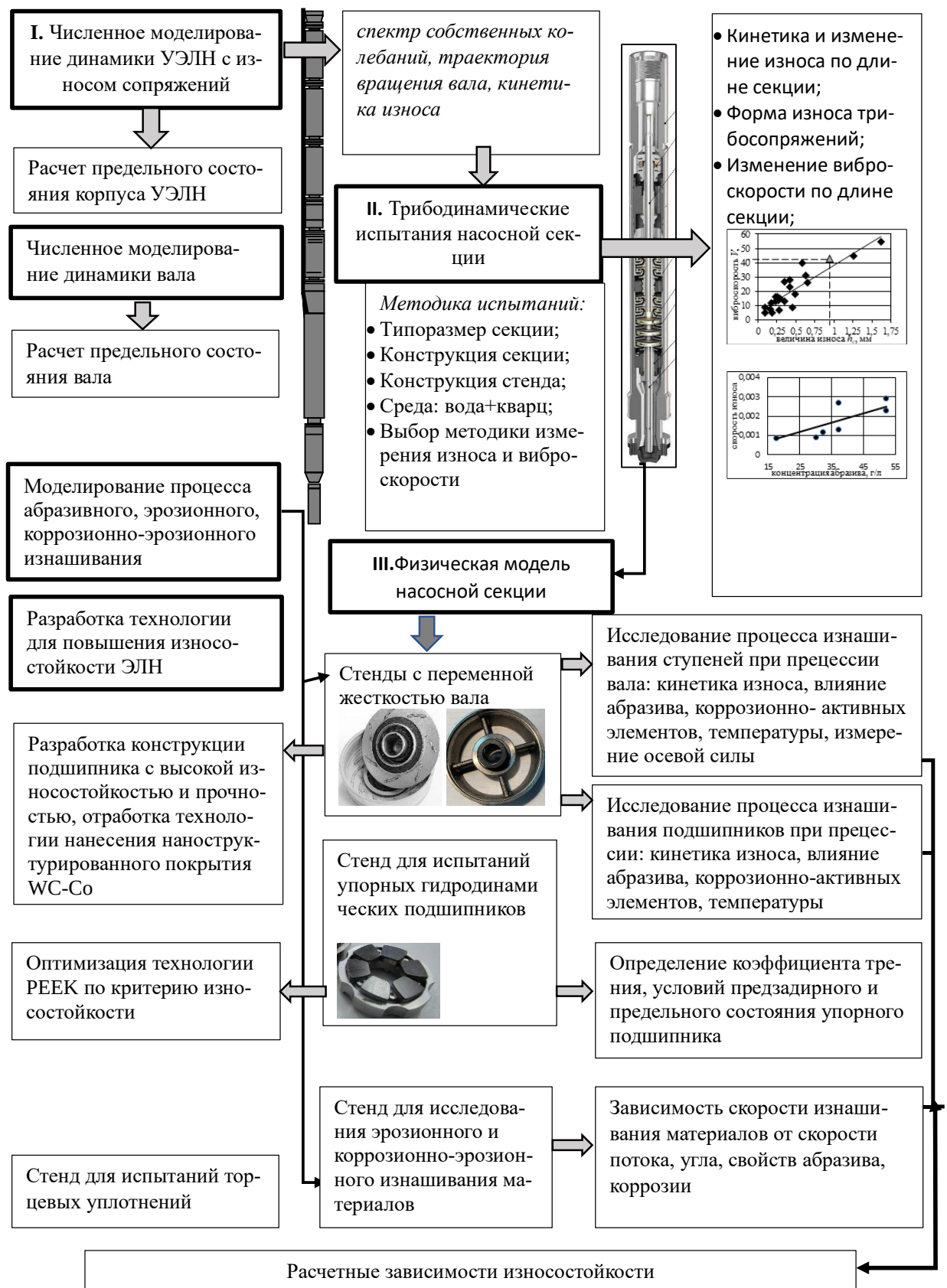


Рис.1 Стратегия исследования

Скорость изнашивания можно представить в виде мультипликативной зависимости от скорости изнашивания ступеней $v_{ст_i}$, конструктивно-технологических, эксплуатационных и динамических факторов:

$$\overline{v}_{нс} = A \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n v_{ст_i} \cdot k_{дин} \cdot k_a(l)_i \cdot k_k, \text{ где:}$$

A – коэффициент согласия; $v_{ст_i}$ – скорость изнашивания ступени; $k_{дин}$ – динамический фактор, определяется изменением динамики вследствие износа, турбулентности жидкости, переходными процессами и т.д.; k_{a_i} – коэффициент влияния абразива по длине секции l ; k_k – конструкционный фактор; N – количество ступеней в секции. Физический смысл коэффициента $k_a(l)_i$ заключается в степени изменения режущих свойств абразива по длине секции вследствие его дробления. Коэффициент $k_{дин}$ характеризует изменение условий контактирования в сопряжениях вследствие деформации вала при вращении.

Динамический фактор $k_{дин} = f(h)$ характеризует форму изгиба вала при вращении и изменение его величины h по длине секции. Теоретически эта зависимость имеет вид

$$h(x) = a + \sum_m^n \left(a_m \cos \frac{\pi n l}{L} + a_m \sin \frac{\pi n l}{L} \right), \text{ где:}$$

n – порядковый номер ступени; l – высота ступени; L – длина полуволны основной гармоника колебаний или расстояние между подшипниками, $x = \pi n l$. Длина полуволны основной гармоника колебаний L и распределение износа по длине секции могут быть найдены для типовых конструкций при испытаниях на изнашивание насосной секции, опертой на фланцевые соединения по концам.

Концентрацию абразива в жидкости ε_{p_n} на n -ой ступени вследствие дробления в результате последовательного прохождения через ступени секции оцениваем зависимостью

$$\varepsilon_{p_N} = \varepsilon_{p_0} \left(1 - \frac{q_y}{Q} \right)^N, \text{ где: } \varepsilon_{p_0} - \text{исходная}$$

концентрация на входе, q_y – расход жидкости через уплотнение ступени, Q – подача насоса.

Коэффициентом k_k учитываются особенности конструкции секции, влияющие на износ радиальных сопряжений ступеней за счет, например, применения промежуточных подшипников.

Наиболее сложным вопросом является определение скорости изнашивания радиальных сопряжений ступеней $v_{ст_i}$. В общем виде процесс изнашивания зависит от большого числа факторов и зависимость износа h от них можно записать в неявном виде

$$h = f(\varepsilon_p, d_p, \lambda_F, H_p, T, v, k_{HCl}, Q, H, n, H_M E_M, t),$$

где: $\varepsilon_p, d_p, \lambda_F, H_p$ – соответственно концентрация, размер, коэффициент формы и твердость абразивных частиц; T, v, k_{HCl} – температура, вязкость и коррозионная активность жидкости; Q, H – подача, напор; n – частота

вращения; H_M, E_M

– твердость и модуль упругости материала сопряжения, t – время.

Для получения расчетных зависимостей скорости изнашивания v от большого числа влияющих факторов различной природы целесообразно использовать метод интегральных аналогов проф. Ю.Н. Дроздова [3] и представить скорость изнашивания в виде мультипликативной зависимости от безразмерных обобщенных критериев системы:

$$v_r(t) = \frac{h}{t} = A \cdot F_p^\alpha \cdot F_Q^\beta \cdot F_K^\gamma \cdot F_M^\delta, \text{ где: } F_p^\alpha -$$

комплекс, характеризующий концентрацию, размер, форму, твердость абразива в жидкости; F_Q^β – симплекс, характеризующий отклонение характеристик насоса от номинальных значений; F_K, F_M – соответственно конструкционный фактор и фактор механических свойств.

Кинетика изнашивания радиальных сопряжений ступеней описывается выражением

$$h(t) = A \left[1 - \exp \left(-\frac{\varepsilon_p t}{a} \right) \right], \text{ где: } t - \text{время; } A \text{ и } a$$

– коэффициенты, и характеризуется двумя стадиями: абразивный износ и эрозионный износ. Эрозионный износ наступает после того, как в сопряжении сформируется зазор, равный максимальному размеру абразивных частиц, которые в дальнейшем будут свободно проходить через него, соударяясь с поверхностью сопряжения. Поэтому общий износ $h_{\Sigma t}$ представляем в виде суперпозиции абразивного износа $h_{a_{t1}}$ и эрозионного износа $h_{э_{t2}}$. В дальнейшем исследуются процессы абразивного и эрозионного изнашивания ступеней.

Выводы

1. Разработан расчетно-экспериментальный метод исследования трибодинамических процессов ЭЛН на основе численного и физического моделирования.

2. Получены критерии аффинного подобия природы и модели насосной секции ЭЛН как динамической системы.

3. Разработана трибологическая модель секции и ступени с прецессионным вращением вала.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0023

- Bai C., Zheng D., Hure R., Saleh R., Carvajal N., Morrison G. The Impact of Journal Bearing Wear on an Electric Submersible Pump in Two-Phase and Three-Phase Flow *J. Tribol.* May 2019, 141(5): 051702 (8 pages) Paper No: TRIB-18-1398.
- Смирнов Н.И., Дроздов А.Н., Смирнов Н.Н. Трибодинамические аспекты ресурса электропогружных лопастных насосов для добычи нефти // Записки Горного института. 2023. Т. 264. С. 962-970. EDN QNNAGA
- Дроздов, Ю.Н. Прикладная трибология (трение, износ, смазка) / Ю.Н. Дроздов, Е.Г. Юдин, А.И. Белов. Под ред. Ю.Н. Дроздова // - М.: "Эко-Пресс", 2010. – 604 с.

МЕТОД ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕХАТРОННЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Сороковнин М.Е.

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, Иваново, Россия

В работе исследуется параметрическая идентификация мехатронных объектов управления при помощи искусственной нейронной сети. Для повышения точности идентификации в условиях воздействия помех предлагается оптимизировать состав координат состояния объекта, сигналы которых подаются на вход нейронной сети. В качестве критерия оптимальности используется отношение мощностей информационного сигнала и помехи.

В настоящее время в условиях совершенствования технологических процессов в различных отраслях промышленности широкое применение находят мехатронные системы (МС), включающие в себя управляющее устройство, силовой преобразователь, электродвигатель, механическую передачу и рабочий орган машины. Они позволяют обеспечивать высокое качество управления технологическими параметрами промышленного оборудования, являются надежными и простыми в эксплуатации [1].

Вместе с тем применение мехатронных систем управления осложняется неопределенностью параметров большинства реальных объектов, связанной с погрешностями идентификации, а также изменениями электрических, механических и технологических параметров оборудования в процессе эксплуатации. Отклонение параметров объекта управления от расчетных значений существенно снижает качество управления в системах управления, вплоть до потери устойчивости.

Еще одним фактором, усложняющим совершенствование и развитие мехатронных систем, является влияние нелинейных эффектов в различных частях оборудования объектов управления. Компенсация влияния указанных негативных эффектов, делающих поведение систем менее предсказуемым и приводящих к возникновению больших ошибок управления, требует точного знания параметров как линейных, так и нелинейных элементов системы [1, 2].

Таким образом, параметрическая неопределенность и нелинейных характер мехатронных объектов делают актуальной проблему идентификации. Эффективным способом решения данной проблемы является разработка интеллектуальных методов, основанных на применении искусственных нейронных сетей (ИНС). Специально обученные ИНС позволяют получать оценки параметров мехатронного объекта управления по одной динамической характеристике во временной или частотной области [1, 2, 3].

Однако в условиях воздействия помех в каналах измерения качество идентификации параметров объекта существенно снижается. В связи с этим возникает задача оптимального выбора состава

используемых при идентификации координат состояния объекта, позволяющего минимизировать влияние помех на оценки параметров и повысить точность идентификации.

В целях повышения эффективности идентификации параметров объекта предлагается использование идентификатора на основе радиальной ИНС, структура которого приведена на рис. 1.

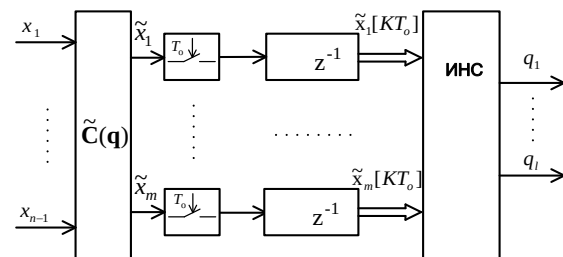


Рис. 1. Структура системы управления МС с настройкой при помощи ИНС

В процессе идентификации на вход системы подается тестовый сигнал специальной формы, позволяющий определить параметры объекта управления $q_1, \dots, q_l$. Полученные переходные характеристики через преобразователь координат $\tilde{C}(q)$, выделяющий наиболее информативные каналы измерения, поступают в виде векторов дискретных значений сигналов $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_m$ на входы радиальной ИНС, дающей оценки переменных параметров МС.

Для повышения точности идентификации параметров мехатронных объектов управления в условиях действия помех разработана методика выбора оптимального состава каналов измерения и соответствующей структуры радиальной ИНС, основанная на критерии оптимальности в форме отношения мощностей информационного сигнала и помехи.

В качестве оценки мощности информационного сигнала координаты x_i , поступающего на вход ИНС при идентификации отдельного параметра q_j объекта управления, используется среднеквадратическое значение разности

$$u_{ij}(t, \mathbf{q}^0, \Delta \mathbf{q}_j) = x_i(t, \mathbf{q}^0) - x_i(t, \mathbf{q}^0 + \Delta \mathbf{q}_j) :$$

$$Sx_i(q_j) = \frac{1}{T} \int_0^T u_{ij}^2(t, \mathbf{q}^0, \Delta \mathbf{q}_j) dt, \quad (1)$$

где T – интервал времени измерения; $\mathbf{q}^0$ – вектор номинальных значений параметров; $\Delta \mathbf{q}_j$ – вектор отклонений параметров.

В условиях воздействия широкополосных некоррелированных помех $n_i(t)$ в каналах измерения при идентификации параметра q_j в качестве критерия оптимальности предлагается использовать отношение оценок мощностей сигнала $Sx_i(q_j)$ и помехи Sn_i :

$$F_i\{q_j\} = \frac{Sx_i(q_j)}{Sn_i}. \quad (2)$$

Оптимальное значение двоичной матрицы выбора координаты состояния $\tilde{\mathbf{C}}(q_j) \in \{\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \dots, \mathbf{C}_n\}$ при идентификации параметра объекта q_j будет соответствовать максимальному значению критерия $F_i(q_j)$. При идентификации нескольких параметров объекта $q_1, \dots, q_l$, оказывающих перекрестное влияние на координаты состояния, рекомендуется объединение на входе ИНС оптимальных для каждого отдельного параметра каналов измерения:

$$\tilde{\mathbf{C}}(\mathbf{q}) = \tilde{\mathbf{C}}(q_1) \vee \tilde{\mathbf{C}}(q_2) \vee \dots \vee \tilde{\mathbf{C}}(q_l). \quad (3)$$

Для ускорения вычисления оценок мощности информационных сигналов предлагается использовать функции чувствительности координат состояния $U_{ij}(t, \mathbf{q})$ к изменению параметров объекта управления, которые определяются в результате одного эксперимента в среде моделирования. В большинстве случаев энергетический интеграл функции чувствительности вида (1) позволяет точно оценить соотношение мощностей сигналов в каналах измерения.

В случае расширения диапазона отклонений параметров объекта от номинальных значений рекомендуется рассчитывать значения $Sx_i(q_j)$ непосредственно, заменив интеграл (1) конечной суммой:

$$Sx_i(q_j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \{x_i(kT_o, \mathbf{q}^0) - x_i(kT_o, \mathbf{q}^0 + \Delta \mathbf{q}_j)\}^2. \quad (4)$$

Такой подход дает более точные оценки мощности сигналов на входах ИНС, но требует больших вычислительных затрат.

При идентификации нелинейных МС необходимо определять неизвестные параметры как линейной части, так и нелинейных элементов.

В связи с нелинейностью характеристик таких МС корректно определить функции чувствительности координат состояния к изменению параметров системы не представляется возможным. В связи с этим значения оценок мощности информационных сигналов при идентификации параметров нелинейных элементов МС вычисляются только при помощи выражения вида (4). Вычисление переходных характеристик нелинейной МС при номинальных и возмущенных параметрах проводится методом моделирования в среде *Matlab Simulink*.

Обучающая выборка радиальной ИНС представляет собой массив, полученный путем вариации параметров линейной части и нелинейных элементов, состоящий из дискретных значений переходных характеристик для оптимального набора координат состояния МС, задаваемых матрицей $\tilde{\mathbf{C}}(\mathbf{q})$. Диапазон вариации определяется на основе априорной информации.

Исследование предлагаемой методики идентификации проводилось на базе электропривода с двигателем постоянного тока и упругой связью между массами, структура которого приведена на рис. 2, где M , M_y и M_c – моменты двигателя, упругости и сопротивления; Ω_1 и Ω_2 – скорости 1-й и 2-й масс, $J_1 = 0,015 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ и $J_2 = 0,25 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$ – моменты инерции; $C_{12} = 0,85 \text{ Н}\cdot\text{м}$ и $K_d = 0,025 \text{ кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}$ – коэффициенты жесткости и вязкого трения; $C = 0,8 \text{ Вб}$ – конструктивный параметр двигателя; $T_a = 0,04 \text{ с}$ и $R_a = 2,1 \text{ Ом}$ – постоянная времени и сопротивление якорной цепи; $K_{сп} = 15,7$ и $T_{сп} = 0,001 \text{ с}$ – коэффициент передачи и постоянная времени силового преобразователя.

В соответствии с предложенной методикой была проведена оптимизация структуры радиальной ИНС и идентификация варьируемых в пределах $\pm 50\%$ от номинальных значений параметров мехатронного объекта J_1 , J_2 и C_{12} , когда уровни помех в каналах измерения координат состояния одинаковы: $\sigma_n^2(x_i) = 100 \text{ мВт}$, $i = 1, 2, \dots, 4$

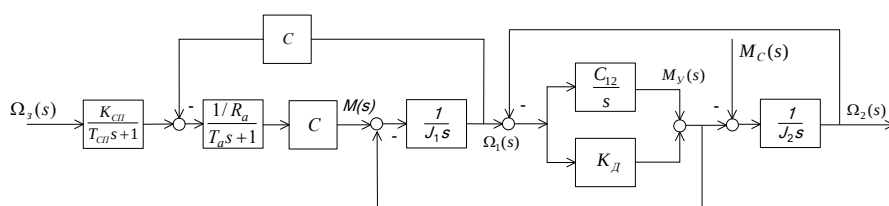


Рис. 2. Структурная схема объекта управления

Таблица 1. Значения критериев оптимальности при различной мощности помех

Координата	$F_i\{J_1\}$ $\times 10$	$F_i\{C_{12}\}$ $\times 10$	$F_i\{J_2\}$ $\times 10$	$\hat{F}_i\{J_1\}$ $\times 10$	$\hat{F}_i\{C_{12}\}$ $\times 10$	$\hat{F}_i\{J_2\}$ $\times 10$
x_1	$9,503 \cdot 10^{-2}$	$1,287 \cdot 10^{-1}$	$2,618 \cdot 10^{-1}$	$1,384 \cdot 10^{-1}$	$2,036 \cdot 10^{-1}$	$3,407 \cdot 10^{-1}$
x_2	1,367	1,523	2,925	2,127	2,3431	3,8035
x_3	$6,873 \cdot 10^{-3}$	$1,518 \cdot 10^{-1}$	$2,497 \cdot 10^{-1}$	$7,9 \cdot 10^{-3}$	$2,459 \cdot 10^{-1}$	$3,2 \cdot 10^{-1}$
x_4	$6,703 \cdot 10^{-1}$	8,468	1,38 \cdot 10^1	$6,998 \cdot 10^{-1}$	1,5867 \cdot 10^1	2,2898 \cdot 10^1

Таблица 2. Усредненные погрешности оценок параметров объекта на выходах ИНС

1 координата		2 координаты		3 координаты		4 координаты	
	$\hat{\sigma}_y \cdot 10^{-2}$		$\hat{\sigma}_y \cdot 10^{-2}$		$\hat{\sigma}_y \cdot 10^{-2}$		$\hat{\sigma}_y \cdot 10^{-2}$
[1 0 0 0]	6,4792	[1 1 0 0]	2,3610	[1 1 1 0]	2,4153	[1 1 1 1]	1,8298
[0 1 0 0]	2,1100	[1 0 1 0]	9,1815	[1 1 0 1]	1,7401		
[0 0 1 0]	13,894	[1 0 0 1]	1,7880	[1 0 1 1]	2,5474		
[0 0 0 1]	1,9288	[0 1 1 0]	1,9880	[0 1 1 1]	1,7689		
		[0 1 0 1]	1,7390				
		[0 0 1 1]	2,7392				

Значения критериев оптимальности $\hat{F}_i\{q_j\}$ на основе оценок по функциям чувствительности, а также значения критериев $F_i\{q_j\}$ на основе оценок, полученных путем вычисления по формуле (4), для каждого канала измерения $i = 1, 2, \dots, 4$ при уровне помех $Sn(x_i) = 100 \text{ мВт}$ приведены в табл. 1.

Максимальное значение критерия $\hat{F}_i\{J_1\}$ дает координата x_2 , а максимальное значение $\hat{F}_i\{J_2\}$ и $\hat{F}_i\{C_{12}\}$ – координата x_4 , то есть $\tilde{C}(q_1) = [0 \ 1 \ 0 \ 0]$, $\tilde{C}(q_2) = \tilde{C}(q_3) = [0 \ 0 \ 0 \ 1]$. Непосредственные расчеты $F_i\{J_1\}$, $F_i\{J_2\}$, $F_i\{C_{12}\}$ по формуле (4) дают аналогичные результаты. Оптимальное выражение матрицы $\tilde{C}(q)$ определяется путем логического сложения $\tilde{C}(q) = [0 \ 1 \ 0 \ 0] \vee [0 \ 0 \ 0 \ 1] = [0 \ 1 \ 0 \ 1]$

В целях проверки достоверности результатов оптимизации для каждого из возможных сочетаний каналов измерения координат состояния мехатронного объекта были сформированы соответствующие варианты радиальной ИНС.

Качество идентификации при помощи полученных ИНС определялось путем анализа среднеквадратических погрешностей оценок параметров $\hat{\sigma}(J_1)$, $\hat{\sigma}(C_{12})$ и $\hat{\sigma}(J_2)$, полученных на тестовой выборке, по структуре аналогичной обучающей.

Усредненные значения погрешностей идентификации приведены в табл. 2:

$$\hat{\sigma}_y = [\hat{\sigma}(J_1) + \hat{\sigma}(C_{12}) + \hat{\sigma}(J_2)]/3.$$

Как показывают полученные результаты, оптимальное по критерию (2) сочетание каналов измерения дает минимальное значение среднеквадратической погрешности идентификации параметров объекта управления при воздействии помех.

Таким образом, разработанная методика выбора оптимального состава каналов измерения и формирования соответствующей структуры ИНС, основанная на предложенном критерии оптимальности в форме отношения мощности информационного сигнала и помехи, позволяет повысить точность идентификации параметров мехатронных объектов.

Для ускорения вычислений оценок мощности сигналов в каналах измерения можно использовать функции чувствительности координат системы к изменению определяемых параметров, но только при их малых отклонениях – в пределах $\pm 100\%$ от номинальных значений.

1. Анисимов А.А. Структурно-параметрический синтез, оптимизация и настройка систем управления технологическими объектами / Анисимов А.А., Тарарыкин С.В. // ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2015. – 296 с.
2. Анисимов А.А., Сороковник М.Е., Тарарыкин С.В. Нейросетевая идентификация и настройка мехатронных систем с регуляторами состояния // *Мехатроника, автоматизация, управление*. – 2025. – №26, С. 65-76.
3. Методы классической и современной теории автоматического управления: в 3 т. т. 2. Синтез регуляторов и теория оптимизации систем автоматического управления / под ред. Н.Д. Егупова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 736 с.

МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССОВ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ КОНТАКТНОЙ ОБЛАСТИ

Стащенко В.И., Скворцов О.Б.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Рассмотрены вопросы мониторинга режима внешнего электрического воздействия на металл при его обработке. Контроль виброакустических процессов, сопровождающих действие электрических импульсов на металл, позволяет оперативно оценить влияние обработки на поверхностный слой металла. При контроле виброакустических процессов в металлических элементах под воздействием электрических импульсов можно влиять на микроструктуру поверхности, процессы релаксации, заживления микротрещин и развитие вибрационной усталости.

Электроимпульсное воздействие на металлы и сплавы при обработке давлением, прокаткой, волочением (рисунок 1), экструзией, прессованием, а также обработкой резанием и сверлением, позволяет снизить сопротивлением деформации и улучшить микроструктуру поверхностного слоя металла. Оперативный контроль влияния электроимпульсного воздействия необходим для практического применения таких методов в процессе обработки.

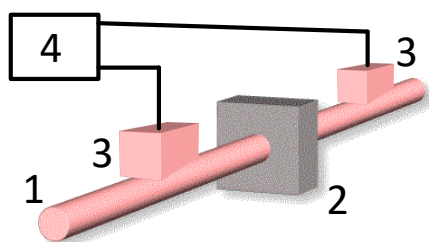


Рис. 1. Использование электроимпульсного воздействия для получения электропластичности во время волочения проволоки 1 через фильеру 2. Электрические импульсы на контакты 3 поступают от генератора импульсов тока высокой плотности 4

Воздействие электрического импульса на металлический образец приводит к возникновению в них механические колебаний, возбуждаемых фронтами импульса [1]. Действия фронтов формирует в материале ударные механические импульсы в поверхностных слоях. Они затем переходят в продольные и поперечные затухающие колебания по объему образца и продолжают после окончания электрического импульса [1]. Пример такого вибрационного отклика представлен на рисунке 2.

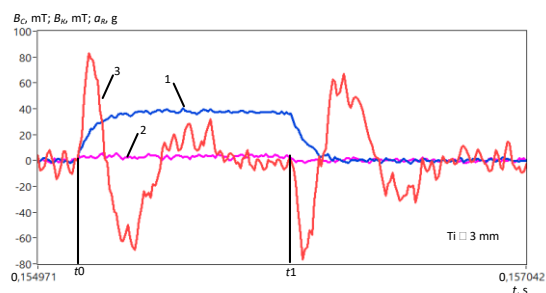


Рис. 2. Магнитная индукция и виброперегрузка. Касательная к образцу компонента магнитной индукции -1, радиальная компонента магнитной индукции - 2 и виброперегрузка в g -3.

На рис. 2 представлены характерные сигналы вибрационного отклика металлического образца из титана при воздействии электрического импульса с передним и задним фронтами в моменты t_0 и t_1 . Такое действие приводит к генерации, активации, трансформации и перемещению структурных неоднородностей в материале, стимулируя пластическую деформацию и структурные изменения в металле [2-6]. Основные структурные изменения в металле при этом наблюдаются в поверхностном слое на глубину в 200-300 мкм [7, 8]. В этой связи является важным анализ процессов в поверхностных слоях.

Так согласно [9] наличие двух соприкасающихся металлических поверхностей образует контактное сопротивление, которое, например, при трении в области контакта вызывает изменения в электрических процессах.

При пропускании через неё тока будут возникать переменные магнитные поля и вибрации. Контроль изменений тока при постоянном внешнем электрическом воздействии, позволяет отслеживать процессы в контактной области

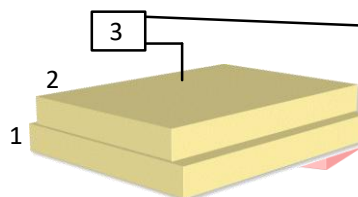


Рис. 3. Схема изучения влияния электрических импульсов на область контакта двух металлических элементов

Динамическое действие электрических импульсов на металл вызывает формирование затухающих колебаний в металле. Контроль такой вибрации позволяет организовать оперативный мониторинг процесса. Пример сигналов трехкомпонентного акселерометра, установленного на пластине из нержавеющей стали представлен на рис. 4. Параметры вибрации заметно меняются в зависимости от режима механического воздействия и деформации. Это дает возможность контролировать процесс обработки. Параметры вибрации заметно меняются в зависимости от режима механического воздействия и деформации. Это дает возможность контролировать процесс обработки.

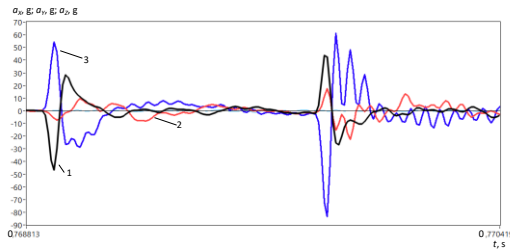


Рис. 4. Вибрационный отклик для стальной пластины размером 30х12х0,2 мм на пропускание электрического импульса

Таблица 1. Параметры виброакустического отклика для образца из стали

Деформация	a_{pp}, g	$Ta, мкс$	$d_{pp}, мкм$	$Td, мкс$
упругая	85	803	0,325	21650
пластическая	83	813	0,22	11870
предразрушение	24000	757	4,2	1150

В таблице 1 представлены оценки размаха величины ускорения a_{pp} и d_{pp} перемещения, а также продолжительности таких процессов Ta и Td .

По мере приближения к деформации разрушения наблюдается резкое (на несколько порядков) увеличение размаха ускорения и менее заметное, но тоже более чем на порядок увеличение размаха вибрационного перемещения. При этом длительность вибрационного отклика по ускорению слабо сокращается, а длительность вибрационного отклика по перемещению сокращается более заметно (более чем на порядок).

Проявление пластического деформирования и особенно дефектов начала разрушения, таким образом, приводит к уменьшению постоянной времени затухания вибрационного отклика и росту размаха его как по ускорению, так и по перемещению. Эти особенности целесообразно использовать в системах вибрационного мониторинга и управления процессом электроимпульсного воздействия при ОМД с применением ЭПЭ. Эти результаты также могут быть использованы при построении систем вибрационной диагностики состояния электропроводящих элементов энергетического оборудования, ориентированного на работу импульсными потоками электрической энергии.

Электродинамическое воздействие электрических импульсов на металлы, подтвержденное экспериментально, преимущественно затрагивает их поверхностные слои. Это связано с тем, что электрические и

магнитные процессы происходят именно в этих слоях (поверхностный эффект). Поверхностный слой металла подвергается наибольшему динамическим механическим нагрузкам и является областью, где наиболее активно распространяются виброакустические колебания. В этом слое и на его границах с другими материалами происходят процессы отражения, преломления и преобразования виброакустических колебаний между волнами растяжения, сжатия и сдвига. Поверхностный слой, по-видимому, играет ключевую роль в определении пластичности, прочности и износостойкости металла. Следует отметить, что поверхностные слои существенно влияют на мало- и многоцикловую усталость металлов [10].

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0021

1. Сташенко В.И., Скворцов О.Б., Троицкий О.А. Электродинамические процессы в проводниках при воздействии электрическими импульсами // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2021. № 1. С. 39–47.
2. Троицкий О. А. Электропластический эффект в металлах // Черная металлургия. Бюл. науч.- техн. и эконом. информации. 2018. № 9. С. 65–76.
3. Громов В. Е., Зуев Л. В., Батаронов И. Л., Рошупкин А.М. Развитие представлений о подвижности дислокаций при токовом воздействии // ФТТ. 1991. Т 33. № 10. С. 3027–3032.
4. Логвин В.А., Терешко И.В., Шептунов С.А. Изменение дислокационной структуры металлов после воздействия тлеющего разряда // Металлообработка. – 2018. – № 6(108). – С. 45-51.
5. Багмутов В.П., Паршев С.Н., Полозенко Н.Ю. Формирование структуры и свойств поверхностного слоя стальных изделий электромеханической обработкой // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2007. Т. 4, № 1. – С. 36-40.
6. Herbst S., Karsten E., Gerstein G., Reschka S., Nürnberger F., Zaefferer S., Maier H. Electroplasticity mechanisms in 1. materials // Advanced Engineering Materials? 2023. V. 25, № 6.
7. Эдигаров В.Р., Литау Е.В., Малый В.В. Комбинированная электромеханическая обработка с динамическим силовым воздействием // Омский научный вестник. – 2015. – № 1(137). – С. 69-72.
8. Zhou Y., Wu C., Qu Z., Lin B. Ti6554 titanium alloy electrically assisted compression: modelling and simulation based on dislocation density // Materials Science and Engineering 1270 2022, 012065.
9. Wen Z., Qi L., Ya-kun X., Xin-cun Z., Zhen Z. Low frequency vibration assisted friction behavior and deep drawing performance of solid-solution 7075 aluminum alloy // Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30(6): – P.176–186.
10. Шиняевский А.А., Солдатенков А.П. Новые парадигмы в описании усталости металлов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2019. № 1. С. 198–209. DOI 10.15593/perm.mech/2019.1.17.

ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПРИ СЖАТИИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ СЛАБОЛЕГИРОВАННОГО АЛЮМИНИЯ

Столяров В.В.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; vlstol@mail.ru

Выполнено сравнение деформационного поведения слаболегированного алюминия при статическом нагружении сжатием в постоянном магнитном поле и без поля. Показано, что магнитное поле вызывает обратимое повышение напряжений в упругой и упругопластической областях, которое исчезает при снятии поля

Цель

Сравнение магнитопластического эффекта при сжатии в упругой и упругопластической области в крупнозернистом слаболегированном сплаве алюминий–магний.

Введение

Известно, что магнитное поле взаимодействует с твердыми телами, обладающими магнитным моментом, и способно изменять их физико-механические свойства не более, чем на ~5% [1]. Было отмечено, что парамагнитные металлы в магнитном поле при нагружении могут испытывать как разупрочнение [2], так и упрочнение [3, 4]. Так, прирост напряжений для парамагнитного Al достигается при деформации 1–2% и составляет 35 и 90 МПа, соответственно, в монокристалле и поликристалле [3]. Было обнаружено, что магнитное поле вызывает движение дислокаций без нагружения в диамагнитных кристаллах NaCl и Zn [5]. Это явление получило название «магнитопластического эффекта» (МПЭ), которое качественно коррелирует с данными [2], но не коррелирует с данными по растяжению моно- и поликристаллического Al [3]. Эксперименты по внутреннему трению показали, что Al магниточувствителен в закаленном и состаренном состоянии (с максимальной концентрацией вакансий) и не чувствителен в рекристаллизованном (отожженном) состоянии (минимум вакансий) [6]. Автор считает, что эффект вызван спин-зависимым превращением в магнитном поле пары дислокация–вакансия. Приведенные работы свидетельствуют о противоречивости имеющихся данных относительно знака эффекта для разных материалов.

Сильным ограничением магнитного поля является его локальность и его слабое влияние на свойства немагнитных материалов при растяжении. Отметим, что в статьях и обзорах все исследования выполнены в упругопластической области и при разных деформационных схемах, включая растяжение, кручение или вдавливание индентора, а направление поля совпадало с направлением деформации только для растяжения. Однако, схема деформирования сжатием в исследованиях отсутствуют, хотя представляет практический интерес, являясь основой обработки металлов давлением. В этой связи интересным представляется исследование поведения алюминия

при сжатии в постоянном магнитном поле, не совпадающем с направлением поля.

Материал и методы исследования

Образцы для сжатия были вырезаны электроискровым методом, имели форму цилиндра высотой 12 мм и площадью основания 13 мм². Микротвердость при комнатной температуре измерялась на приборе ПМТ-3 при нагрузке 1 Н и времени выдержки 5с, точность измерения составляла 3%.

Сжатие выполнялось в режиме «мягкого» нагружения при комнатной температуре в вакуумной камере при постоянном магнитном поле с индукцией $B = 0.1$ Тл, направленном перпендикулярно направлению сжатия. До испытаний образцы находились в магнитном поле в течение 18 ч. Поле создавалось постоянными магнитами из сплава альнико (AlNiCo). Размер области воздействия магнитного поля соответствовал высоте образца. Процесс сжатия для сравнения выполнялся в поле и без поля в динамическом режиме при скорости нагружения 185 г/с.

Результаты и обсуждение

Микроструктура сплава в исходном состоянии является крупнозернистой, рекристаллизованной и содержит частицы вторых фаз объемной долей около 5%, разного состава и дисперсности (рис. 1). В соответствии с диаграммой состояния Al–Mg основной фазой в сплаве является твердый раствор магния в алюминии. Крупные частицы (до 5 мкм), расположенные преимущественно на границах зерен, представляют собой интерметаллидное соединение Al_3Mg_2 . Дисперсные частицы (менее 1 мкм) внутри зерен, по-видимому, являются результатом естественного старения и могут представлять собой зоны Гинье–Престона.

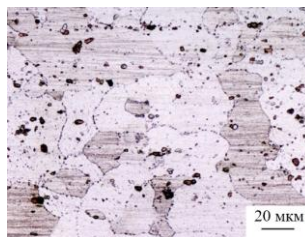


Рис. 1. Вид оптической микроструктуры сплава
Микротвердость. В табл. 1 (наверно табл.2 –

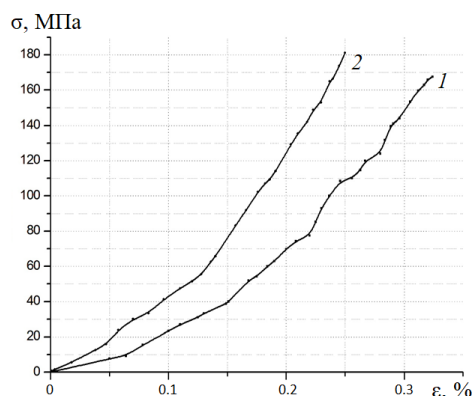
проверьте) приведены значения микротвердости образцов, измеренных в исходном состоянии (до деформации), после деформации сжатием в упругой области без магнитного поля и после такой же деформации в магнитном поле. Видно, что сжатие без поля привело к повышению средней микротвердости более, чем на 8%.

Таблица 2. Микротвердость до и после деформации

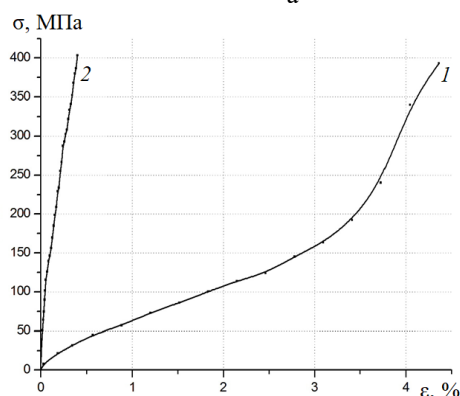
Состояние/Режим испытания	Микротвердость, МПа
исходное	2080
Сжатие без поля	2250
Сжатие в поле	2260

Такое же сжатие в магнитном поле способствовало дополнительному повышению микротвердости чуть менее 0.5%. Отметим, что ошибка измерения микротвердости превышала замеченное повышение.

Сжатие. На рис. 2 приведены кривые напряжение–деформация, полученные при сжатии в упругой и упругопластической области.



а



б

Рис. 2. Кривые напряжение–деформация при сжатии: (а) – в упругой области; (б) – в упругопластической области; 1 – без поля; 2 – в магнитном поле.

В отсутствии магнитного поля (рис. 2а, кривая 1) заметна более высокая пластичность образца, чем для кривой деформирования в МП (рис. 2а, кривая 2). Из сравнения кривых 1 и 2 видно, что при

достижении степени деформации $\varepsilon = 0.25\%$ приложенное механическое напряжение для сплава при сжатии без магнитного поля (кривая 1) в 1.5 раза меньше, чем у сплава в магнитном поле (кривая 2). Накопленная пластическая деформация для образца, испытанного без магнитного поля, оказалась в 1.3 раза больше, чем в магнитном поле.

С ростом напряжения и переходом в упругопластическую область наиболее высокая пластичность обнаруживается для образца, деформированного без МП (кривая 1), в отличие от образца в МП (кривая 2). При достижении напряжения 400 МПа величина накопленной деформации для образца в отсутствие влияния магнитного поля в 10 раз превышает величину деформации в магнитном поле. Снижение предела текучести и удлинение стадии легкого скольжения – характерные особенности кривой 1 (рис. 2б).

Измерения микротвердости и деформационные кривые сжатия в техническом алюминии свидетельствуют о качественно разном влиянии магнитного поля на поверхность образца при вдавливании индентора и на внутренний объем материала при сжатии. Микротвердость после деформации повышается на ~8% и не зависит от магнитного поля с учетом точности измерения. То есть влияние магнитного поля без деформации отсутствует. Однако при сжатии, особенно в упругопластической области, эффект магнитного поля был многократным. Так, в упругой области в магнитном поле напряжение повышалось почти в два раза, а в упругопластической области почти на порядок, по сравнению со сжатием без поля. Важно различать в этих случаях МПЭ (влияние поля без внешней деформации) и магнитомеханический эффект (ММЭ) (совместное влияние поля и деформации). Противоречивое влияние (от упрочнения до разупрочнения) слабых магнитных полей до 0.3 Тл и ранее отмечалось для ряда металлов [7–9]. Так, для парамагнитного алюминия Al85 оно проявлялось в снижении микротвердости на 4–12% и в снижении скорости ползучести с 13 %/ч до 3.47 %/ч [10], что косвенно свидетельствует о разных действующих механизмах магнитного поля: разупрочнение при измерении микротвердости и упрочнении при ползучести. Качественно, результаты настоящего исследования совпадают с [9], поскольку показывают сильное упрочнение при совместном действии поля и деформации. Отсутствие влияния поля на микротвердость может быть связано с обратимостью (релаксацией) МПЭ, который исчезает при увеличении промежутка времени между обработкой в магнитном поле и непосредственным измерением микротвердости, т.е. вылеживании образца. Деформационные кривые сжатия в области упругости свидетельствуют об упрочнении магнитным полем и, как следствие закона Гука, о повышении «эффективного» модуля Юнга.

Наблюдаемое упрочнение алюминиевого сплава в магнитном поле может быть связано с закреплением дислокаций на парамагнитных центрах, в качестве которых рассматриваются фазы Гейслера (типа Cu_2MnAl) или частицы типа FeAl . Известно, например, что фаза Гейслера является ферромагнитной, а FeAl имеет высокое значение константы магнитострикции $\lambda_m = 8 \times 10^8 \text{ Н}/(\text{Тл} \cdot \text{м}^2)$ [9]. Увеличение микротвердости связывается с увеличением числа подвижных дислокаций в процессе сжатия. Дислокации в кристалле взаимодействуют между собой или закрепляются на примесных центрах. Это приводит к возрастанию прочностных свойств Al т.е. к его упрочнению. Обратный эффект наблюдался на монокристаллах алюминия [10] и технически чистого титана ВТ1-0 [11], где в отсутствие динамического сжатия при значениях магнитной индукции 0.3–0.5 Тл наблюдалось разупрочнение, т.е. открепление дислокаций от стопоров, являющихся парамагнитными центрами. Увеличение доли таких частиц в магнитном поле будет способствовать появлению высоких напряжений на границе раздела матрица–частица и магнитострикционную механизма магнитоупругости.

Выводы

1. Степень деформационного упрочнения сплава в процессе сжатия в магнитном поле кратно выше, чем при отсутствии магнитного поля. Эффект магнитного поля сильнее выражен в упругопластической области.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код научной темы, присвоенной учредителем FFGU-2024-0023. Автор благодарит сотрудника лаборатории физики высоких давлений Дагестанского НЦ РАН Велиханова А.Р. за проведение экспериментов в

магнитном поле.

1. <http://www.issp.ac.ru/journal/perst> (название, авторы, дата обращения)
2. Pavlov V.A., Pereturino I.A., Pecherikina I.L. название статьи // Phys. Stat. Sol. (a). 1980. V. 57. P. 449–459.
3. Лебедев В.П., Крыловский В.С. Электронное торможение дислокаций в алюминии в магнитном поле // Физика твердого тела. 1985. Т. 27. № 5. С. 1285–1290.
4. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Перекалина Т.М., Урусовская А.А. О движении дислокаций в кристаллах NaCl под действием постоянного магнитного поля // ФТТ. 1987. Т. 29. № 2. С. 467–471.
5. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Петржик Е.А. Магнитоупругий эффект в монокристаллах алюминия // Физика твердого тела. 1992. Т. 34 (1). С. 155–158.
6. Серебрякова А.А., Загуляев Д.В., Шляров В.В. Влияние магнитного поля с индукцией до 0.5 Тл на динамику деформационных характеристик свинца // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2023. Т. 20. № 1. С. 52–58.
7. Покоев А.В., Осинская Ю.В., Шаханова С.Г., Ямщикова К.С. Магнитоупругий эффект в алюминиевых сплавах // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2018. Т. 82. № 7. С. 961–964.
8. Шляров В.В., Загуляев Д.В. Изменение механических характеристик поликристаллических парамагнитных материалов в магнитном поле // Вестник сибирского государственного индустриального университета. 2020. № 1. С. 39–43.
9. Моргун Р.Б., Валеев Р.А., Скворцов А.А., Королев Д.В., Пискорский В.П., Куницына Е.И., Кучеряев В.В., Коплак О.В. Магнитоупругий и магнитоупругий эффекты в алюминиевых сплавах с магнитострикционными микровключениями // Труды ВИАМ. 2019. № 10 (82). С. 3–13.
10. Альшиц В.И., Даринская Е.В., Казакова О.Л. Магнитоупругий эффект и спин-решеточная релаксация в системе дислокация – парамагнитный центр // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики. 1996. Т. 64. № 8. С. 628–633.
11. Шляров В.В., Загуляев Д.В., Серебрякова А.А. Анализ изменения микротвердости, скорости ползучести и морфологии поверхности разрушения титана ВТ1-0, деформируемого в условиях действия постоянного магнитного поля // Frontier Materials and Technologies. 2022. № 1. С. 91–100.

СТРУКТУРНОЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ И ДИНАМИЧЕСКОЕ НАГРУЖЕНИЕ БРОНЗЫ

Столяров В.В.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; vlstol@mail.ru

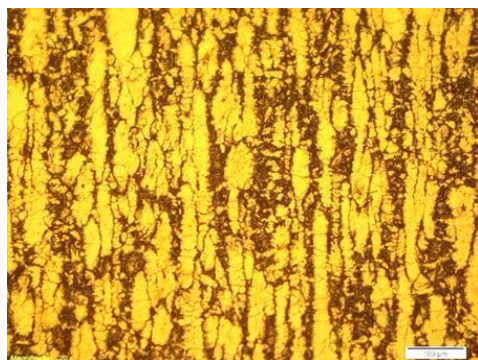
Выполнено сравнение деформационного поведения алюминиевой бронзы в крупнозернистом и ультрамелкозернистом состояниях при статическом и динамическом нагружении. Показано, что структурное измельчение и скорость деформации влияют на характер деформационного упрочнения, форму кривых растяжения и графический модуль упругости.

Цель

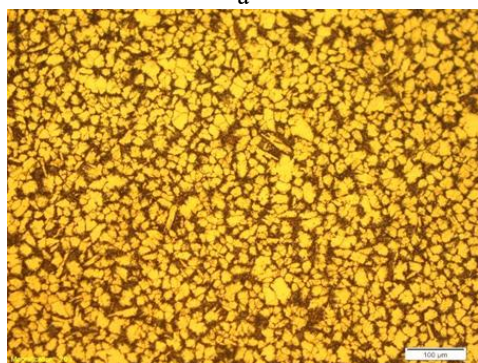
Цель работы заключалась в исследовании возможности упрочнения бронзы методом структурного измельчения с использованием равноканального углового прессования (РКУП) [1].

Материал и методы исследования

Объектом исследования была алюминиевая бронза БрАЖНМц 9-4-4-1 [2]. Заготовки для РКУП представляли собой прутки диаметром 20 мм и длиной 100 мм, полученные из исходных полуфабрикатов лезвийной обработкой и подвергнутые отжигу для снятия напряжений при температуре 800 °С в течение 3 часов. Исходная микроструктура материала в продольном и поперечном направлении после отжига представлена на рис. 1.



а



б

Рис. 1. Исходная микроструктура заготовок в продольном (а) и поперечном (б) направлениях

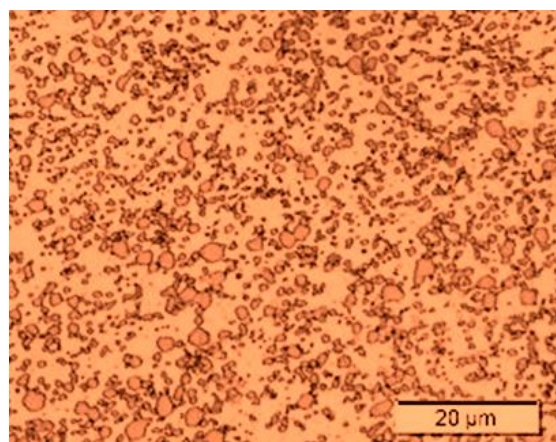
РКУП выполняли с графитовой смазкой за четыре прохода на оснастке с углом пересечения каналов 120°, нагретой до 500 °С. Температуру заготовок в процессе прессования снижали с 850 до 700 °С.

Результаты и их обсуждение

Образцы после РКУП и их микроструктура представлена на рис. 2. Сравнение микроструктур, представленных на рис. 1 и 2 показывает, что размер зерен после РКУП уменьшился с 20 до 2 мкм.



а



б

Рис. 2 Вид (а) и микроструктура (б) образцов

Рентгеноструктурный (РСА) качественный анализ бронзы до РКУП выявил присутствие следующих фаз: твердый раствор Al в Cu, интерметаллидные частицы $AlFe_3$ и Al_4Cu_9 . После РКУП фаза $AlFe_3$ отсутствовала, что может объясняться её растворением при интенсивной деформации и высокой температуре.

В табл. 1 представлены результаты динамических испытаний образцов до и после РКУП.

Таблица 1. Механические свойства

Состояние	Скорость деформации, с^{-1}	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа
исходное	915	480	665
	1400	580	740
	1475	610	710
	1620	590	800
	1750	505	695
РКУП	1015	640	650
	1135	635	640
	1445	700	710
	1800	700	760

В исходном (крупнозернистом) состоянии динамический предел текучести повысился на 5–25%, по сравнению со стандартными характеристиками при статическом растяжении. После РКУП динамический предел текучести по сравнению с исходным состоянием повысился на 15–25%, при этом предел прочности практически не изменился.

На рис. 3 представлены примеры диаграмм нагружения образцов для различных скоростей деформации в исходном состоянии и после РКУП.

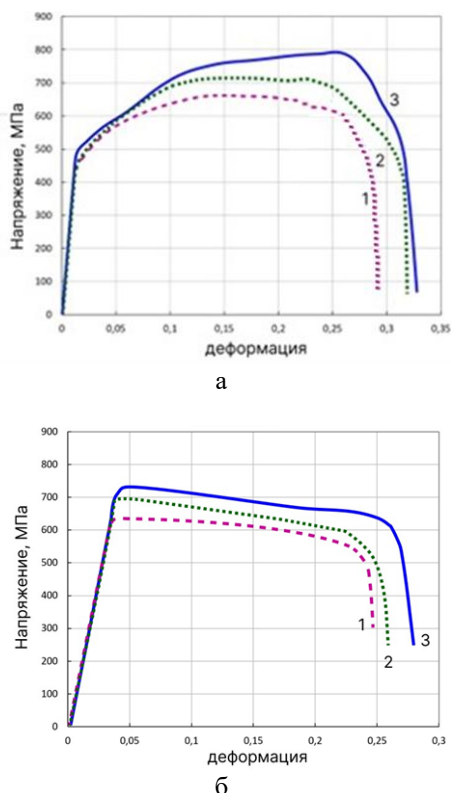


Рис.3 Кривые нагружения до (а) и после РКУП (б)

а: 1 – $\dot{\epsilon} = 915 \text{ с}^{-1}$, 2 – $\dot{\epsilon} = 1475 \text{ с}^{-1}$, 3 – $\dot{\epsilon} = 1620 \text{ с}^{-1}$; б: 1 – $\dot{\epsilon} = 1015 \text{ с}^{-1}$, 2 – $\dot{\epsilon} = 1445 \text{ с}^{-1}$, 3 – $\dot{\epsilon} = 1800 \text{ с}^{-1}$

Видно, что в РКУП состоянии графический модуль упругости меньше, чем в исходном состоянии. Разница между пределами текучести и прочности резко снижается, практически отсутствуют зоны деформационного упрочнения, а после упругого участка начинается продолжительная стадия деформационного разупрочнения, заканчивающаяся образованием шейки. В общем случае, факторами, определяющими снижение модуля упругости в таких материалах могут быть пористость, кристаллографическая текстура и неравновесное состояние границ зерен. В данной работе это может быть связано с отсутствием и растворением частиц интерметаллидной фазы AlFe_3 на границах зерен. Наблюдающееся разупрочнение на кривых нагружения в РКУП образцах обусловлено изменением масштабного уровня структуры и переходом к более неустойчивым состояниям кристаллической решетки [3]

Заключение

Анализ результатов выполненных исследований позволяет сделать следующие общие выводы.

1. Интенсивная пластическая деформация бронзы БрАЖНМц 9-4-4-1 методом равноканального углового прессования при повышенной температуре позволяет выполнить структурное измельчение и уменьшить средний размер зерен с 20 до 2 мкм.

2. Измельчение структуры привело к повышению динамического предела текучести на 15–25%, уменьшению модуля Юнга. Динамический предел прочности при этом практически не изменился

3. Измельчение структуры привело к изменению вида диаграмм динамического нагружения. Двухстадийное деформационное упрочнение, характерное для крупнозернистого состояния, сменилось на деформационное разупрочнение в ультрамелкозернистом состоянии.

4. Подтверждено традиционное влияние скорости деформации, повышение которой в интервале $(1-2) \times 10^3 \text{ с}^{-1}$ способствует повышению предела текучести без заметного изменения предела прочности.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код научной темы, присвоенной учредителем FFGU-2024-0023. Автор благодарит предприятие АО «Армалит» и д.т.н., проф. Савенкова Г.Г. за представление материала.

1. Рааб Г.И. К вопросу промышленного получения объемных ультрамелкозернистых материалов // Физика и техника высоких давлений. 2004. Т. 14. № 4. С. 83 – 89.
2. ГОСТ 18175-78 Бронзы безоловянные, обрабатываемые давлением.
3. Попов Л.Е., Старенченко В.А., Колупаева С.Н. Неустойчивости пластической деформации кристаллов и формирование дислокационных дефектных структур // Математическое моделирование систем и процессов, 1995. № 3. С. 77 – 87.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Талалай М.В.

Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия; m.talalay@lebedev.ru
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

Рассматриваются системные недостатки метрологического обеспечения автоматизированного контроля автомобильных дорог. Показано, что характеристики диагностических комплексов, декларируемые производителями, не учитывают динамических и эксплуатационных нагрузок и могут быть занижены более чем в 2 раза. В качестве решения предлагается переход к обязательной оценке неопределенности измерений измерительных каналов при проектировании измерительных комплексов, что позволит повысить достоверность и юридическую значимость результатов строительного контроля.

Введение

Строительный контроль автомобильных дорог – один из важнейших процессов строительства, эксплуатации, экспертизы, паспортизации, ремонта дорог, а также обеспечения качества и безопасности эксплуатации дорожного покрытия, прогнозирования возможных нарушений в будущем. В рамках диагностики проводят измерения поперечной и продольной ровности покрытия, его коэффициента сцепления, геометрических параметров дороги, а также производят поиск дефектов покрытия. [1-3]

Поскольку диагностика любого объекта подразумевает наличие измерительной задачи, важным элементом строительного контроля становится обеспечение достоверности его результатов. Одной из главных проблем отрасли дорожного строительства является относительно слабое развитие метрологического обеспечения, в том числе автоматизированных средств диагностики.

Существующие методы диагностики

Диагностика дорожных покрытий представляет собой комплексный эксперимент, сочетающий различные методы анализа с применением первичных преобразователей, основанных на разных физических принципах.

Международный индекс шероховатости IRI основан на моделировании реакции на неровности автомобиля, движущегося со скоростью 80 км/ч – это эталонный средний выпрямленный уклон, который выражает отношение накопленного движения подвески автомобиля, деленное на расстояние, пройденное во время испытания. В отчете объясняется, как все измерения шероховатости можно соотнести с этой шкалой, в том числе при движении на скоростях ниже 80 км/ч. [4-5]

Для измерения показателя использовались любые виды профилометров, и методика измерения не отличалась от методики измерения шероховатости, используемой в машиностроительных отраслях производства. Оценка шероховатости дорожного покрытия могла

быть сопряжена с оценкой состояния дороги, но основным назначением результатов было их использование в механических расчетах движения транспортного средства.

Последний из нормативных документов имеет измененное определение ровности и предлагает несколько подходов:

1) измерение рейкой длиной 3 м с клиновым промерником, предусматривающее измерение величины просвета под рейкой;

2) измерение нивелиром и нивелирной рейкой, предусматривающее вычисление модуля разности вертикальных отметок поверхности с шагом 5, 10 и 20 м;

3) измерение с применением автомобильной установки ПКРС-2 или другими приборами, показания которых приведены к показаниям ПКРС, предусматривающее определение интенсивности (уровня) вертикальных колебаний прицепного прибора относительно подрессоренного кузова, выражаемое в виде суммарного перемещения неподдресоренной массы, относительно подрессоренной на 1 км дороги (см/км).

Значения параметра ровности имеют сильную корреляционную взаимосвязь с такими параметрами, как модуль упругости дорожной конструкции, коэффициент прочности, оказывает влияние на значение коэффициента сцепления, а также может вносить погрешности в результаты измерения размеров предполагаемых дефектов. [6-8]

Важным элементом работы дорожных лабораторий также является видеосъемка или сканирование, проводимые для получения цифровой модели дорожного покрытия в целях определения наличия дефектов покрытия. Это необходимый этап диагностики для прогнозирования эксплуатационных характеристик изделия, однако невозможно точно сказать, каким должен быть диапазон измерения размеров дефектов и точность их оценки.

Не лишены проблем и измерения такого параметра как коэффициент сцепления. Коэффициент сцепления представляет собой векторную величину, на значение которой

существенное влияние оказывают параметры колеса ТС и характеристик конкретного участка дороги. Существующие методы измерений (приборы ППК-МАДИ и ПКРС) имеют разный физический принцип, что уже не позволяет обеспечить сопоставимость и сходимость результатов измерений. (рис.1)

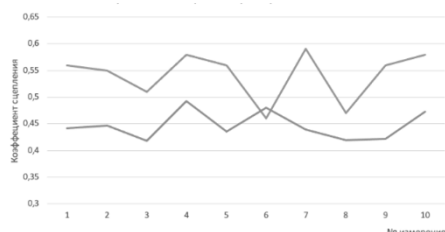


Рис. 1. Различия результатов измерений параметра коэффициента сцепления одного участка покрытия различными СИ

Метрологические характеристики средств диагностики

На примере измерительного канала коэффициента сцепления была рассмотрена проблема завышения характеристик производителями дорожных лабораторий. По результатам составленного бюджета неопределенности для ПКРС с тензометрическим первичным преобразователем было установлено, что суммарная погрешность $\delta_{\Sigma} = \pm 4,26\%$ более чем в 2 раза превышает указанный предел допустимой погрешности прибора $\pm 2\%$.

При расчете погрешности измерительного канала высказано предположение о равномерном законе ее распределения (1).

$$\delta_{\Sigma} = \pm 1,1 \sqrt{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}. \quad (1)$$

Производители дорожных лабораторий также вводят при конструировании допущение о том, что части кузова автомобиля при эксплуатации и оптическая станина для установки видеоизмерительных и сканирующих систем являются недеформируемыми. Данное упрощение математической модели движения и кручения элементов дорожной лаборатории не может не оказывать вклада в суммарную погрешность измерительных каналов, конкретно в ее неисключенную систематическую составляющую. (2)

$$\Delta_{\Sigma} = \pm k \sqrt{\Delta_{\text{инстр}}^2 + \Delta_{\text{мет}}^2 + \Delta_{\text{суб}}^2}. \quad (2)$$

Выводы

В ходе анализа существующих методов диагностики и паспортизации автомобильных дорог общего назначения были выявлены существенные недостатки в подходах к проектированию измерительной техники в дорожной отрасли. Перспективными методами повышения качества строительного контроля при помощи автоматизированных комплексов диагностики следует считать обязательное обоснование метрологических характеристик лабораторий на основе рекомендаций по метрологии машиностроения, а также повышение точности отдельных измерительных каналов за счет снижения систематической составляющей суммарной погрешности измерения путем оценки вклада в погрешность динамических нагрузок на элементы дорожной лаборатории (транспортного средства в ее основе).

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0023.

1. В. С. Шилин, М. В. Талалай, Я. С. Никитин, О. С. Однороб. Строительный контроль при государственно-частном партнёрстве // Инновационные материалы и технологии в транспортном строительстве и дорожном хозяйстве: сборник научных трудов бакалавров и магистров кафедры «Дорожно-строительные материалы» МАДИ. Том Выпуск 6. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Техполиграфцентр", 2022. – С. 41-44.
2. А.В. Кочетков, В.И. Алферов, В.В.Талалай Применение риск-ориентированного подхода в дорожном хозяйстве/под научной редакцией Ю.Э.Васильева. - М.: МАДИ, 2020. - 211 с.
3. Расследование дорожно-транспортных происшествий: Справочно-методическое пособие / под ред. В.А. Алферова и В.А. Федорова – М., 1998.
4. Технический отчет Всемирного банка №46 (World Bank Technical Paper Number 46 «Guidelines for Conducting and Calibrating Road Roughness Measurements», M.W. Sayers, T.D. Gillespie, W.D.O. Paterson, 1986, 87 p.)
5. Технический отчет Всемирного банка №45 (World Bank Technical Paper Number 45 «The International Road Roughness Experiment: Establishing Correlation and a Calibration Standard for Measurements», М.пиW. Sayers, T.D. Gillespie, C. Queiroz, 1986.)
6. Буртыль Ю. В., Капский Д. В. Моделирование взаимосвязи ровности и прочности нежестких дорожных одежд на основании теоретическо-практических исследований // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 4 (86). С. 570-583. <https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-570-58>
7. Уроков А. Х., Соаталиев Р. Р., Ахраров А. М. Анализ результатов ровности дорожного покрытия, полученных на различных устройствах // «Молодой учёный». No21(468) –. 2023 г. – с. 109-111
8. Уроков А. Х., Соаталиев Р. Р. Исследование показателей ровности дорожного покрытия (IRI) на автомобильных дорогах общего пользования // «Молодой учёный». No21(468) –. 2023 г. – с. 111-115

РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ ДЛЯ ИХ АВТОМАТИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

Тимашов Е.П.¹, Пастухов А.Г.¹, Вергун В.И.¹

¹Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина, Белгород, Россия; timachov@mail.ru

Для обоснования диагностических критериев работоспособности подшипниковых узлов по параметрам температуры предложена разработка их цифровых двойников. В работе проведено обобщение результатов анализа температурного состояния подшипниковых узлов на примере трансмиссии автомобиля КамАЗ с колесной формулой 6×4. Выделены характерные величины температур: 1) температура в зоне трения при номинальных нагрузках; 2) температура в зоне трения, ограниченная свойствами смазочного материала.

Цель

Обобщить результаты анализа и моделирования температурного состояния подшипниковых узлов для обоснования критериев их автоматического диагностирования.

Введение

Возможности и вызовы в области современной технической эксплуатации машин и оборудования обуславливают актуальность разработки новых технологий и средств автоматической диагностики [1-3]. Установлено, что обоснование диагностических критериев температурной диагностики подшипниковых узлов должно быть основано на анализе температурного состояния диагностируемых узлов при номинальных нагрузочных режимах [4, 5]. Подшипниковые узлы наиболее приспособлены к автоматической тепловой диагностике, так как их тепловыделение находится в прямой зависимости от коэффициента полезного действия, а он, в свою очередь, зависит от общего технического состояния подшипника [6, 7]. Вместе с тем, существующие технические средства – электронные термометры, пирометры, тепловизоры, логгеры температуры, приспособлены для их интеграции в конструкцию машин и оборудования.

Материалы и методы

Объекты диагностирования – подшипниковые узлы трансмиссии автомобиля КамАЗ с колесной формулой 6×4 с коробкой перемены передач типа 152 без делителя. Анализ распределения температуры проводили при помощи прикладной библиотеки APM FEM в программе КОМПАС-3D V 18.1. Эксплуатационные температурные наблюдения выполнены с использованием инфракрасного пирометра INSTRUMAX PIRO-330» и тепловизора UTi260B.

Результаты и их обсуждение

На основании проведенных ранее исследований можно выделить основные критерии, характеризующих техническое состояние подшипниковых узлов [8]: 1) температура в зоне трения при номинальных нагрузках; 2) температура в зоне трения, ограниченная свойствами применяемого смазочного материала. Превышение

температуры по любому из этих критериев свидетельствует о нарушении работоспособности подшипника.

Цифровой двойник подшипникового узла представляет собой сочетание математической модели температуры в зоне трения и конечно-элементной модели распределения температуры в узле.

Были разработаны математические модели температуры в зоне трения радиальных, радиально-упорных подшипников и игольчатых подшипников карданных шарниров [9]. На рис. 1 показаны рабочие окна компьютерных программ расчета температуры в зоне трения.

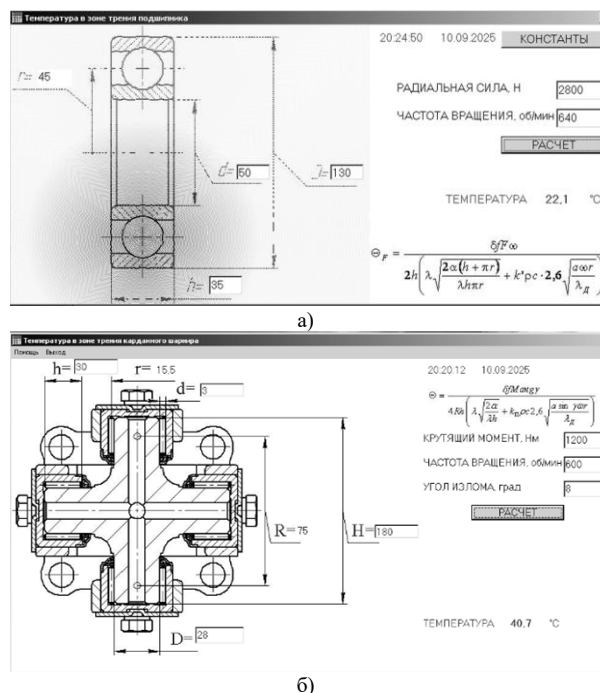


Рис. 1. Рабочие окна программ расчета температуры в зоне трения: а) подшипников [1] б) карданных шарниров [1]

Определение температуры в зоне трения при номинальных нагрузках требует анализа кинематических схем агрегатов трансмиссии и расчета нагрузок на подшипниковые узлы [12-14]. На рис. 2 показана кинематическая схема с обозначением следующих условных блоков: 1) коробка перемены передач 2) карданный вал среднего моста; 3) средний мост; 4) карданный вал

заднего моста 5) задний мост; 6) передняя ступица;

7) задняя ступица.

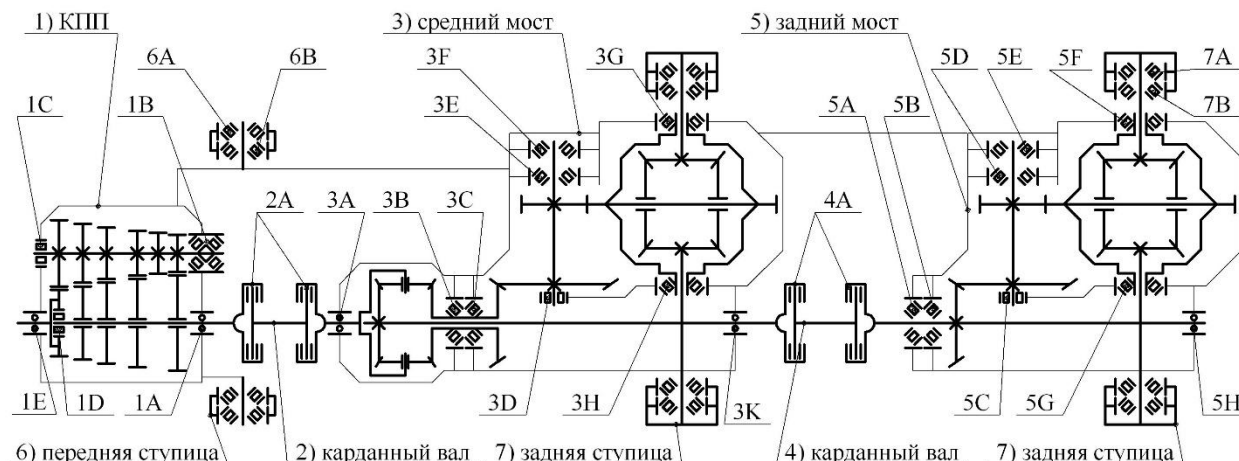


Рис. 2. Кинематическая схема трансмиссии

При расчетах нагрузок на все подшипниковые узлы использован режим двигателя с частотой вращения коленчатого вала 2600 об/мин при крутящем моменте 638 Нм, нагрузки на подшипники ступиц определены при разрешенной полной массе автомобиля.

В цифровом двойнике подшипникового узла установлена взаимосвязь между температурой в зоне трения и температурой в зоне диагностирования (в зоне измерения) как коэффициент пропорциональности конечно-элементной модели k при помощи прикладной библиотеки APM FEM в программе КОМПАС-3D V 18.1. Полученный коэффициент позволяет по температуре, измеренной на поверхности подшипникового узла, определить температуру в зоне трения и сравнить её с предельной величиной по трем основным критериям. На рис. 3 приведен пример карты температурных полей.

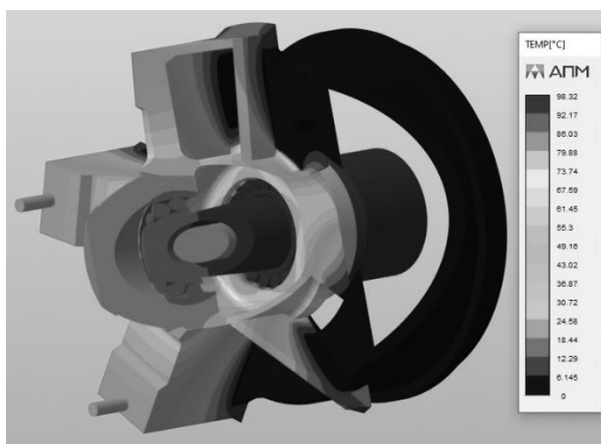


Рис. 3. Карта температурных полей задней ступицы

В таблице приведены результаты моделирования температуры в зоне трения Θ_F , диагностической температуры Θ_D и коэффициента пропорциональности конечно-элементной модели k для номинальных нагрузок и по критерию

температуры, ограниченной свойствами применяемого смазочного материала. Обозначения подшипников в табл. 1 зашифрованы в соответствии с рис. 2, где цифрой обозначена принадлежность подшипника к блоку трансмиссии, а латинской буквой – позиция на кинематической схеме.

Таблица. Результаты моделирования температуры в зоне трения Θ_F , диагностической температуры Θ_D и коэффициента пропорциональности конечно-элементной модели k

Подшипник	Температура при номинальных нагрузках, °C		k	Температура, ограниченная свойствами смазочного материала, °C	
	Θ_F	Θ_D		Θ_F	Θ_D
1A	46,5	14,0	0,33	191,0	63,0
1B	48,1	15,9	0,33	191,0	63,0
1C	130,1	(130,1)	(1)	191,0	(191,0)
1D	188,9	(188,9)	(1)	191,0	(191,0)
1E	130,8	(130,8)	(1)	191,0	(191,0)
2A	40,3	34,7	0,86	169,0	145,0
3A	32,7	29,4	0,90	130,0	117,0
3B	25,7	-	-	130,0	-
3C	142,1	-	-	130,0	-
3D	142,5	(142,5)	(1)	130,0	(130,0)
3E	56,5	-	-	130,0	-
3F	81,2	-	-	130,0	-
3G	55,4	-	-	130,0	-
3H	42,4	(42,4)	(1)	130,0	(130,0)
3K	69,1	-	-	130,0	-
4A	22,3	19,4	0,87	169,0	(147,0)
5A	85,6	36,0	0,42	130,0	(54,6)
5B	85,6	36,0	0,42	130,0	(54,6)
5C	132,3	(132,3)	(1)	130,0	(130,0)
5D	65,1	-	-	130,0	-
5E	65,1	-	-	130,0	-
5F	49,7	-	-	130,0	-
5G	38,1	-	-	130,0	-
5H	21,0	-	-	130,0	-
6A	71,1	49,7	0,70	120,0	84,0
6B	53,4	49,7	0,93	120,0	112,0
7A	91,1	73,9	0,81	120,0	97,0
7B	98,3	73,9	0,75	120,0	90,0

Для некоторых подшипниковых узлов значения

диагностической температуры приведены в скобках, а коэффициент k равен единице. Такие узлы конструктивно расположены в глубине агрегатов, поэтому косвенное определение их температуры через температуру на поверхности невозможно. В этом случае целесообразно при проектировании корпуса агрегата предусматривать технологические отверстия для размещения контактных датчиков температуры. Для 11 узлов пока не определены величины коэффициентов k и диагностических температур Θ_D – это задача дальнейших исследований.

У подшипниковых узлов 1D, 2C, 2D и 5C расчетная температура в зоне трения приближена или превышает температуру, ограниченную свойствами применяемого смазочного материала. В случае подшипникового узла 1D коробки перемены передач повышенную температуру (188,9 °C) показал передний подшипник выходного вала, при этом конструктивно этот подшипник обеспечен принудительной подачей масла под давлением для эффективного теплоотвода. Для подшипниковых узлов среднего и заднего моста 2C, 2D, 5C смазывание осуществляется жидким смазочным материалом, то фактически указанные подшипники не успевают достичь расчетных температур.

Достоверность проведенных исследований подтверждается эксплуатационными измерениями температуры. При этом наблюдаемые температуры сопоставимы с определенными теоретически с учетом температуры окружающего воздуха.

Выводы

1. На основе обобщения результатов анализа и моделирования температурного состояния подшипниковых узлов обоснованы критерии автоматического диагностирования: 1) температура в зоне трения при номинальных нагрузках; 2) температура в зоне трения, ограниченная свойствами смазочного материала.

2. В результате анализа моделирования температуры в зоне трения, конечно-элементного анализа и эксплуатационных измерений температуры подшипниковых узлов разработаны их цифровые двойники для автоматического диагностирования.

3. Выявлены сложные температурные условия работы у подшипника коробки перемены передач (76-592708M1 ГОСТ 520-89), двух подшипников среднего моста (6-751A ГОСТ 27365-87 102409M ГОСТ 8328-75) и одного подшипника заднего моста (102409M ГОСТ 8328-75).

1. Пестряков, Е.В. Контроль технического состояния энергонасыщенных тракторов с использованием алгоритмов искусственного интеллекта / Е.В. Пестряков,

- Ю.В. Катаев, М.Н. Костомахин [и др.] // Техника и оборудование для села. – 2024. – № 9(327). – С. 2-5. – DOI 10.33267/2072-9642-2024-9-2-5.
2. Саяпин, А.С. Повышение контролепригодности для надежности - ориентированного технического обслуживания и ремонта сельскохозяйственной техники / А.С. Саяпин, М.Н. Костомахин, Е.В. Пестряков, Н.А. Петрищев // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – 2024. – № 1(23). – С. 63-71.
3. Пастухов, А.Г. Обеспечение реализации цифровых систем диагностирования элементов трансмиссии на основе тепловыделения / А.Г. Пастухов, Е.П. Тимашов // Технический сервис машин. – 2019. – № 4(137). – С. 68-75.
4. Тимашов, Е.П. Термометрическая диагностика карданного шарнира привода жатки CERIO 770 / Е.П. Тимашов, А.П. Тимашов, А.А. Миненко // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2020. – № 2(26). – С. 94-105.
5. Pastukhov, A. Temperature Conditions and Diagnostics of Bearings / A. Pastukhov, E. Timashov, D. Stanojević // Applied Engineering Letters. – 2023. – Vol. 8, No. 2. – P. 45-51. – DOI 10.18485/aletters.2023.8.2.1.
6. Pastukhov, A.G. Numerical modelling of temperature condition the cardan joint at bench tests / A.G. Pastukhov, E.P. Timashov // Traktori i Pogonske Mašine. – 2019. – Vol. 24, No. 1-2. – P. 39-47.
7. Pastukhov, A.G. Monitoring Transmission Components by Digital Thermal Diagnostics / A.G. Pastukhov, E.P. Timashov // Russian Engineering Research. – 2023. – Vol. 43, No. 3. – P. 246-250. – DOI 10.3103/S1068798X23040214.
8. Пастухов, А.Г. Исследование температурного режима опорных подшипниковых узлов коробки передач автомобиля / А.Г. Пастухов, Е.П. Тимашов // Вестник машиностроения. – 2024. – Т. 103, № 1. – С. 58-63. – DOI 10.36652/0042-4633-2024-103-1-58-63.
9. Тимашов, Е.П. алгоритм верификации аналитических моделей температуры в зоне трения подшипниковых узлов / Е.П. Тимашов, В.И. Вергун // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2022. – № 4(36). – С. 69-73.
10. Пастухов, А.Г. Совершенствование технологии диагностирования опорных узлов трансмиссии автомобиля КАМАЗ-55111 / А.Г. Пастухов, Е.П. Тимашов, В.И. Вергун // Технический сервис машин. – 2024. – Т. 62, № 1. – С. 21-27. – DOI 10.22314/2618-8287-2024-62-1-21-27.
11. Тимашов, Е.П. Исследование температурных режимов подшипниковых узлов коробки передач автомобиля КАМАЗ-5320 для обеспечения их контролепригодности / Е.П. Тимашов, А.Г. Пастухов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2023. – № 4. – С. 45-51. – DOI 10.31857/S023571192304017X.
12. Тимашов, Е.П. Исследование температурных режимов подшипниковых узлов заднего моста автомобиля КАМАЗ для обеспечения их контролепригодности / Е.П. Тимашов, А.Г. Пастухов, О.В. Бармина // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2025. – № 5. – С. 105-113. – DOI 10.31857/S0235711925050122.
13. Тимашов, Е.П. Исследование температурных режимов подшипниковых узлов среднего моста автомобиля КАМАЗ для обеспечения их контролепригодности / Е.П. Тимашов, А.Г. Пастухов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2025. – № 2. – С. 107-114. – DOI 10.31857/S0235711925020139.
14. Тимашов, Е.П. Техническое диагностирование подшипниковых узлов карданного вала на основе цифровой термодиагностики / Е.П. Тимашов, А.Г. Пастухов // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2024. – № 1. – С. 100-106. – DOI 10.52261/02346206_2024_1_100.

РАЗРАБОТКА ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ

Тимашов Е.П., Пастухов А.Г., Вергун В.И.

ФГБОУ ВО «Белгородский ГАУ им. В.Я. Горина», Майский, Россия

В статье рассмотрены существующие датчики температуры такие как: интегральный датчик, термopapa, полупроводниковый датчик и терморезистор. Описан патент на полезную модель «Контролепригодный подшипниковый узел» № RU 221360 U1. На основе патента был изготовлен датчик температуры для автоматического диагностирования подшипниковых узлов.

Цель исследования: анализ существующих датчиков температуры, их конструкций, принципов работы, а также создание датчика температуры для диагностирования опорных узлов трансмиссии.

Введение

В наше время с развитием современных технологий особое внимание уделяется повышению требований к надежности техники. Для обеспечения высокой надежности особую значимость приобретают вопросы контроля и диагностики ключевых узлов трансмиссии. Опорные узлы трансмиссии являются более нагруженными элементами конструкции, поэтому их надежность важна для обеспечения работоспособности техники.

Существующие методы диагностирования опорных узлов трансмиссии имеют ряд ограничений, одним из таких ограничений является непостоянный контроль, из-за которого происходят простои автомобилей и убытки организаций. В связи с этим предлагается использовать автоматическую температурную диагностику, которая будет обеспечивать с помощью датчиков постоянный контроль температуры и сигнализировать об изменении технического состояния при эксплуатации техники [1].

Разработка современного датчика температуры позволит повысить уровень технического обслуживания и надежности эксплуатируемой техники.

Материалы и методы

В процессе исследования рассмотрены различные температурные датчики: интегральный датчик, термopapa, полупроводниковый датчик, терморезистор. Для сравнения датчиков использовались методы сравнения, анализа и синтеза. Рассмотрен разработанный контролепригодный подшипниковый узел.

Основная часть

Датчики температуры – это устройства для преобразования температурных показателей в электрический сигнал. В современной промышленности существует множество различных типов датчиков температуры, которые отличаются между собой различным набором функций. При выборе конкретного датчика

температуры нужно учитывать условия работы и функциональные возможности датчика.

В работе авторами был проведен анализ датчиков температуры для процесса охлаждения воды [2]. В исследовании рассмотрены следующие датчики: термопреобразователь сопротивления, недостатком которого является малый диапазон измерения от 0 °C до 100 °C и маленький срок службы; термометр сопротивления, недостатком которого является маленький срок службы, а также он не имеет унифицированного сигнала; датчик температуры, недостатком также является маленький срок службы и нет унифицированного сигнала.

В следующих работе авторами рассмотрен интегральный датчик температуры на выходе которого будет вырабатываться напряжение пропорциональное абсолютной температуре [3, 4]. У данного датчика имеется много достоинств таких как: простота использования, разнообразие типов по выходному сигналу и гарантированная точность измерения. Однако имеются и недостатки такие как: ограничение по применению, необходимость стабильного источника питания и необходимость специализированного оборудования для точной настройки.

Авторами данной работы был рассмотрен такой тип датчика температуры как термopapa [5]. Достоинствами термopapa является их температурный диапазон от – 200 °C до +2500 °C, устойчивость, быстрый отклик и отсутствие самонагрева. Так же у этих датчиков имеются и недостатки такие как: сложность преобразования аналогового сигнала, подверженность коррозии и восприимчивость к шуму.

Полупроводниковые датчики температуры были рассмотрены авторами в следующей работе [6]. Достоинствами датчиков являются компактные размеры и практическое применение. Среди ключевых недостатков этих датчиков выделяют: влияние внешних факторов, и сложность калибровки.

В настоящее время известен датчик для измерения температуры в условиях агрессивной среды [7]. Данное устройство состоит из металлического корпуса и инфракрасного датчика, который защищен электроизоляционным материалом. На корпусе датчика имеется резьба и грани для удобства монтажа датчика при помощи

инструмента. Особенностью датчика является то, что его чувствительный элемент направлен в центр дна особой формы – в виде усеченного конуса. При этом контакт датчика с поверхностью дна не происходит. Существенным недостатком данного устройства является инфракрасный датчик, точность измерения которого зависит от цвета поверхности дна в форме усеченного конуса. В процессе работы под действием температуры металлический корпус может менять цвет этой поверхности как обратимо, так и необратимо. Именно из-за этого снижается точность измерения температуры.

Известен датчик контроля температуры буксы пассажирского вагона [8]. Конструкция датчика включает в себя: корпус, резьбовую втулку и штуцер, оснащенный кабельным вводом. Внутри штуцера подключен термочувствительный элемент с подключенным кабелем. Для обеспечения стабильной работы полость штуцера заполнена специальным составом обладающим электроизоляционными и теплопроводящими свойствами. Недостатком данного устройства является то, что в процессе производства при заполнении датчика специальным составом будут образовываться пузырьки воздуха из-за чего не будет обеспечено постоянное тепловое сопротивление. В итоге это приведет к снижению точности измерения температуры.

Исходя из вышеперечисленного разработан датчик температуры для измерения подшипниковых узлов.

Результаты

В результате проведенных исследований и анализа конструкторских разработок был получен патент на полезную модель «Контролепригодный подшипниковый узел» № RU 221360 U1 [9]. Главной задачей контролепригодного подшипникового узла является обеспечение надежного и стабильного теплового сопротивления между подшипниковым узлом и датчиком температуры.

Устройство представленное на рис. 1 работает по следующему принципу: сначала глухое резьбовое отверстие 2 заполняют электроизоляционной теплопроводящей пастой 3, потом вкручивают корпус датчика 4 с помощью ручного инструмента через шлицевой буртик 8. При установке датчика через продольные пазы 10 на поверхность подшипникового узла 1 выходят излишки и воздух, тем самым обеспечивая надежно тепловое сопротивление между контролепригодным подшипниковым узлом 1 и датчиком температуры 6. За счет гибкого пыльника 9 достигается герметичность соединения. Во время работы подшипникового узла 1 происходит его нагрев и повышение температуры электроизоляционной теплопроводящей пасты 3, а также датчика температуры 6, который создает электрический

сигнал пропорциональный измеряемой температуре. Этот сигнал передается через провода к клеммной колодке 7 для подключения диагностического оборудования.

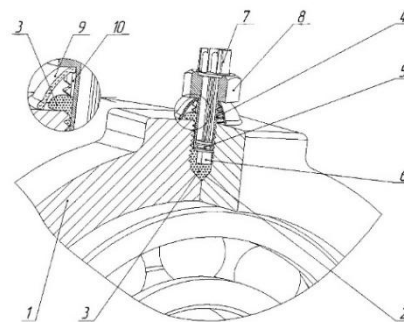
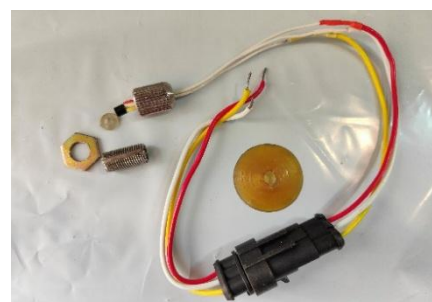


Рис. 1 Контролепригодный подшипниковый узел; 1 - подшипниковый узел; 2 - глухое резьбовое отверстие; 3 - электроизоляционная теплопроводящая паста; 4 - корпус датчика; 5 - герметичная заглушка; 6 - датчик температуры; 7 - клеммная колодка; 8 - шлицевой буртик; 9 - пыльник; 10 - продольные пазы.

На основе патента был изготовлен контролепригодный подшипниковый узел рис. 2.



а)



б)

Рис. 2. Датчик температуры для автоматического диагностирования подшипниковых узлов: а) датчик в разобранном состоянии; б) датчик в собранном состоянии

Технические характеристики созданного датчика температуры:

- корпус устройства изготовлен из нержавеющей стали;
- использован датчик TMP 36;

- максимальная погрешность: $\pm 0,5$ °C;
- диапазон измеряемой температуры: от -40 °C до +150 °C;
- водонепроницаемый автомобильный электрический соединитель, штекер и гнездо с проводом JST 3P;
- герметик DONEWELL;
- термопаста КПТ-8.

Главным преимуществом нашего устройства является то, что за счет нашей разработанной конструкции имеем более эффективную теплопередачу из зоны тепловыделения к датчику.

Разработанный датчик температуры полностью совместим с цифровым регистратором неисправности узлов механических трансмиссий [10, 11].

Выводы

1. Проведен анализ существующих температурных датчиков таких как: интегральный датчик, термопара, полупроводниковый датчик, терморезистор.

2. Получен патент на полезную модель «Контролепригодный подшипниковый узел» № RU 221360 U1.

3. На основе полученного патента был разработан датчик температуры для автоматического диагностирования подшипниковых узлов по параметрам температуры. Диапазон измерений от -40 °C до +150 °C, погрешность измерений $\pm 0,5$ °C.

1. Тимашов Е.П., Вергун В.И. Автоматическая диагностика подшипниковых узлов // Актуальные проблемы агроинженерии в XXI веке : Материалы национальной научно-практической конференции с международным участием, посвященной памяти д.т.н., профессора Вендина Сергея Владимировича, Майский, 15 ноября 2024 года. – Майский: ФГБОУ ВО Белгородский ГАУ, 2024. – С. 45-46.
2. Колесниченко К.П., Медведева Л.И. Анализ и подбор

датчика измерения температуры для технологического процесса // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2023. – № 39. – С. 52-56.

3. Андреев В.В., Перминова А.Д. Интегральный датчик температуры // Электронный журнал: наука, техника и образование. – 2020. – № 1(28). – С. 113-119.
4. Кораблев А. Интегральные датчики температуры Analog Devices с цифровым выходом // Электронные компоненты. – 2020. – № 1. – С. 95-96.
5. Дафф М., Тауи Д. Два способа измерения температуры при помощи термопар: простота или гибкость и точность // Компоненты и технологии. – 2011. – № 4(117). – С. 29-34.
6. Бирюкова О.В., Корецкая И.В. Полупроводниковый датчик температуры: получение и преобразование сигнала в режиме реального времени // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2017. – Т. 11, № 1. – С. 26-30.
7. Патент № 2664980 С1 Российская Федерация, МПК G01J 5/00, G01J 5/04, G01K 13/00. Датчик для измерения температуры в агрессивной среде : № 2017143060 : заявл. 08.12.2017: опубл. 24.08.2018 / Д.Н. Фролов, Р.Р. Камалетдинов, И.Т. Бакиев, Д.В. Фролова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Башкирский государственный аграрный университет".
8. Патент на полезную модель № 167696 U1 Российская Федерация, МПК B61K 9/04, G01K 13/00, G01K 1/04. Датчик контроля температуры буксы пассажирского вагона: № 2016136734 : заявл. 13.09.2016 : опубл. 10.01.2017 / А.А. Анашкин, В.В. Чулочкин.
9. Патент на полезную модель № 221360 U1 Российская Федерация, МПК F16C 17/24. Контролепригодный подшипниковый узел : № 2023113722 : заявл. 25.05.2023 : опубл. 02.11.2023 / Е.П. Тимашов, А.Г. Пастухов, В.И. Вергун, О.В. Тимашова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина".
10. Патент на полезную модель № 209268 U1 Российская Федерация, МПК G01M 13/02, G01K 13/08, H04N 5/33. Цифровой регистратор неисправности трансмиссии : № 2020143184 : заявл. 25.12.2020 : опубл. 10.02.2022 / Е. П. Тимашов, А. Г. Пастухов ; заявитель Автономная некоммерческая организация высшего образования "Белгородский университет кооперации, экономики и права".
11. Тимашов Е.П. Цифровой регистратор неисправности трансмиссии // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2022. – № 1(33). – С. 110-116.

АГЕНТНАЯ RAG-СИСТЕМА С ОБРАБОТКОЙ ДОКУМЕНТОВ ПО УСТРОЙСТВУ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Угурчиев А.М., Горохов А. Д.

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия;

Представлена агентная RAG-система для ответов на запросы по корпоративным данным, объединяющая мультимодальную предобработку (PDF, DOCX, XLSX, PPTX, CSV, JSON), извлечение таблиц в Markdown/JSON, OCR и детекцию изображений. Реализовано обновление индекса FAISS, осознанные ответы и планирование с пересмотром шагов. Описаны веб-API с аутентификацией, мониторинг директорий и индексация по хешам, а также рекомендации по оценке качества.

RAG-система — это интеллектуальная программа, которая может отвечать на вопросы инженеров по внутренним документам предприятия. Она сначала находит нужные материалы в документации, а потом формирует ответ на естественном языке, как эксперт-консультант. [1–3]

В машиностроении инженеры работают с множеством инструкций, чертежей и таблиц. Поиск нужных данных вручную занимает много времени. RAG-система позволяет задать вопрос на обычном русском языке — например: «Какие допуски указаны для подшипника в узле А?» — и мгновенно получить точный ответ с указанием страницы документа.

Имеет:

- мультимодальная обработка документов (таблицы в Markdown/JSON форматах, изображения, OCR-текст;
- осознанные ответы при ссылке на конкретные страницы/слайды;
- обновление индекса FAISS (база данных, где хранятся числовые представления документов для быстрого поиска по смыслу);
- агентное планирование с пересмотром шагов и учётом токенов;
- веб-API с JWT, разделение по проектам (project_id), мониторинг папок

На рис. 1 приведена схема: ‘источники (наши документы) → процессоры (извлеченный текст) → чанки/плейсхолдеры (куски текста, где таблицы либо изображения заменены на плейсхолдеры) → эмбединги (числовые «отпечатки» текста, которые позволяют искать не по словам, а по смыслу) → FAISS (база векторов) → агент (формирует план что искать, где искать и как комбинировать) → ответ’. Компоненты: ядро RAG (разбиение, эмбединги, поиск с фильтрами по проекту и странице); обработчики (текст, таблицы, изображения, плейсхолдеры); агент (JSON-план, выбор инструмента, пересмотр плана и синтез ответа с учётом токенов); компонент ответов (приоритизация указанной страницы/слайда); сервисный слой (FastAPI, JWT, проекты, мониторинг директорий, хеш-верификация).

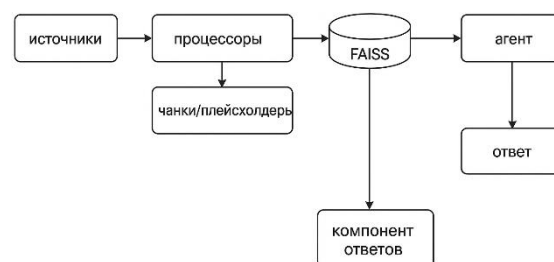


Рис. 1. Архитектура предлагаемой RAG-системы

Поддерживаются PDF, DOCX, XLSX, PPTX, CSV, JSON. Для PDF используются pdfminer/PyMuPDF; таблицы сохраняются в Markdown и JSON, изображения выделяются с помощью OpenCV, для мало-текстовых страниц применяется OCR (Tesseract). Для DOCX/Excel/PPTX извлекаются тексты, таблицы и встроенные картинки; для CSV учитываются кодировки и разделители; для JSON применяется ‘расплющивание’. Плейсхолдеры встраиваются в текстовые фрагменты, полные артефакты сохраняются отдельно в extracted/.

Таблица 1. Поддерживаемые форматы и извлекаемые сущности

Формат	Текст	Таблицы (MD/JSON)	Изображения	OCR
PDF	Да	Да	Да	Да
DOCX	Да	Да	Да	—
XLSX	Да	Да	Да	—
PPTX	Да	Да	Да	—
CSV	—	Да	—	—
JSON	Да	—	—	—

Текст разбивается на перекрывающиеся фрагменты с метаданными (document_id, page, type). Индекс FAISS обновляется без простоя: устаревшие векторы заменяются новыми для изменившихся документов, запросы не прерываются. Поиск поддерживает фильтры по project_id и странице с пост-фильтрацией. Размер чанка и перекрытие подбираются эмпирически (например, 300–400 и 80–120).

Агент формирует JSON-план (один или несколько шагов), выбирает инструмент и параметры на основе результатов предыдущих

шагов, при ошибках пересматривает план. Это полезно для составных запросов ('сравнить', 'найти в таблице на слайде 5', 'дать список с фильтром'), а также при обращении к табличным данным. Если пользователь указывает страницу/слайд, в промпт добавляется указание приоритизировать соответствующие фрагменты, что снижает риск смешения контента. Учёт токенов по фазам помогает контролировать стоимость.

Интерфейс на FastAPI: загрузка документов (проверки расширений/размера, безопасные имена под Windows), аутентификация по JWT и проекты, эндпоинт запросов с выдачей ответа, плана, шагов и счётчиков токенов, просмотр списка документов и извлечённых артефактов. Мониторинг директорий (watchdog) и хеш-верификация позволяют переиндексировать только изменившиеся файлы, ускоряя обновления без простоя.

- Качество: точность/полнота по собственным QA-наборам; доля ответов 'вне контекста'.
- Производительность: задержка запроса, время обновления индекса, вклад хеш-проверок; стоимость по токенам.
- Абляции: влияние размеров чанков/перекрытия; многошагового планирования; включения табличных чанков.
- Практика: для обновлений без простоя готовить новые эмбединги и выполнять безопасную замену;

для таблиц — хранить Markdown/JSON и иметь точечный извлекатель.

Представлена RAG-система, сочетающая мультимодальную предобработку, обновление индекса FAISS, ответы и агентное планирование. Компоновка сервисов (API, аутентификация, мониторинг, переиндексация) делает решение пригодным к промышленной эксплуатации. Дальнейшая работа: оценка на бенчмарках RAG, интеграция и автоматическое цитирование источников.

RAG-система помогает инженеру быстрее находить нужные данные, исключает ошибки при обращении к устаревшим документам и повышает качество проектных решений.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0024

1. Lewis P., Perez E., Piktus A., et al. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP. NeurIPS, 2020.
2. Johnson J., Douze M., Jégou H. Billion-scale similarity search with GPUs. IEEE TPAMI, 2019.
3. LangChain Documentation. <https://python.langchain.com/>
4. OpenAI API Reference. <https://platform.openai.com/docs>
5. OpenRouter API Docs. <https://openrouter.ai/docs>
6. PyMuPDF, pdfplumber, Tesseract OCR Documentation.
7. Watchdog (Python) Documentation. <https://python-watchdog.readthedocs.io/>

ИНЖЕНЕРНЫЙ РАСЧЕТ СРЕДНЕЙ КОНТАКТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ПРОКАТКЕ ТОНКОЙ СТАЛЬНОЙ ПОЛОСЫ

Угурчиев У.Х.¹, Новикова Н.Н.^{1*}

*E-mail umar77@bk.ru

¹ФГБУ науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН),
Москва, Россия.

В статье представлены результаты исследований при продольной холодной прокатке тонкой стальной полосы на лабораторном одноклетьевом стане, проведен расчет средней контактной температуры на площади контакта. Расчеты выполнены с использованием аналитической модели, учитывающей условия сухого трения. Полученные данные могут быть использованы при решении инженерных задач обработки металлов давлением.

В работе Б.Э. Гурского и А.В. Чичинадзе [1] проведен полный и детальный анализ тепловой задачи трения, охватывающий все аспекты: от формулировки проблемы до методов ее решения и анализа полученных результатов. Исходя из решений этой задачи в 60-х годах прошлого столетия, А.В. Чичинадзе и его коллеги сформировали новое направление в трибологии – «Тепловая динамика трения и износа (ТДТИ)» [2]. Данный подход опирается на постулате об определяющем влиянии температуры, возникающей в зоне трения, на величину как силы трения, так и степени износа материалов. Благодаря ТДТИ были достигнуты весомые успехи в инженерных расчетах нестационарных режимов трения в тормозных и фрикционных системах, функционирующих в условиях сложной тепловой обстановки. В книге Крагельского И.В. [3] представлено состояние науки о трении и износе на основе анализа значительного числа работ, выполненных как в СССР, так и за рубежом. В монографии Албагачиева А.Ю. и др. [4] уточнены основные постулаты теории обработки металлов с учетом пластических деформаций.

В статье рассматривается один из технологических процессов – обработка металла давлением: холодная прокатка тонких металлических полос.

В ходе обработки металлов давлением (ОМД) силы внешнего трения играют определяющую роль. Характер напряженно-деформированного состояния обрабатываемого материала, возникающий под воздействием силового воздействия через контактную поверхность инструмента, в значительной степени зависит от величины сил трения.

В процессе обработки металлов давлением, характеризующимся высокими нормальными напряжениями и пластическим состоянием обрабатываемого материала, решающее значение на величину сил контактного трения оказывает деформационное взаимодействие трущихся поверхностей. Силы трения в данных условиях обусловлены сопротивлением сдвиговым деформациям в приповерхностном слое деформируемого материала.

Для точного расчёта сил трения, обусловленных

сопротивлением сдвигу в приконтактном слое, необходимо определить механические свойства материалов данного слоя и площадь фактического контакта (или площадь, по которой происходит сдвиг) в зависимости от величины нормального давления, состояния контактной поверхности и реологических свойств деформируемого материала. Основным отличием механизма пластического трения при ОМД является то, что сила смещения контактного элемента деформируемого материала по поверхности инструмента обусловлена в первую очередь упругопластическим течением материала в объеме деформируемого тела.

Следовательно, величина напряжений контактного трения, возникающая как реакция на эти смещения, зависит от распределения напряжений и деформаций в зоне обработки – от механики самого процесса деформации.

Проведенные исследования выявили, что в условиях ОМД величина сил трения определяется двумя группами факторов.

К первой категории относятся факторы, связанные с физико-механическими и химическими взаимодействиями между поверхностью инструмента и обрабатываемым материалом, а также воздействием различных промежуточных сред, включая смазочные материалы и окалину.

Ко второй категории относят факторы, которые учитывают трансформации механических свойств и параметров напряженного и деформированного состояния материала в зоне, прилегающей к контактной поверхности.

В частности, существенное значение имеют силовые параметры (нормальные давления) и кинематические условия (скольжение, прилипание и прочие явления) на контактных поверхностях. Эти параметры формируются вследствие механических условий деформации.

При моделировании процессов холодной обработки металлов давлением, для оценки механических характеристик материала в расчетах часто используется среднее значение предела текучести по всему объёму деформируемого тела. При проведении инженерных расчетов основных технологических параметров процессов обработки металлов давлением необходима приблизительная оценка средних значений сил трения.

Среднее касательное напряжение по контактной поверхности, как правило, является функцией нескольких факторов:

- * Фактор, отражающий механику процесса деформации: этот фактор учитывает геометрические характеристики процесса (например, фактор формы, угол захвата), кинематические параметры (натяжение, рассогласование скоростей) и способ приложения внешней нагрузки.

- * Параметр, характеризующий состояние трущихся поверхностей: этот параметр учитывает шероховатость, чистоту и другие свойства поверхностей, контактирующих во время деформации.

- * Функция, описывающая изменение механических свойств деформируемого металла в зависимости от температурно-скоростных условий: эта функция учитывает влияние температуры и скорости деформации на прочность, пластичность и другие характеристики металла.

В рамках данного анализа будем рассматривать достаточно медленные процессы пластической деформации, где инерционные силы не оказывают существенного влияния, а на деформируемое тело не действуют массовые силы. Будем считать материал несжимаемым, а степень развития пластических деформаций настолько значительной, что упругими деформациями можно пренебречь.

При решении большинства инженерных задач обработки металлов давлением, определение среднего значения напряжений трения по всей контактной поверхности оказывается достаточным. Точное описание распределения сил трения по этой поверхности не является первоочередной задачей. Опыт показывает, что использование простых законов трения с выбором коэффициента трения, зависящего от нормального давления, позволяет получить вполне удовлетворительные результаты при определении таких параметров, как сила и мощность, а также интегральных характеристик формообразования (вытяжка, уширение и т.д.).

Усложнение модели трения для расчета подобных характеристик пластической деформации вряд ли будет оправдано.

Пропорциональное соотношение между касательными (τ) и нормальными (p) напряжениями считается справедливым лишь в зонах скольжения материала. В зонах торможения эти напряжения достигают максимального значения, равного пределу текучести при чистом сдвиге, и остаются постоянными. В зоне застоя напряжения снижаются линейно до нуля на границе раздела течения металла и инструмента.

Экспериментальные исследования демонстрируют, что отношение касательной силы трения к нормальной силе давления изменяется в зависимости от ряда факторов, действующих при

прокатывании участков скольжения.

К числу таких факторов относятся: геометрическая форма зоны деформации, угол захвата валков, наличие натяжения, рассогласование скоростей вращения валков и др. При изучении коэффициента трения исследуется его зависимость не только от состояния поверхности контакта инструмента и металла, но также от величины нормального давления, скорости скольжения металла по инструменту, температуры деформации, степени относительного сжатия, толщины прокатываемой полосы и характера приложения деформирующей нагрузки.

При холодной прокатке, несмотря на кратковременное воздействие температуры на поверхностный слой заготовки, нагревание не приводит к структурным и фазовым изменениям в материале. Однако подобное нагревание оказывает существенное влияние на формирование напряженно-деформированного состояния поверхности.

Для оптимизации технологических процессов важно иметь возможность прогнозировать теплонпряженность процесса холодной прокатки. Для этого необходимо располагать простой аналитической зависимостью, позволяющей рассчитать температуру в контактной зоне.

С этой целью были проведены исследования при продольной холодной прокатке (рис. 1) тонкой стальной полосы на лабораторном одноклетьевом стане (рис. 2), проведен расчет средней контактной температуры на площади контакта. Расчеты выполнены с использованием аналитической модели [5], учитывающей условия сухого трения.

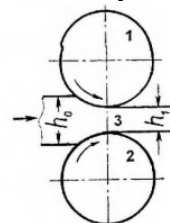


Рис. 1. Схема процесса продольной прокатки: 1-верхний валок; 2- нижний валок; 3 – прокатываемая полоса



Рис. 2. Лабораторный одноклетьевого стан

В ходе анализа учитывается одна клеть. Это обусловлено тем, что коэффициенты трения между клетями могут существенно варьироваться в

зависимости от температурно-скоростных режимов прокатки, состава сплава, шероховатости валков и характеристик смазочного материала.

В условиях высоких давлений в зоне деформации применение закона Амонтона–Кулона не представляется целесообразным, поскольку коэффициент трения становится зависимым от давления. В этой связи в теории обработки металлов давлением получили широкое распространение законы трения Э. Зибеля, А.Н. Леванова, Т. Ванхайма.

Конструкция клетки жесткая, поэтому усилия прокатки не изменяют межвалковый зазор и продольную разнотолщинность.

Для большинства задач обработки давлением оправдано допущение: изменение объема может быть только упругим, а при пластической деформации изменения объема не происходит.

Для определения контактных напряжений в условиях возникновения граничного трения, когда происходит пластическая деформация микровыступов на поверхности полосы, используется закон Зибеля [6].

Расчетная формула для определения средней контактной температуры θ_K на площади контакта:

$$\theta_K = \frac{F \cdot v \cdot \sqrt{f}}{2 \cdot A \cdot (\sqrt{\lambda_1 \cdot c_1 \cdot \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 \cdot c_2 \cdot \rho_2})} = \frac{f \cdot p_{cp} \cdot v \cdot \sqrt{f}}{2 \cdot \sqrt{3} \cdot (\sqrt{\lambda_1 \cdot c_1 \cdot \rho_1} + \sqrt{\lambda_2 \cdot c_2 \cdot \rho_2})}, \quad (1)$$

где удельная сила трения на сдвиг $\tau_{mp} = F/A = f \cdot p_{cp} / \sqrt{3}$, A - площадь контакта; F - максимальная контактная сила; v - скорость прокатки; t - время; p_{cp} - среднее нормальное контактное напряжение; λ_1, λ_2 - теплопроводность материала полосы и валка соответственно; a_1, a_2 - коэффициенты температуропроводности материала полосы и валка соответственно; c_1, c_2 - удельная теплоемкость материала полосы и валка соответственно; ρ_1, ρ_2 - плотность материала полосы и валка соответственно; где f - фактор трения.

Большинство металлов обладают высоким и практически постоянным коэффициентом поглощения. В таких случаях изменение плотности теплового потока с глубиной описывается интегральным законом Бугера-Ламберта.

Для аналитического решения краевых задач теплопроводности эффективно использовать метод источников (функций Грина). Суть метода заключается в замене решения уравнения теплопроводности решением уравнения относительно функции Грина, которая определяет распределение температуры в любой точке тела.

В случае одномерной задачи без объемных источников тепла начальное распределение температуры θ_K по глубине z полосы вычисляется по формуле:

$$\theta = \theta_K \cdot e^{-\frac{z^2}{4 \alpha t}}. \quad (2)$$

Исходные данные

Допущения: гладкие валки; при расчете принималось равенство секундных объемов металла до и после прокатки; уширение не учитывалось.

Начальная температура до прокатки равна $\theta_0 = 20^\circ\text{C}$ (температура внешней среды).

Диаметр валков = 60 мм; $v = 0,05$ м/с; $f = 0,22$. Полоса из стали 12X18H9T: ширина 8 мм, высота (толщина) до прокатки $h_0 = 4$ мм, длина = 100 мм, высота (толщина) после прокатки $h_K = 3,9$ мм.

Материал полосы: 12X18H9T; при 100°C : $\lambda_1 = 16,6 \cdot 10^{-6}$ (Вт/(м·град)), $a_1 = 16,6 \cdot 10^{-6}$ (м²/с), $c_1 = 469$ (Дж/(кг·град)), $\rho_1 = 7860$ (кг/м³); $T_{пл} = T_{mc} = 1410^\circ\text{C}$; условный предел текучести $\sigma_{0,2} = 280$ МПа; предел прочности при растяжении $\sigma_B = 550$ МПа.

Материал валков: 75ХМ; при 100°C : $\lambda_2 = 45$ (Вт/(м·град)), $a_2 = 11,5 \cdot 10^{-6}$ (м²/с), $c_2 = 490$ (Дж/(кг·град)), $\rho_2 = 7900$ (кг/м³).

Температура полосы после прокатки с учетом тепловых потерь рассчитывалась по формуле:

$$\theta_{\text{полосы}} = \theta_0 + 0,9 \cdot \theta_K.$$

Результаты расчета представлены табл. 1.

Таблица 1.

	$\theta_K, ^\circ\text{C}$	$\theta_{\text{полосы}}, ^\circ\text{C}$
при $p_{cp} = \sigma_{0,2} = 280, \text{ МПа}$	16,57	34,9
при $p_{cp} = \sigma_B = 550, \text{ МПа}$	32,55	49,3

На рис. 3 показано рассчитанное по формуле (2) распределение температуры θ по толщине полосы z (глубина проникновения).

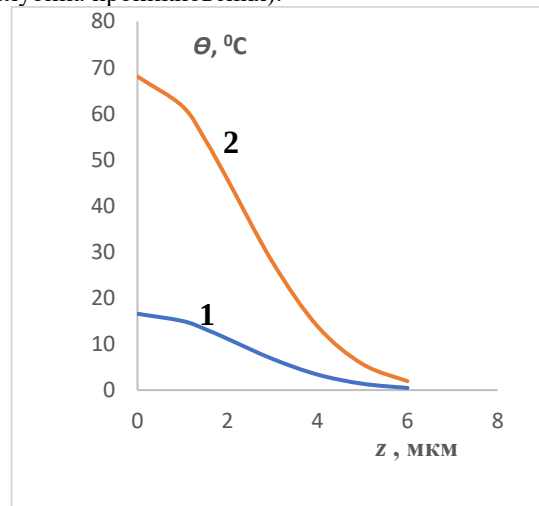


Рис. 3. Распределение температуры θ ($^\circ\text{C}$) по толщине полосы z (глубина проникновения, мм): 1- при $\sigma_{0,2} = 280$ МПа, 2- при $\sigma_{0,2} = 1150$ МПа

В многочисленных исследованиях детально изучено воздействие обжатия на предел текучести различных металлов и сплавов при холодной прокатке. В табл. 2 приведены механические характеристики стали 12X18H9T (стар. Х18Н9Т) в зависимости от степени пластической деформации.

Табл.2.

Степень обжатия, %	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа
Закалка 1050 °C, вода		
0	280 (± 400)	550 (± 650)
30	900	950
70	1150	1250

В табл. 3 представлены расчетные данные средней контактной температуры θ_K от степени обжатия.

Табл.3.

Степень обжатия, %	$\sigma_{0,2}$, МПа	θ_K , °C (расчетное)
Закалка 1050 °C, вода		
0	280 (± 400)	16,57
30	900	53,26
70	1150	68,06

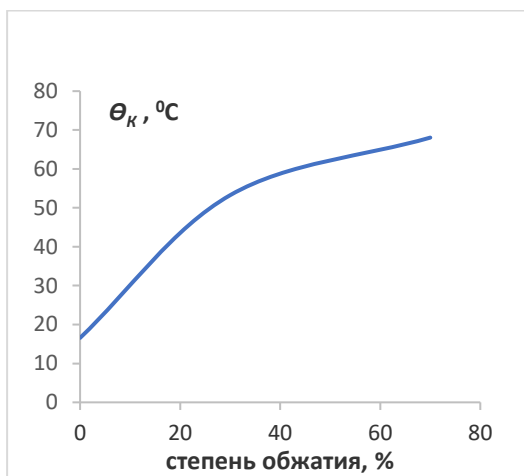


Рис. 4. Зависимость средней контактной температуры θ_K от степени обжатия при $\sigma_{0,2} = 280, 900, 1150$, (МПа)

Расчетное значение средней контактной температуры на площади контакта θ_K фрикционной пары «тонкая полоса 12X18H9T – валок 75XM» показал, что аналитическая модель (1) демонстрирует корректное значение θ_K в зависимости от степени обжатия при прокатке тонкой стальной полосы.

Изложенное в статье не исключает целесообразности дальнейшего экспериментального исследования трения для некоторых достаточно частных условий деформации при простом подходе к их изучению с позиции зависимости (1).

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0023

1. Гурский Б.Э., Чичинадзе А.В. Тепловая задача трения // Современная трибология: Итоги и перспективы / Отв. ред. К.В. Фролов. - М.: Издательство ЛКИ. 2008. С. 297–366.
2. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинтер, Э.Д. Браун и др.: Под общ. ред. А.В. Чичинадзе. - М.: Машиностроение. 2003. 576 с.
3. Трение и износ. Крагельский И. В. Изд. 2-е перераб. и доп. - М.: Машиностроение. 1968. 480 с.
4. Теоретические основы обработки металлов в машиностроении: монография /А.Л. Воронцов, А.Ю. Албагачиев, Н.М. Султан-заде. - Старый Оскол: ТНТ. 2014. 552 с.
5. Ugurchiev U. Kh., Novikova N. N. Modeling Temperature during Strip Rolling //Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2025. Vol. 54. No. Suppl. 6. pp. S599–S607. DOI: 10.1134/S1052618825701018.
6. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением. Леванов А.Н., Колмогоров В.Л., Буркин С.П., Картак Б.Р., Ашпур Ю.В., Спаский И., М. - М.: Металлургия. 1976. 416 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ СКОРОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ И ДЕФОРМИРОВАНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ НАСЛЕДСТВЕННОГО ТИПА

Фомина Е.И.¹, Думанский А.М.¹, Худорожко М.В.¹

¹Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия; 89150682218@mail.ru

Проанализированы закономерности нелинейного деформирования однонаправленного углепластика с термопластичной матрицей в условиях скоростного нагружения. Разработана методика построения нелинейного определяющего соотношения для прогнозирования анизотропии механических свойств образцов однонаправленного углепластика. В ее основу положены аппроксимации кривых мгновенного деформирования при внутрислойном сдвиге и поперечном растяжении.

Цель

Цель работы — создание и верификация математической модели однонаправленного термопластичного углепластика для произвольных углов армирования при разных скоростях нагружения.

Введение

Термопластичные композиционные материалы (КМ), армированные непрерывными углеродными волокнами, приобретают все большее значение в таких отраслях, как аэрокосмическая, энергетическая и автомобильная промышленность. Данные материалы находят применение при изготовлении конструкций крыльев, хвостовых балок, секций фюзеляжей, лопастей ветряных турбин, сосудов высокого давления, автомобильных компонентов и спортивного инвентаря [1].

Повышенный интерес к термопластичным композитам обусловлен их способностью обеспечивать значительно более высокую вязкость разрушения по сравнению с КМ на основе терморезистивных связующих. Увеличение вязкости разрушения полимерной матрицы признано ключевой стратегией для повышения устойчивости к расслоению и повреждениям в КМ [2].

На начальной стадии проектирования слоистых композитов необходима оценка свойств однонаправленного слоя, при этом реологические свойства будут наиболее явно проявляться при нагрузках, не совпадающих с направлением армирования [3].

Материалы и методы испытаний

Материал: однонаправленный углепластик (ОН УП) AS4/PEEK.

В качестве экспериментальной базы использовались испытания из работ [4, 5]. Исследования включают испытания образцов ОН УП на растяжения при температуре 100° С на сервогидравлической установке при двух скоростях нагружения: 100 и 1 МПа/мин. Ориентация образцов: 10°, 30°, 45°, 60° и 90°

Уравнения мгновенных кривых деформирования

Кривая мгновенного деформирования — некоторая идеальная кривая, отражающая зависимость напряжений-деформаций, исключая деформации ползучести [6]. Мгновенная кривая является верхней огибающей для кривых скоростного деформирования при данной температуре.

Напряжения мгновенной кривой пересчитываются через напряжения скоростных кривых с помощью соотношения Работнова:

$$\varphi_i(\varepsilon_i) = (1 + k_i I_{ai}^*) \sigma_i, \quad (1)$$

$$\text{где } I_{ai}^* \cdot \sigma_i = \frac{1}{\Gamma(1 + \alpha_i)} \int_0^t (t - \eta)^{\alpha_i} \sigma_i(\eta) d\eta \quad —$$

наследственный оператор с ядром Абеля, $-1 < \alpha_i < 0$ — параметр ядра, k_i — коэффициент.

Определение параметров мгновенных кривых при поперечном растяжении и внутрислойном сдвиге приведено в работе [7].

Анизотропия механических свойств однонаправленных углепластиков

В рамках предложенного подхода упругие постоянные в матричных соотношениях анизотропной теории упругости преобразованы в наследственные операторы.

Модель предполагает упругое поведение в направлении армирования и независимость от времени коэффициента Пуассона. Нелинейные наследственные операторы представляют собой операторы внутрислойного сдвига φ_{12} и поперечного растяжения в φ_2 .

В качестве аппроксимации оператора внутрислойного сдвига использовалась экспоненциальная функция, а для поперечного растяжения — кусочно-линейная.

Связь напряжений-деформаций в таком случае примет вид:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = [T_2] \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\nu_{21} \cdot \varphi_2^{-1} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \varphi_2^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & \varphi_{12}^{-1} \end{bmatrix} [T_2]^T \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

где $[T_2]$ — матрица преобразования, φ_2^{-1} , φ_{12}^{-1} — обратные наследственные операторы внутрислойного сдвига и поперечного растяжения.

Сравнение продольных и поперечных деформаций, полученных согласно уравнению (2), с экспериментальными для двух скоростей нагружения представлено на рис. 1.

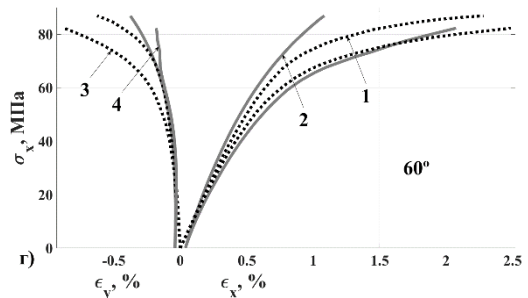
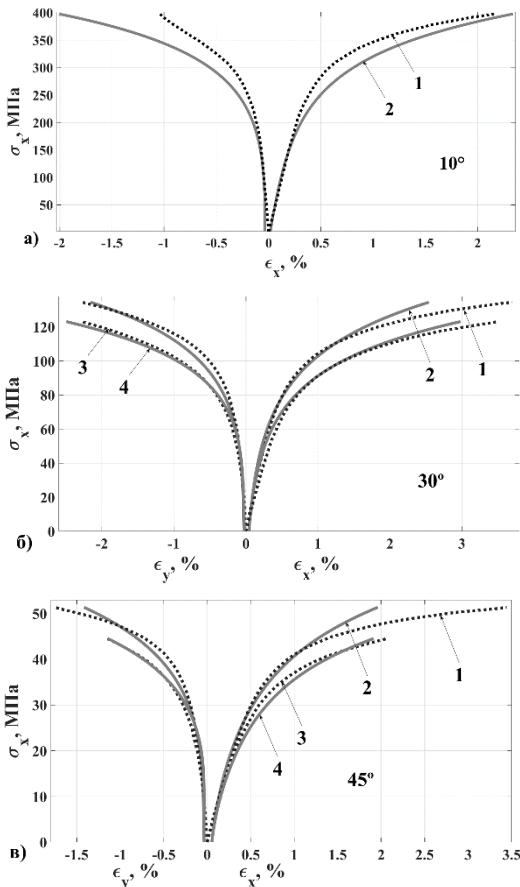


Рис. 1. Сравнение экспериментальных 1, 3 и расчетных 2, 4 кривых деформирования при 100 МПа/мин и 1 МПа/мин соответственно

Результаты

Разработана методика построения нелинейного определяющего соотношения, прогнозирующего анизотропию механических свойств термопластичных однонаправленных углепластиков при различных скоростях нагружения для произвольного угла армирования.

Предложенный подход учитывает физическую нелинейность, обусловленную откликом материала при внутрислойном сдвиге и поперечном растяжении.

Перспективы развития модели связаны с переходом к прогнозированию свойств многослойных структур и элементов конструкций.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0021.

1. Wang H., Huo S., Chevali V., Hall W. [et al.]. Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics: From Materials to Manufacturing and Applications // *Advanced Materials*, 2025. V. 37, Is. 27.
2. Barile M., Lecce L., Iannone M. [et al.]. Thermoplastic Composites for Aerospace Application // *Revolutionizing Aircraft Materials and Processes*. 2020. P.87—114.
3. Голован В.И., Гришин В.И., Дзюба А.С. [и др.]. Проектирование, расчеты и статические испытания металлокомпозитных конструкций. М.: Рекламно-издательский центр «Техносфера». 2022. 408 с.
4. Kawai M., Masuko Y., Kawase Y. [et al.]. Micromechanical analysis of the off-axis rate dependent inelastic behavior of unidirectional AS4/PEEK at high temperature // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2001. V.43 (9). P. 2069—2090.
5. Kawai M., Masuko Y. Macromechanical modeling and analysis of the viscoplastic behavior of unidirectional fiber-reinforced composites // *Journal of Composite Materials*. 2003. V.37 (21). P. 1885—1902.
6. Работнов Ю.Н., Милейко С.Т. Кратковременная ползучесть. М.: Наука. 1970. 224 с.
7. Думанский А.М., Алимов М.А., Фомина Е.И. Нелинейное деформирование однонаправленного углепластика при внутрислойном сдвиге в условиях скоростного нагружения // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2025. № 1. С. 11—19.

ВЛИЯНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ПОЛИМЕРНОГО МОДИФИКАТОРА НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МДО ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ Д16

Хади А.А.¹, Буковский П.О.²

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия; ayaalnourhadi775@gmail.com

²Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

Исследовано влияние полимер-модифицированных МДО-покрытий (микрофторопластов), добавленных в электролит, содержащий цианэтанол в различных концентрациях (0,5-6 г/л), на сплав Д16. Испытания на трение проводили на приборе MFT-5000 (Rtec, США) в соответствии со стандартом ASTM G99-23, где шарик из карбида кремния диаметром 10 мм скользил в одном направлении по поверхности образца с покрытием. Износ дорожек трения и шариков определялся с помощью оптического профилометра S-neox 3D (Sensofar-Tech, Испания). Коэффициенты трения составили от 0,4 до 0,6, что ниже, чем у керамических контактных материалов, что связано с добавлением в электролит антифрикционных модификаторов. Структура поверхности образцов была исследована с помощью сканирующей электронной микроскопии, и покрытия продемонстрировали износостойкость при низких концентрациях модификаторов.

Введение

Несмотря на такие преимущества алюминиевых сплавов, как малая плотность и высокая прочность, их низкая износостойкость ограничивает область их применения [1]. Однако фрикционные и износостойкие свойства могут быть улучшены с помощью модифицированного микродугового оксидирования путем введения добавок в различных концентрациях в компоненты электролита или путем финишной обработки после формирования керамических покрытий [2, 3], что позволяет насыщать поры покрытия добавленными модификаторами, такими как политетрафторэтилен, что приводит к снижению коэффициента трения, тем самым уменьшая износ и продлевая срок службы покрытия [4].

Целью данного исследования является изучение влияния различных концентраций микродисперсного полимера на коэффициент трения и износостойкость МДО-покрытий, созданных на алюминиевом сплаве Д16.

Материалы и методы

Пять образцов-дисков из деформируемого алюминиевого сплава Д16 были покрыты методом МДО с добавлением в электролит микродисперсного полимера «Форум» (Владформ, Россия) в различных количествах. Испытания на трение проводили в комнатных условиях (температура, влажность) на универсальном трибометре MFT-5000 (Rtec Instruments Inc., США) в соответствии с международным стандартом ASTM G99-23 в условиях однонаправленного сухого скольжения по схеме «шарик – диск» (рис. 1). Условия испытаний: постоянная нагрузка $F = 10$ Н, линейная скорость $V = 0,1$ м/с. Длина дорожки трения составляла $S = 1000$ м, продолжительность испытания $t = 10000$ с. Помимо стандартного радиуса дорожки трения 16 мм, для обеспечения повторяемости были проведены испытания с радиусом дорожки 12 мм при постоянной линейной скорости.

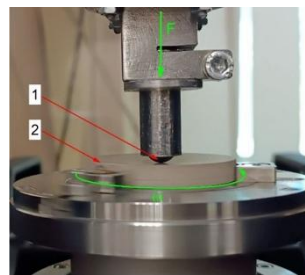


Рис. 1. Схема испытания: 1 - шарик из карбида кремния, 2 - образец с МДО-покрытием

После испытаний была рассчитана величина износа по дорожке трения при помощи оптического профилометра S neox 3D (Sensofar, Испания), где сканирование поверхности проводилось в конфокальном режиме. Режимы формирования МДО-покрытий и результаты по трению и износу приведены в табл. 1.

Поверхность образцов с МДО-покрытиями исследовались как до, так и после трибологических испытаний на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Quanta 650 (FEI, США), оснащенном аналитическим оборудованием EDAX, в том числе энергодисперсионным рентгеноспектральным микроанализатором (EDS), при ускоряющем напряжении 20 кВ. Поскольку изучаемые керамические МДО-покрытия являются диэлектриками, то при работе был выбран низковакуумный режим исследования при остаточном давлении 20 Па.

Результаты и их обсуждение

Для всех образцов были получены зависимости коэффициента трения от времени испытания (рис. 2). Значения коэффициента трения в среднем ниже, чем для контакта керамика-керамика, и находятся в диапазоне от 0,47 до 0,65. Образцы 2 и 5 показали сокращенный период приработки, а образцы 1 и 5 имели резкие эпизодические снижения коэффициента трения. Образец 4 имеет самый низкий и стабильный коэффициент трения (COF = 0,47).

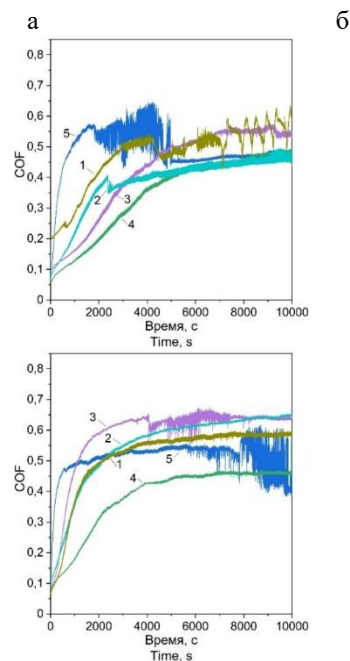


Рис. 2. Зависимости коэффициента трения от времени испытания для всех исследуемых образцов; а – радиус дорожки 16 мм, б – радиус дорожки 12 мм

Результаты по трению и износу образцов и шариков сведены в табл. 1. Следует отметить, что износ контртела растет с увеличением количества модификатора в электролите. Минимальный износ

покрытия зафиксирован для образца 4, который также показал лучший коэффициент трения. Механизмы действия модификатора можно объяснить, используя результаты, полученные методами микроскопии.

Таблица 1. Результаты испытаний с различными модификаторами на трение и износ

№ эксперимента	Состав электролита	Износ дорожки трения, мм ³	Износ шарика, мм ³	Коэффициент трения
1	БЭ + 0,5 г/л С	0,902 ± 0,28	0,00439 ± 0,0006	0,55 ± 0,02
2	БЭ + 1,0 г/л С	0,548 ± 0,039	0,00558 ± 0,0002	0,53 ± 0,07
3	БЭ + 2,0 г/л С	1,093 ± 0,11	0,00655 ± 0,0009	0,60 ± 0,03
4	БЭ + 3 г/л С	0,441 ± 0,04	0,00739 ± 0,0005	0,47 ± 0,01
5	БЭ + 6 г/л С	1,089 ± 0,15	0,0625 ± 0,0418	0,50 ± 0,02

На рис. 3 показано, насколько различается поверхность исходных образцов в зависимости от количества модификатора в электролите. А на рис. 4 проиллюстрированы поверхности МДО-покрытий после трибологических испытаний.

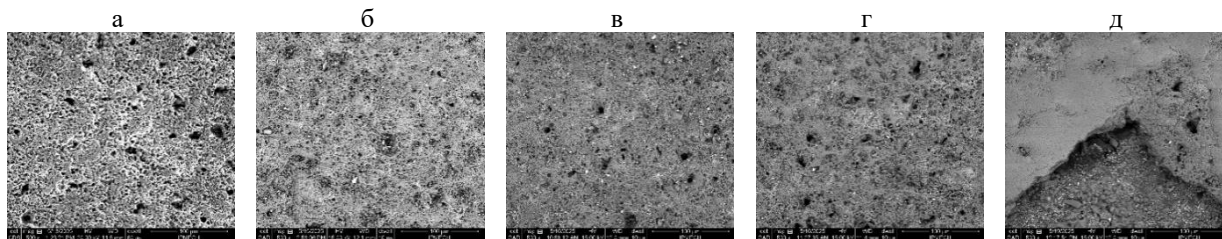


Рис. 3. СЭМ изображения поверхностей исходных образцов при увеличении 500×, где а-д образец 1-5, соответственно

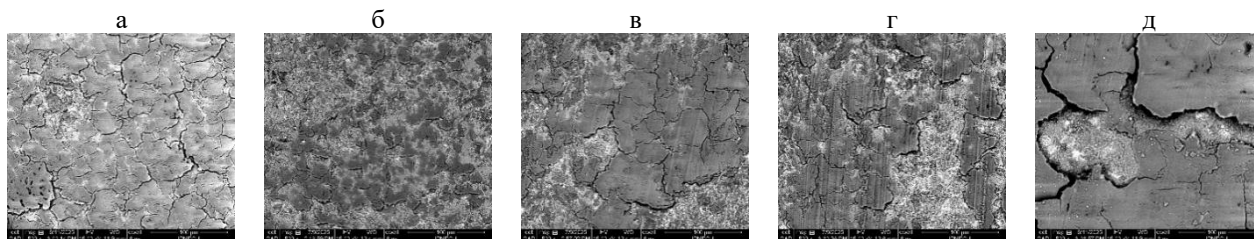


Рис. 4. СЭМ изображения поверхностей образцов после трения при увеличении 500×, где а-д образец 1-5, соответственно

Поры, характерные для керамических покрытий, имеют разные формы и размеры. Исходная поверхность данных образцов характеризуется относительно рыхлой структурой, представленной двумя отчетливо различимыми фракциями – светлой и темной. На СЭМ-изображениях

поверхностей после трения наблюдаются характерные признаки разрушения (локальные трещины). Вместе с тем, отмечается общее сглаживание поверхности по сравнению с исходным состоянием, что может быть связано с механизмом абразивного износа и/или

деформацией материала в процессе трения. Для образца 5 характерно образование крупных локальных трещин, приводящее к отслаиванию верхних слоев покрытия. Очевидно, это связано с изначальной дефектностью поверхности.

Выводы

Добавление модификаторов в электролит улучшает свойства МДО-покрытий, например, снижает коэффициент трения. Однако степень износа не зависит линейно от количества добавленного полимера. Существует оптимальное количество (до 3 г/л), при котором износ минимален, в то время как избыточное количество модификаторов может привести к дефектам поверхностного слоя и повреждениям при абразивном износе. Таким образом, в условиях абразивного контакта существует оптимальная концентрация модификатора, которая снижает трение без существенного увеличения пористости покрытия и, следовательно, износа. Другим важным обстоятельством является наличие

антифрикционной добавки в подповерхностных слоях покрытия, что обеспечивает стабильный коэффициент трения при абразивном износе.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение №075-15-2024-535 от 23.04.2024).

1. Torskaya E., Shkalei I., Morozov A., Stepanov F., Malyshev V., Svistkov A. Structure, friction and wear of AlZn5.5MgCu based PEO coatings modified by diamond nanoparticles and silver micropowder // Tribology International. 2025. V. 203. P. 1–15.
2. Torskaya E.V., Morozov A.V., Malyshev V.N., Shcherbakova O.O. Processing and Tribological Properties of PEO Coatings on AlZn5.5MgCu Aluminium Alloy with Incorporated Al–Cu–Fe Quasicrystals // Ceramics. 2023. V. 6, no. 2. P. 858–871.
3. Liu L., Wang L., Pan J., Wu Z., Ye Z., Wang C. Influence of ceramic coating pores on the Tribological performance of PEO–PTFE composite coatings on the Ta–12W alloy // Surface and Coatings Technology. 2022. V. 441. P. 128592.
4. Chen J., Li W., Xu J., Bai Z., Wang C., Wang S. Effect of current density and polytetrafluoroethylene on the properties of micro-arc oxide coating of pure aluminum // International Journal of Applied Ceramic Technology. 2023. V. 20, no. 5. P. 2860–2873.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧНОСТИ ЦЕПНОЙ ПЕРЕДАЧИ В ПРИВОДНОМ РОЛИКОВОМ КОНВЕЙЕРЕ ДЛЯ ПАЛЛЕТ

Хлопков В.П.¹, Фомин Н.А.¹, Носко А.Л.¹, Сафронов Е.В.¹

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия,
v.p.khlopkov@mail.ru

В работе представлено описание исследования динамичности цепной передачи в приводном роликовом конвейере для паллет с использованием специально разработанного испытательного стенда и измерительного прибора тензометрического действия с использованием радиопередачи значения усилий в звене цепи на компьютер и записи в реальном времени. На примере эксперимента с малой запасовкой цепи была продемонстрирована необходимость доработки известных теоретических методик тягового расчета цепного привода.

Введение

В приводных роликовых конвейерах, предназначенных для транспортировки паллет, часто используется цепная передача. Её популярность объясняется простотой в обслуживании и способностью создавать значительное тяговое усилие, что критически важно для перемещения тяжелых грузов [1].

Однако у этого решения есть и ряд недостатков, среди которых — быстрый износ элементов цепи, необходимость высокой точности установки звездочек, а также вибрации и шум во время эксплуатации [2].

В современных автоматизированных складских комплексах такие конвейеры обычно работают в реверсивном режиме с частыми пусками и остановками [3]. Такой режим эксплуатации приводит к появлению динамических нагрузок в цепи, которые необходимо учитывать при проектировании. Проблема заключается в том, что из-за сложной траектории движения цепи, переменного режима работы и специфики нагрузки привода, рассчитать точное значение этих динамических нагрузок теоретическими методами практически невозможно. Существующие же методики расчета учитывают динамику лишь упрощенно — как однократное ускорение массы груза и элементов привода при запуске [4]. Так в формуле (1) приложено разбиение общего сопротивления при перемещении паллеты по приводному роликовому конвейеру

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 + W_7, \quad (1)$$

где W_1 - сопротивление от трения в опорах от действия груза; W_2 - сопротивление качению груза; W_3 - сопротивление буксования; W_4 - сопротивление от силы инерции роликов; W_5 - сопротивление от силы инерции груза; W_6 - сопротивление от заклинивания груза; W_7 - сопротивление от неровности роликового полотна.

Таким образом, необходимо исследование вопроса измерения нагрузок в цепи в процессе её работы в приводном роликовом конвейере для паллет. Для этого необходимо разработать испытательный стенд для натурных динамических испытаний цепной передачи в приводных роликовых конвейерах для паллет. В качестве

измерительного прибора разработать или подобрать устройство, позволяющее определять значение усилия в звене роликовой цепи в процессе её движения по запасовке в режиме реального времени.

Описание оборудования и принципа работы

С учетом использования специального измерительного прибора разработан испытательный стенд для натурных динамических испытаний цепной передачи в приводных роликовых конвейерах для паллета, который позволяет воспроизводить реальные режимы эксплуатации. Приводные ролики стенда приводятся в движение мотор-редуктором, который может располагаться по краям, в средней части стана, а также может приводить в движение как приводную, так и холостую ветвь цепного контура цепи. Возможность выбора расположения двигателя на испытательном стенде является важным и обусловлено различными конструктивными исполнениями существующих приводных роликовых конвейеров для паллет. Груз массой до 1400 кг располагается на стандартном европоддоне 1200x800.

Для измерения нагрузки в цепи используется измерительный прибор тензометрического принципа действия (рис. 1), устанавливаемый на звено цепи. С использованием радиопередачи значения усилий в звене цепи передаются на компьютер и записываются в реальном времени. Перед каждым испытанием производится тарировка прибора и проверка его на работоспособность.

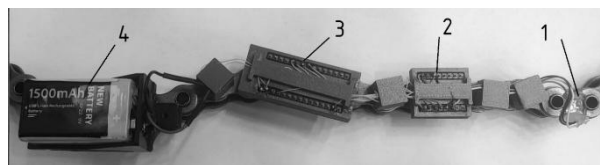


Рис. 1. Общий вид прибора для измерения нагрузок в звене цепи
1 – тензодатчик с полным мостом; 2 – АЦП; 3 – RF-передатчик. 4 – батарейка

На рис. 2 представлен общий вид испытательного стенда.

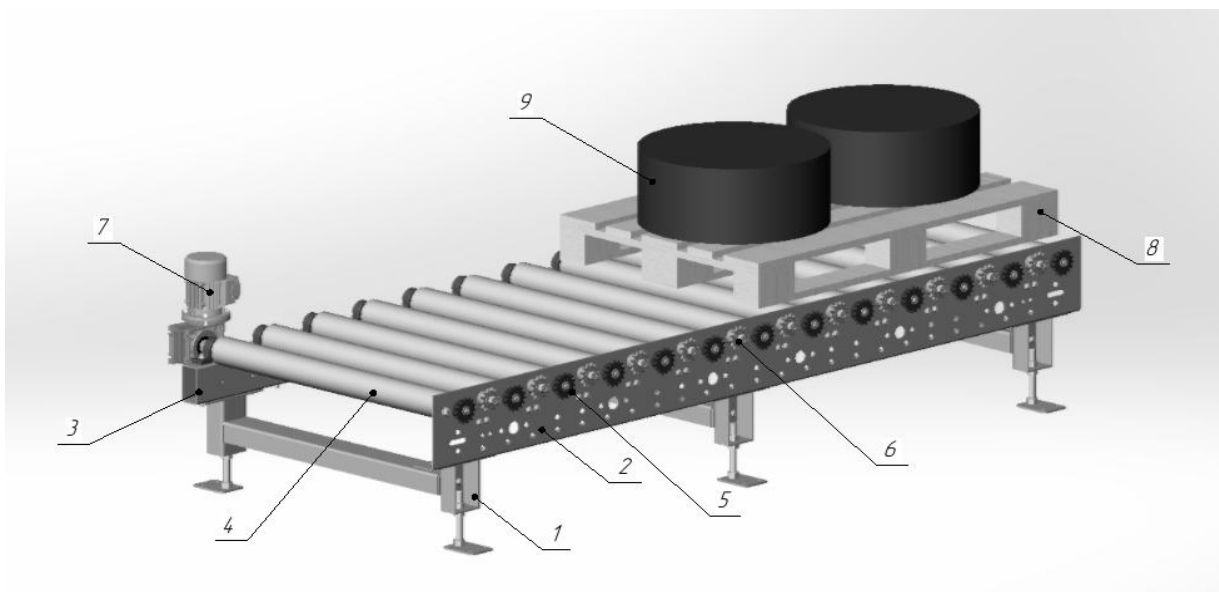


Рис. 2. Общий вид испытательного стенда (без цепи)

1 – опора; 2 – направляющий профиль передний; 3 – направляющий профиль задний; 4 – приводной ролик; 5 – приводная звездочка; 6 – обводная звездочка; 7 – мотор-редуктор; 8 – европоддон; 9 – груз

Предварительное натяжение цепи осуществляется через обводные звёздочки, размещенные по краям стенда. Холостая ветвь цепного контура располагается в нижней части переднего направляющего профиля и монтируется произвольно, с учетом отсутствия провисаний цепи и с менее частым шагом, чем на приводной части.

Испытания и результаты измерений

Испытания можно проводить с наличием или отсутствием нагрузки от веса паллеты. Конструкция стенда и измерительного прибора позволяют осуществлять измерение усилия растяжения в звене в процессе её перемещения по всей запасовке.

Результатами измерения являются графики значения усилия в звене цепи по прохождении пути

полного оборота по заданной запасовке. Данные графики можно сравнивать с графиками тягового расчета цепи, по известным методикам [4]. На рис. 3 представлена схема разбиения контура цепи на равные участки. Количество участков разбиения определяется после анализа данных на основе максимального количества полученных значений за один оборот цепи (в данном разбиении было получено 440 значений, но для удобства отображения и анализа берется значение в 5 раз меньше, таким образом увеличивая дискретность). На основе рис. 3 составляется график значений усилий в звеньях цепи на всех участках её работы (рис. 4). Такой подход можно рекомендовать при проектировании и оценке любого сложного контура запасовки цепи.

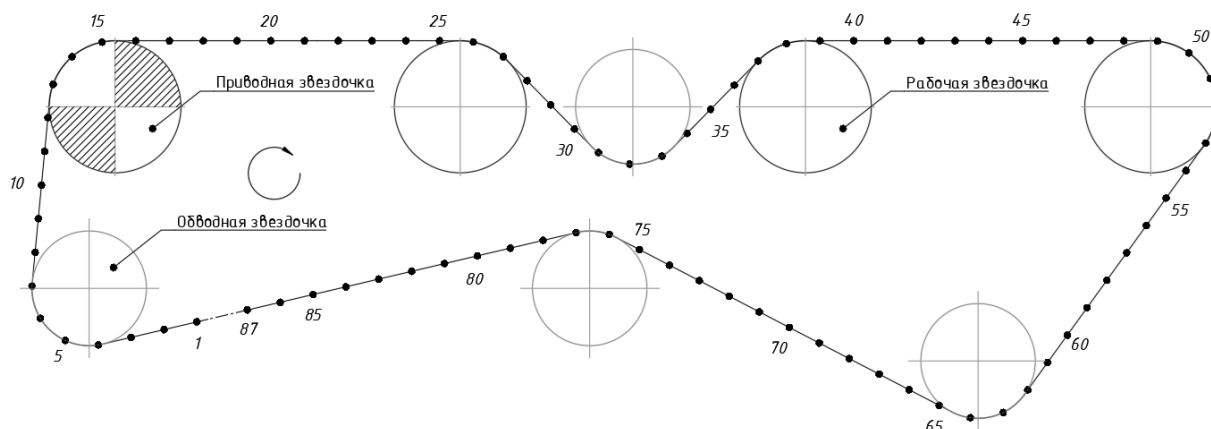


Рис. 3. Схема разбиения контура запасовки цепи на равные участки



Рис. 4. График сравнения тягового расчета с экспериментом

На графике рис. 4 приведено сравнение значений усилий в звеньях цепи, полученных экспериментальным и расчетным путем. В эксперименте не учитывалась нагрузка от паллеты с грузом, вращения роликов происходило с установленной частотой 22 об/мин, предварительное натяжение цепи составило 180 Н. Как видно из графика в момент зацепления со звездочками звено цепи испытывает значительные пиковые нагружения, что нельзя увидеть при применении тягового расчета. В своих пиковых значениях усилия в экспериментальных данных превышают значения теоретические в 2 ... 5 раз. разница в значениях варьируется от 200 до 2000 Н, средняя разность значений в участках между пиковыми нагрузками составляет 120 Н.

Вывод

1. Разработан испытательный стенд для натурных динамических испытаний цепной передачи в приводных роликовых конвейерах для паллет, позволяющий имитировать нагрузки, возникающие при работе конвейера в реальных условиях эксплуатации.
2. Для измерения нагрузки в цепи используется

измерительный прибор тензометрического принципа действия, установленный на звено цепи и передающий с использованием радиопередачи значения усилий в звене цепи на компьютер в реальном времени.

3. Получено сравнение значений усилий в звеньях цепи, полученных экспериментальным и расчетным путем. Разница в значениях усилий в звене цепи в момент зацепления со звездочками находится в диапазоне от 200 до 2000 Н, что требует уточнения методики тягового расчета цепного привода роликового конвейера для паллета.

1. Маликова, Т. Е. Складская логистика: учебник для среднего профессионального образования / Т. Е. Маликова. — 2-е изд. — Москва: Издательство Юрайт, 2025. — 115 с.
2. Детали машин: учебник для вузов / под ред. О.А. Ряховского. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. — 520 с.
3. Носко А.Л., Сафронов Е.В., Потапов В.А. Система паллетных модулей для складской интралогистики // Вестник машиностроения. — 2016. — № 8. — С. 10-12.
4. Хлопков, В. П. Экспериментальное исследование динамической нагруженности приводной роликовой однорядной цепи / В. П. Хлопков, В. И. Алексеев, Н. А. Фомин // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. — 2024. — № 28. — С. 18-25.

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ 3D-СКАНЕРОВ ПРИ КОНТРОЛЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ГЕОМЕТРИИ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ

Хоперскова Ю.С., Нефёлов И.С.

ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)»,
Москва, Россия; hopersckova.yulya@yandex.ru

Исследование посвящено оценке эффективности использования 3D-сканеров для контроля пространственной геометрии деталей. На основе проведенного сравнительного анализа оборудования ведущих производителей, востребованных на российском рынке (Shining 3D и RangeVision), выявлены ключевые технологические особенности и эффективность применения 3D-сканеров.

В современных условиях развития автомобильного производства, при контроле пространственной геометрии деталей производителям необходимо гарантировать высокую точность измерений при минимальных временных затратах. Соответствие пространственной геометрии деталей установленным требованиям влияет на долговечность, функциональность и безопасность эксплуатации машин. В условиях массового производства необходимо совершенствование методов контроля, чтобы минимизировать брак и повысить рентабельность производственного процесса.

Использование метода 3D-сканирования позволяет достичь высоких показателей геометрической точности изделий, что открывает возможности для оперативного и качественного контроля. 3D-сканеры являются метрологическим оборудованием и используются для оценки геометрических параметров деталей и агрегатов автомобилей, выявления отклонений и контроля качества изготавливаемых изделий [1].

Целью данного исследования является проведение сравнительного анализа основных типов и моделей 3D-сканеров, используемых для контроля пространственной геометрии изделий, в том числе автомобильных деталей. Будут рассмотрены основные характеристики сканирующих устройств такие как точность и скорость сканирования, требования к условиям эксплуатации, совместимость с существующими системами автоматизированного проектирования и т.д.

Современный рынок 3D-сканеров в России имеет свою специфику, которая сформировалась в течение последних лет и охарактеризовалась развитием отечественных решений, в связи с чем, так же выросла популярность сканеров, используемых для обратного инжиниринга. В данном исследовании анализа технологических особенностей и эффективности применения 3D-сканеров при контроле пространственной геометрии деталей автомобилей представляется целесообразным рассмотреть конкретные модели оборудования: RangeVision, Shining 3D, Scanform, которые являются наиболее востребованными на

современном российском рынке.

Shining 3D

Страна производитель – Китай, компания является одним из мировых лидеров в области 3D-цифровизации и 3D-печати, обладает разнообразным модельным рядом от недорогих любительских сканеров до высокоточных промышленных и медицинских систем. В России компания представлена официальным дистрибьютором, а также имеет сервисный центр в г. Москва [2]. В рамках данного исследования для анализа влияния технических характеристик на качество процесса сканирования были выбраны две модели 3D-сканеров: Shining 3D EinScan HX – универсальный настольный сканер на технологии структурированного света «рис. 1»; Shining 3D FreeScan UE7 – универсальный настольный сканер на технологии структурированного света «рис. 2».



Рис. 1. Shining 3D EinScan HX



Рис. 2. Shining 3D FreeScan UE7

Данный выбор позволяет провести сравнительный анализ оборудования, ориентированного на принципиально разные сферы применения и выявить прямую зависимость между конструктивными особенностями сканеров, их технологическими особенностями и итоговым качеством получаемых цифровых моделей. Для наглядного сравнения технологических особенностей данных 3D-сканеров их характеристики представлены в таблице «табл. 1».

Таблица 1. Сравнительный анализ сканеров Shining 3D

Характеристики	Shining 3D EinScan HX	Shining FreeScan UE7 3D
Технология сканирования	Оптическая гибридная	Оптическая лазерный подсвет
Точность сканирования	Оптическое до 0.05 мм/ Лазерное до 0.04 мм	0.02 мм
Количество камер	2	2
Зона сканирования	420x440 мм	510x520 мм
Скорость сканирования, тыс. точек/сек	Синий подсвет 1200/ Лазерный подсвет 480	650
Рабочее расстояние до объекта	470 мм	500 мм
Сканирование текстур / цвета	Да	Нет
Поворотный стол	Поддерживается	Не поддерживается
Источник света	синий светодиодный свет + 7 лазерных пересекающихся полос	14 синих лазерных линий + 1 дополнительная синяя линия
Параметры системы	Windows 10, 64-bit, I7-8700, NVIDIA GTX/RTX от GTX 1080, 32 Гб	
Поддерживаемые форматы файлов	OBJ, STL, PLY, P3, 3MF, ASC	
Программное обеспечение	3D System (Geomagic Solutions), InnovMetric Software (PolyWorks), Dassault Systemes (CATIA V5 & SolidWorks), PTC (Pro/ENGINEER), Siemens (NX & Solid Edge), Autodesk (Inventor, Alias, 3ds Max, Maya, Softimage)	
Габариты	108x110x237 мм	298x90x74.5 мм
Вес	0.703 кг	0.670 кг
Стоимость	1,1 млн. руб.	1,399 млн. руб.

Ключевыми преимуществами, обусловившими популярность в РФ стали лучшее соотношение функциональности и цены. Обе модели могут использоваться для сканирования блестящих и черных объектов без специальной подготовки, так же они отличаются высокой скоростью работы. Сканер Shining 3D FreeScan UE7 производит измерения с метрологической точностью, а также может использоваться для сканирования глубоких отверстий и предметов со сложным рельефом за счет дополнительной синей лазерной линии. Главным преимуществом модели Shining 3D FreeScan UE7 является скорость работы (в режиме быстрого сканирования до 1200000 точек в секунду), а также возможность использования без маркеров за счет гибридного света.

RangeVision

Ведущий отечественный производитель 3D-сканеров, после 2022 года пришел на замену ушедшим с рынка западным системам и пользуется заслуженной популярностью, преимуществом перед конкурентами является прямая техническая поддержка от разработчиков на русском языке. Компания специализируется на сканерах структурированного белого света, что обеспечивает высокую точность, важную при решении задач обратного инжиниринга и контроля качества пространственной геометрии деталей, имеет широкий линейный ряд от настольных сканеров до роботизированных комплексов [3]. Для сравнения технических характеристик были выбраны: RangeVision Neo – настольный

компактный 3D-сканер с широкими возможностями «рис. 3»; RangeVision Pro – первый российский 3D-сканер, который прошел сертификацию Росстандарта в качестве измерительного средства «рис. 4».



Рис. 3. RangeVision Neo



Рис. 4. RangeVision Pro

Сопоставление технологических особенностей высокоточного сканера RangeVision Pro и универсального решения RangeVision Neo для неопытных пользователей позволяет провести сравнительный анализ оборудования разного класса и выявить зависимость между их технологическими параметрами и эффективностью при контроле пространственной геометрии деталей автомобилей. Для наглядного сравнения технологических особенностей данных 3D-сканеров их характеристики представлены в таблице «табл. 2».

Таблица 1. Сравнительный анализ сканеров RangeVision

Характеристики	RangeVision Neo	RangeVision Pro
Технология сканирования	Оптическая структурированный подсвет	
Точность сканирования	0.06 мм	0.6 - 0.018 мм
Количество камер	2	2
Зона сканирования	340x240x240 мм	520x390x360 мм
Скорость сканирования, тыс. точек/сек	2 000	3 500
Рабочее расстояние до объекта	450 мм	260 - 900 мм
Сканирование текстур / цвета	Да	
Поворотный стол	Поддерживается	
Источник света	структурированная LED-подсветка	структурированная LED-подсветка + синий свет
Параметры системы	Windows 7/8/10 64bit, Intel Core i5 6500 или выше, 8 Гб	
Поддерживаемые форматы файлов	STL, OBJ, PLY	STL, OBJ, PLY, ASCII, PTX
Программное обеспечение	RangeVision ScanCenter	
Габариты	230x140x60 мм	450x150x400 мм
Вес	1 кг	7 кг
Стоимость	0,195 млн. руб.	1,69 млн. руб.

Проведенный сравнительный анализ позволяет выделить как сходства, так и различия между данными моделями, обусловленные их целевым назначением и техническими характеристиками. Оба сканера используют технологию структурированного белого света, но различаются уровнем исполнения и точности. RangeVision Neo обладает более простым интерфейсом и меньшей точностью. Модель Pro существенно дороже как профессиональное решение,

показывающее скорость сканирования в 1,7 раза выше, а также оснащенное усовершенствованной оптической системой [4].

Таким образом, выбор между моделями должен определяться конкретными задачами: Neo оптимален для образовательных целей и начального уровня использования, тогда как Pro предназначен для решения ответственных задач контроля пространственной геометрии деталей автомобилей.

Проведенный анализ технологических особенностей и эффективности применения 3D-сканеров при контроле пространственной геометрии деталей автомобилей позволяет сформулировать следующие выводы. Современные 3D-сканирующие системы демонстрируют высокую эффективность, обеспечивая оптимальное сочетание точности измерений и производительности.

Технологии структурированного света и лазерного сканирования позволяют осуществлять комплексный анализ пространственных характеристик деталей в производственных условиях. Важными параметрами при выборе оборудования являются: наличие метрологической сертификации, адаптивность к производственным условиям, совместимость с системами CAD, возможность работы с различными типами поверхностей. Перспективы развития технологии

связаны с интеграцией 3D-сканирования в производственные цепочки, созданием автоматизированных контрольно-измерительных комплексов и развитием отечественных решений.

Таким образом, рациональный выбор 3D-сканера с учетом технологических особенностей и специфики решаемых задач позволяет существенно повысить эффективность контроля пространственной геометрии автомобильных деталей при обеспечении требуемых показателей точности и производительности.

1. Крашенинникова, О. В. Применение 3D сканирования в машиностроении / О. В. Крашенинникова // 3D технологии в решении научно-практических задач : Сборник статей Всероссийской научно-практической конференции, Красноярск, 28 мая 2024 года. – Красноярск: Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М.Ф. Решетнева, 2024. – С. 27-28.
2. Официальный сайт компании Shining 3D в России [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.shining3d.ru/>.
3. Официальный сайт компании RangeVision [Электронный ресурс]. – URL: <https://rangevision.com/>.
4. Применение 3D сканера в качестве метрологического оборудования / И. А. Мещеряков, С. А. Мухин, С. А. Пучков, А. С. Токарев // Наука ТТИ НИЯУ МИФИ - 2023 : Сборник научных трудов. – Трехгорный : Трехгорный технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", 2023. – С. 78-81.

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Царьков А.В.¹, Гузев Д.М.¹, Хейло С.В.²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия; andrey.tsarkov@mail.ru

²ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», Москва, Россия

В работе рассматриваются вопросы теории формирования соединения при сварке трением с перемешиванием (СТП). Путем математического моделирования показана возможность формирования тонкого смазочного слоя из жидкого металла между рабочим инструментом и рабочим телом. Показано влияние угла наклона инструмента на характер распределения давления в зоне формирования сварного соединения. Высказана гипотеза о механизме образования «луковичной структуры», характерной для СТП.

Введение

Спустя 30 лет после своего открытия СТП перестал быть необычным видом сварки. Если первоначально он применялся исключительно для целей космической промышленности, то в настоящее время он широко используется в судо- и вагоностроении, автомобильной и аэрокосмической промышленности, создание крупногабаритных листовых заготовок и профилей. Благодаря высокому качеству соединения СТП используется даже при производстве алюминиевых корпусов iPhone. Вместе с тем, на сегодняшний день не существует общепринятой теории, описывающей механизм формирования сварного соединения при этом процессе.

Цель

Целью данной работы является обсуждение существующих проблем теории образования соединения при СТП, а также анализ возможных путей их разрешения.

Материалы и методы

Основными факторами, определяющими результат процесса сварки, являются рабочее давление и температура, которые в свою очередь определяются четырьмя главными рабочими параметрами: скоростями вращения и перемещения инструмента, углом наклона инструмента и осевым давлением. Последний параметр напрямую связан с глубиной погружения инструмента в свариваемый металл. Согласно международной квалификации, сварка трением с перемешиванием относится к виду сварки в твердом состоянии. Согласно этому определению, разогрев свариваемого металла происходит до температур ниже температуры плавления. Такой точки зрения придерживается большое количество исследователей [1, 2, 3 и др.], опирающихся в своих выводах на результаты прямых замеров температуры в зоне сварки. Однако следует отметить, что зоны, разогреваемые до наибольших температур, находятся в области взаимодействия трущихся поверхностей и по этой причине не подлежат прямому измерению и могут быть изучены только косвенно, т.е. путем математического моделирования. При таком методе исследований у ряда авторов [4, 5, 6] температуры в зоне сварки достигают температуры плавления.

Основным источником нагрева при СТП

является процесс трения. Результаты экспериментальных исследований [7] показывают, что подавляющее количество тепла (более 80%), как и осевой нагрузки, приходится на рабочую поверхность заплечика.

Для описания сухого трения при СТП применяются в основном два механизма взаимодействия металла с металлом. Первый механизм воспроизводит трение скольжения металла по металлу, второй - пластическую деформацию точек рабочей поверхности. Поверхность инструмента считается абсолютно твердым телом. Применение этих законов в чистом виде (без использования корректирующих коэффициентов) показало, что примерно до температуры 400°C превалирует закон Кулона (или Амонтона), а при более высоких температурах закон Треска. В следствие достаточно высоких давлений (более 10 МПа), характерных для СТП, температура 400°C градусов на поверхности заплечика достигается за время около 1 секунды. При более высоких температурах выделение тепла описывается с помощью закона Треска (Рис.1). При температурах близких к температуре солидуса свойства сплавов плохо определены и сложно сказать, какой закон взаимодействия поверхностей в этом случае реализуется. Результаты математического моделирования показали, что температура под заплечиком может достигать температуры солидуса алюминиевого сплава. В этом случае правомерно для описания трения использовать закон вязкого трения Ньютона.

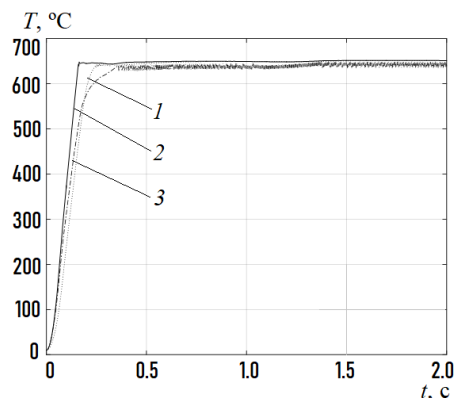


Рис.1 Пример термических циклов точек заплечика:
1 – R = 3 мм; 2 – R = 6 мм; 3 – R = 9 мм

Допущение о существовании жидкого металла между заплечиком и рабочей поверхностью позволяет объяснить экспериментально доказанный факт критичности формирования сварного соединения по отношению к углу наклона инструмента. Даже изменение угла наклона на 0,5 градуса влияет на результат процесса сварки. Наличие жидкого металла под поверхностью заплечика позволяет использовать уравнения Рейнольдса для смазочного слоя в случае моделирования давления под задней частью заплечика, то есть для той зоны, где происходит формирование сварного соединения. Для случая круглого вращающегося диска (заплечика) решение принимает вид [8, 9]:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{3}{h} \tan \alpha \frac{\partial p}{\partial x} = \left(\pi n z \cdot \sin(\alpha) - \frac{s \tan \alpha}{2} \right) \frac{12 \mu}{h^3} \quad (1)$$

Численное решение уравнения для угла наклона 0 градусов и 2 градуса показано на (Рис. 2). Даже при небольшом наклоне и малой толщине жидкой прослойки получается резкий рост давления в задней части заплечика, т.е. в той области, где происходит окончательное формирование сварного соединения.

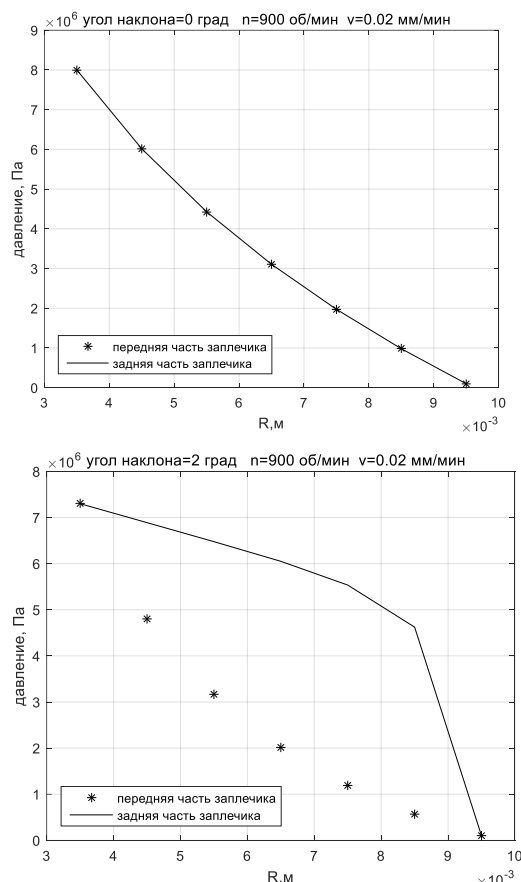


Рис.2 Влияние угла наклона инструмента на распределение давления под заплечиком

Таким образом, увеличение угла вызывает значительный рост давления под задней частью

заплечика. В свою очередь, рост давления вызывает рост градиента скорости в жидкой прослойке. Рост градиента вызывает увеличение тепловыделения и следовательно рост температуры. Рост температуры вызывает увеличение толщины жидкой прослойки. Рост толщины прослойки уменьшает тепловыделения и процесс повторяется. Получается своеобразное саморегулирование.

Другой важных вопрос, поднимаемый во многих работах, это кинетика течения металла в зоне сварного ядра (nugget zone). Как известно, очень часто в центральной зоне соединения образуется характерная для СТП «луковичная структура». Попытки ряда авторов объяснить эту структуру вихреобразным движением металла, не подтвердились результатами прямых опытов [10, 11, 12, 13 и др.]. С нашей точки зрения результаты опытов весьма логичны. Если в зоне образования соединения металл находится в «полужидком» состоянии сложно ожидать от него сложных вихревых движений. Косвенным подтверждением отсутствия вертикального движения металла является факт получения более высокого качества сварных соединений не на инструменте с цилиндрическим наконечником и спиральной резьбой, а в случае наконечников с треугольным, квадратным или пятигранным сечениями [14, 15]. Эти наконечники лучше «захватывают» металл и перемещают его в зону соединения.

Рассмотрим теперь зону сварного соединения. На рис. 3 показано примерное распределение температур по толщине металла вдоль центральной оси шва. Рядом (рис.4) изображение поперечного макрошлифа полученного СТП соединения.

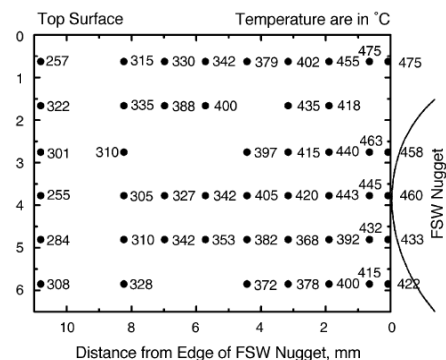


Рис. 3 Характерное распределение температур в зоне сварного шва [16]

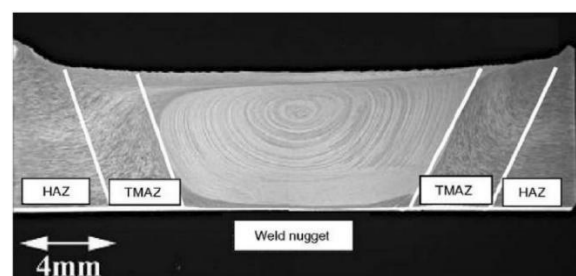


Рис. 4 Макроструктура полученного при СТП сварного соединения [17]

Как следует из представленных результатов, зону центральной линии шва можно по высоте разбить на три условных зоны. Первая, верхняя зона, имеет температуру близкую к температуре плавления алюминиевого сплава и подвержена непосредственному механическому воздействию вращающегося заплечика. В следствие высоких температур и активного механического воздействия четкие границы между слоями здесь отсутствуют.

Вторая, средняя зона, (зона формирования «луковичной структуры») это зона температур в диапазоне 350–450 градусов. При этих температурах слои металла еще способны сохранять определенную форму. Однако в этой зоне кроме высоких температур имеют место достаточно значительные нормальные напряжения выше. Под действием этих напряжений велика вероятность деформации слоев, то есть их искривление в зоне центральной линии шва. В результате небольшого искривления «пакета слоев» на поперечном шлифе образуются эллипсообразные замкнутые линии, которые мы называем «луковичной структурой». Поскольку толщина слоев равна так называемому шагу, т.е. перемещению инструмента за один оборот, то зная толщину слоев (луковичных колец) можно ориентировочно определить кривизну слоев в зоне луковичной структуры. Следуя этой гипотезе, толщина слоев «луковичной структуры» должна увеличиваться к центру структуры, так как в центре кривизна минимальна. Интересный факт отметили авторы работы [18]. Когда мы увеличиваем величину тепловложения, т.е. увеличиваем частоту вращения или уменьшаем скорость сварки, «луковичная» структура пропадает. Что хорошо согласуется с нашими выводами. Увеличивая тепловложение, мы увеличиваем температуру в центральной зоне, что приводит к снижению прочности слоев и к «размыванию» границ между ними.

Нижняя часть шва, так называемая «вихревая зона» (swirl zone), соприкасается с массивной стальной подложкой. Температура ее относительно невелика (как и размеры) и ее формирование происходит в основном под активным проковывающим воздействием вращающегося наконечника инструмента.

Выводы

Путем математического моделирования показана вероятность существования прослойки жидкого металла между рабочей поверхностью и поверхностью заплечика рабочего инструмента.

Дано объяснение критичности изменения величины угла наклона оси инструмента на качество сварного соединения при СТП.

Показан механизм заморегулирования толщины тонкого смазочного слоя жидкого металла в процессе СТП.

Предложена рабочая гипотеза формирования «луковичной структуры», характерной для соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием.

1. Masakatsu Maeda et al. Temperature Field in the Vicinity of FSW-Tool during Friction Stir Welding of Aluminum Alloys // Welding in the World, Le Soudage Dans Le Monde · March 2013, 8 p.
2. Takashi Nakamura et al. Tool Temperature and Process Modeling of Friction Stir Welding // Modern Mechanical Engineering. 2018. P.78-94.
3. A. C. F. Silva & J. De Backer & G. Bolmsjö Temperature measurements during friction stir welding // Int J Adv Manuf Technol. 2017. P.2899 – 2908.
4. Narges Dialami, Miguel Cervera and Michele Chiumenti Effect of the Tool Tilt Angle on the Heat Generation and the Material Flow in Friction Stir Welding // Open Access Metallurgy Journal · Metals 2019. 18 p.
5. M. Hossfeld, E. Roos A new approach to modelling friction stir welding using the CEL method // International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies 2013. 18 p.
6. Jauhari Tahir Khairuddin et al. Principles and Thermo Mechanical Model of Friction Stir Welding // Chapter 9. Welding Processes 2012. P.191-216.
7. Joshua L. Covington Experimental and Numerical Investigation of Tool Heating During Friction Stir Welding. // Thesis. 2005. 160 p.
8. Царьков А.В. Влияние угла наклона рабочего инструмента при сварке трением с перемешиванием на распределение давления под заплечиком // Сварка и Диагностика. 2021. №5. С.21-24.
9. Царьков А.В. Исследование эффекта угла наклона рабочего инструмента при сварке трением с перемешиванием // Сварка и Диагностика. 2022. №1. С.29-33.
10. Olivier Lorrain et al. Understanding the material flow path of friction stir welding process using unthreaded tools // Journal of Materials Processing Technology, Elsevier, 2010, 210 (4), pp.603-609.
11. K. COLLIGAN Material Flow Behavior during Friction Stir
12. Welding of Aluminum // WELDING JOURNAL, JULY 1999, p.229-237.
13. D.G. Andrade et al. Analysis of contact conditions and its influence on strain rate and temperature in friction stir welding //International Journal of Mechanical Sciences 191 (2021). 12p.
14. H.N.B. Schmidt, T.L. Dickerson, J.H. Hattel Material flow in butt friction stir welds in AA2024-T3 // Acta Materialia 54 (2006). p.1199–1209.
15. Y. N. Zhang et al. Review of tools for friction stir welding and processing // Canadian Metallurgical Quarterly. 2012. VOL 51 № 3. P.250-261.
17. K. Ramanjaneyulu et al. Structure-Property Correlation of AA2014 Friction Stir Welds: Role of Tool Pin Profile. // Journal of Materials Engineering and Performance. 2013. 17p.
18. R.S. Mishraa, Z.Y. Ma Friction stir welding and processing // Materials Science and Engineering R 50 (2005) p.1–78
19. Friction Stir Welding // Handbook. 2017. 172 p.
20. Toshiya Okada et al. STUDIES ON CHARACTERISTICS OF FRICTION STIR WELDED JOINTS IN STRUCTURAL THIN ALUMINUM ALLOYS // 6th International Symposium on Friction Stir Welding. 2006. 459-466.

ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ С РЕГУЛЯРНЫМ РЕЛЬЕФОМ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ГРАФИТОВЫМ УПЛОТНЕНИЯМ

Цуканов И.Ю., Любичева А.Н.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия; ivan.yu.tsukanov@gmail.com

В работе обсуждается применение модели упругопластического материала, построенной согласно эндохронной теории пластичности, для определения зазора в контакте с рельефной поверхностью. Показано сходство аппроксимаций экспериментальных данных и кривых по эндохронной теории. Дана постановка двумерной контактной задачи о взаимодействии волнистой жесткой поверхности с упругопластической полуплоскостью в рамках эндохронной теории.

Введение

В связи с повышением требований к надежности работы механических уплотнений, определяемой, прежде всего, их герметичностью и долговечностью, актуальна задача теоретического и экспериментального изучения контактного взаимодействия и изнашивания сопряжений с учетом параметров микрогеометрии их поверхностей и механических свойств материалов. Одним из современных уплотнительных материалов, используемых в подвижных и неподвижных сопряжениях, в особенности в сальниках, является графитовая фольга. Уплотнения из графитовой фольги (терморасширенный графит) широко применяются в промышленности благодаря высокой теплопроводности, химически стойкости и антифрикционным свойствам. Слои графитовой фольги при деформации образуют сложную структуру, обеспечивая «адаптацию» к неровностям поверхности и высокую герметичность.

Для прогнозирования уровня утечек, возможных в контакте материала, состоящего из слоев графитовой фольги в паре с шероховатым контртелом необходима модель, которая позволяет учесть особенности механического поведения материала при деформировании.

Для оценки уровня утечек необходимо оценить зависимость межконтактного зазора от приложенного к поверхностям давления. При контактном взаимодействии возникает сложное напряженное состояние, для описания которого используется кривая деформирования, полученная при испытаниях на сжатие и при индентировании.

Анализ литературы, посвященной экспериментальным исследованиям слоистых уплотнительных материалов из терморасширенного графита [1, 2] показал, что механические свойства сильно зависят от плотности, которая может существенно отличаться в зависимости от технологии изготовления. Например, при низкой плотности материал при сжатии ведет себя как изотропный, а при более высоких значениях плотности – как трансверсально-изотропный [1].

Структура слоистого материала после прессования подобна «гармошке», состоявшей из вытянутых «червячков» агломерированных

графитовых чешуек и пор различного типа. В процессе сжатия происходит как деформация самих чешуек (при небольших нагрузках) и разрушение пор, приводящее к увеличению плотности (при существенных нагрузках).

Модель деформирования материала

В процессе сжатия материал испытывает как упругие, так и неупругие деформации, заключающиеся в непрерывном процессе разрушения связей между структурными элементами и проявляющиеся в нелинейном характере диаграммы деформирования с момента начала деформирования. Наличие неупругих деформаций подтверждается наличием остаточных деформаций при индентировании шариком и существенным отличием кривой «сила-внедрение» от герцевской [3].

Эксперименты на одноосное сжатие образцов-шайб из слоев графитовой фольги позволили с достаточной степенью точности описать кривую «напряжение-деформация» в области деформаций до 10 % законом Рамберга-Осгуда при показателе степени, равном 2 [2].

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \frac{\sigma^2}{K}, \quad (1)$$

где σ и ε – истинные напряжения и деформации соответственно (при малых деформациях совпадают с условными), E_0 – константа, отвечающая за жесткость материала при упругом деформировании, K – константа, учитывающая жесткость материала при неупругом деформировании. В экспериментальных исследованиях [2] данные константы определены регрессией усредненных значений и составляют $E_0 = 39.41$ МПа, $K = 135$ МПа². Если решить уравнение (1) относительно напряжений, то можно записать

$$\sigma = \frac{K}{2E_0} \left[\sqrt{1 + \frac{4E_0^2}{K} \varepsilon} - 1 \right] \quad (2)$$

График, построенный по выражению (2), соответствует упрочняющемуся упругопластическому телу, при отсутствии характерного предельного значения начала неупругого деформирования. Принимая во внимание это наблюдение, а также сложность процессов деформирования и разрушения на уровне

микроструктуры, предложено для описания диаграммы деформирования использовать эндохронную теорию пластичности.

Эндохронная теория пластичности [4], впервые предложенная Валанисом [5], использует соотношения наследственного типа подобно теории линейной вязкоупругости и концепцию внутреннего времени, которое отражает историю деформирования материала в точке. При этом понятие поверхность текучести не вводится, предполагается, что в элементарном объеме материала всегда присутствуют упругие и неупругие (пластические) деформации.

При одноосном сжатии наиболее простая форма диаграммы деформирования, используемая в эндохронной теории пластичности, имеет вид [4]:

$$\sigma = E\varepsilon + G(1 - e^{-\beta\varepsilon}), \quad (3)$$

где E – модуль Юнга, G , β – параметры ядра эндохронной теории [4].

На рис. 1 показаны диаграммы деформирования, описываемые моделями (2) и (3), при этом для (3) использованы следующие значения констант: $E = 6.6$ МПа, $G = 3.54$ МПа, $\beta = 6.05$.

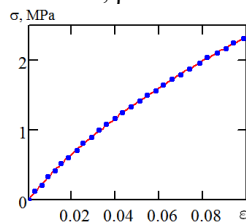


Рис. 1. Диаграмма деформирования образцов графитовой фольги при одноосном сжатии: сплошная линия - аппроксимация (3), точки - кривая (2), полученная по данным [2]

Из рис. 1 видно, что данные, полученные по выражениям (2) и (3), совпадают, что подтверждает возможность использования эндохронной теории пластичности для описания процесса деформирования образцов из терморасширенного графита.

Постановка контактной задачи

Волнистая поверхность является жесткой и внедряется в упругопластическое тело, описываемое моделью эндохронной теории пластичности. Схема задачи на одном периоде показана на рис. 2.

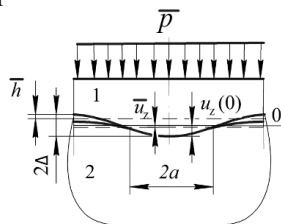


Рис. 2. Схема контактной задачи: 1 – волнистая поверхность, 2 – полуплоскость

Будем рассматривать шероховатую поверхность

контртела в первом приближении одной гармоникой ряда Фурье (волнистой поверхностью) вида:

$$f(x) = \Delta \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi x}{L} \right) \right), \quad (4)$$

где 2Δ и L – высота и период волнистости соответственно.

Основное уравнение периодической контактной задачи в упругом случае имеет вид:

$$\frac{E}{2(1-\nu)} \frac{\partial h(x)}{\partial x} = \frac{1}{2\pi} \int_{-a}^a p(\xi) \operatorname{ctg} \frac{x-\xi}{2} d\xi, \quad (5)$$

где ν – коэффициент Пуассона. По данным [2] для образцов графитовой фольги при неупругом деформировании $\nu = 0,083$. При этом, для более высоких давлений сжатия коэффициент Пуассона может быть отрицательным [1]; $p(x)$ – контактное давление, $2a$ – ширина области контакта.

Зазор внутри отрезка контакта $x \in [-a, a]$ определяется условием контакта:

$$h(x) = \delta - f(x), \quad (6)$$

где δ – величина смещения вершин выступов.

Замыкает систему уравнений (5) и (6) уравнение равновесия.

Примем, что материал при малых деформациях не обладает значительной дилатансией, и объемные деформации в процессе контакта волнистой поверхности и полуплоскости упругие [2]. Если рассматривать пропорциональное времени t внедрение неровностей на величину $\delta = Vt$, где V – скорость вдавливания, то можно показать, что суммарные напряжения на поверхности имеют вид:

$$\sigma(x, \delta) = p(x, \delta) + \int_0^{\varepsilon(x, \delta)} G e^{-\beta(\varepsilon(x, \delta) - \varepsilon'(x, \delta))} d\varepsilon'(x, \delta), \quad (7)$$

где ε' – внутренняя переменная интегрирования.

Решение задачи может быть построено методом интегральных преобразований. В качестве искомой величины необходимо определить средний межконтактный зазор:

$$\bar{h} = \Delta - \bar{u}_z, \quad (8)$$

где $\bar{u}_z$ – средние перемещения поверхности полуплоскости вне областей контакта.

Работа выполнена при поддержке РНФ № проекта 25-11-00350.

1. Solfiti E., Berto F. Mechanical properties of flexible graphite: review // Procedia structural integrity. 2020. V. 25. P. 420-429.
2. Solfiti E., Wan D., Celotto A. et al. FIB-SEM investigation and uniaxial compression of flexible graphite // Materials & Design. 2023. V. 233. 112187.
3. Morozov N.S., Demchenko D.V., Bukovsky P.O. et al. Tribological Properties of Nitrate Graphite Foils // Nanomaterials. 2024. V. 14, 1499.
4. Haupt P. Continuum Mechanics and Theory of Materials.. Springer, Berlin. 2000. 643 p.
5. Valanis K.C. A theory of viscoplasticity without a yield surface // Arch. Mech. Stosow. 1971. V. 23. P. 517-551.

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКОЙ ПРИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ

Чижиков В.И.¹, Курнасов Е.В.²

^{1,2}МИРЭА – Российский технологический университет (РТУ МИРЭА), Москва, Россия,
vichizhikov@gmail.com

Предложены алгоритмы управления двумя роботами произвольной структуры, в захватных устройствах которых размещён общий предмет для манипулирования. Рассматриваются три варианта синтеза алгоритма управления силовой компенсацией в захватных устройствах: компенсационный, по ускорению, дифференциальный с определением кинематических ошибок. Получены зависимости для реализации управления напряженно-деформированным состоянием исполнительных механизмов в точках захвата предмета манипулирования.

В робототехнике задание траекторий манипуляционных роботов в основном осуществляется в режиме обучения. В производственных условиях это сопряжено со значительными трудностями. Часто спланированный для одного робота каркас траекторий [1–3] не выполняется при реализации требуемой технологической операции. Тогда целесообразно использовать два манипуляционных робота с параллельной кинематикой, организованных определённым образом и выполняющих более сложные движения, чем предписано кинематической схемой каждого.

Специфическая компоновка [4–6] требуется для роботов, которые осуществляют манипулирование предметом со значительной гибкостью в разных направлениях или требуют фиксации в строго определённых местах, которую невозможно осуществить одним захватным устройством. Однако взаимодействие двух роботов с произвольной кинематической схемой через объект манипулирования (предмет) вызывает силовую реакцию на активных элементах захватного устройства, часто нежелательную, что может нарушить условие неразрывности захвата из-за кинематического возмущения.

В основу разработки модели взаимодействия двух роботов [7, 8], совместно выполняющих работу, положена программа управления перемещением предметом с размещёнными на нём захватными устройствами смежных роботов. При этом предмет в рамках решаемой задачи не должен испытывать деформационные нагрузки, превышающие допустимые, вызванные кинематическим возмущением вследствие рассогласования в управлении группой.

Захватное устройство каждого манипулятора жёстко связано с объектом в определённых точках, манипулирование предполагает изменение положения устройства как твёрдого тела. Для решения задачи важен выбор кинематической схемы манипуляторов с соответствующей маневренностью.

Синтез модели взаимодействия двух твердых тел, принадлежащих разным манипуляторам, заключается в решение обратной задачи кинематики для каждого манипулятора с учётом неразрывности связи между ними.

Представим взаимодействие двух роботов (рис. 1) как векторный замкнутый контур O_1ABO_2 , сформированный из замыкающих кинематическую цепь векторов O_1A и O_2B для каждого из манипуляторов в общей системе координат, Отрезок AB совпадает с осью объекта манипулирования.

Рассмотрим варианты алгоритмов управления двумя роботами, выполняющих совместное перемещение по заданной траектории предмета (отрезок AB), размещённого в захватных устройствах каждого, используя компенсационный алгоритм, управление по ускорению и компенсационный алгоритм на основании дифференциального определения кинематических ошибок. Контур O_1ABO_2 построен из результирующих векторов двух роботов и предмета манипулирования.

Первый вариант алгоритма. Связь движущего момента и момента нагрузки описывают уравнения [9]:

$$J\dot{\omega}_d = M_d - M'_n(\omega); \quad (1)$$

$$\dot{\omega}_d = \varepsilon(\omega, M);$$

$$\varepsilon = J^{-1}(M_d - M'_n(\omega)) \quad (2)$$

где J – приведённый к валу якоря момент инерции подвижных частей привода; $\dot{\omega}_d$ – угловое ускорение, развиваемое приводом; M_d – движущий момент; M'_n – момент нагрузки; ω – текущая угловая скорость; ε – нелинейная функция угловой скорости ω , которую определяет зависимостью $M'_n(\omega)$.

Сформулируем задачу управления скоростью вращения привода.

В начальный момент времени $t = 0$ угловая скорость $\omega(0) = 0$ (начальная угловая скорость).

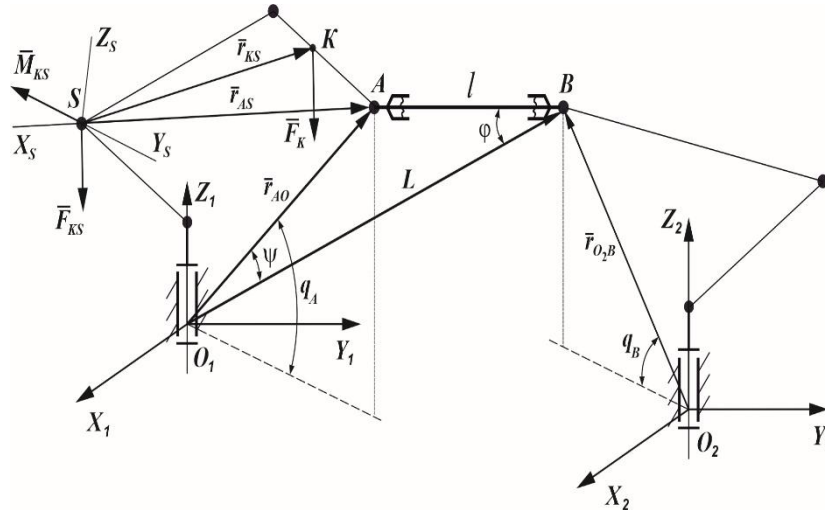


Рис. 1. Схема векторного взаимодействия двух роботов в виде замкнутого контура O_1ABO_2 (AB – объект манипулирования)

Требуется найти алгоритм вычисления управляющего напряжения $U = U(\omega)$, при котором в управляемой системе устанавливается заданное значение скорости ω^0 вращательного движения $\omega(\infty) = \omega^0 = \text{const}$. Необходимо при этом, чтобы процесс установления назначенного вращательного движения подчинялся закону

$$\omega(t) = \omega^*(t), \quad \omega^0 - \omega^*(t) = c_\omega e^{-\lambda t}, \quad \lambda = \text{const} > 0, \quad (3)$$

где ω^0 – заданная скорость; $c_\omega = \omega^0 - \omega(0)$ – постоянная величина; $\omega^*(t)$ – программное движение; λ – число, определяющее быстроту затухания отклонения программного движения от назначенного; $\delta_\omega(t) = \omega^0 - \omega(t)$ – отклонение программного движения от назначенного.

Таким образом, чтобы процесс установления

заданной скорости вращения $\omega(t) \rightarrow \omega^0$ соответствовал кинематическому закону (3), двигатель должен развивать момент, величину которого определяет формула

$$M^*(\omega) = \lambda J(\omega^0 - \omega(t)) - \dot{M}_n(\omega).$$

Если в формуле (10) принять постоянную $c_\omega = \omega^0 - \omega(0)$, то переходный процесс $\omega(t) \rightarrow \omega^0$ будет в точности соответствовать назначенному переходному процессу $\omega^*(t) \rightarrow \omega^0$, определяемому выражением (3).

Схема контура управления скоростью вращения приведена на рис. 2, где отражена только модель механической системы, соответствующая уравнению (1), электрические цепи не показаны.

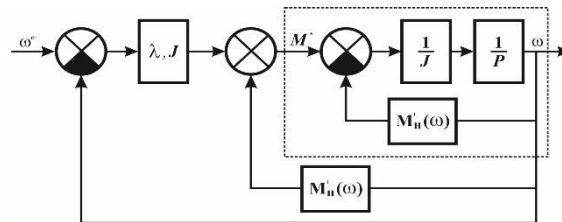


Рис. 2. Схема контура управления скоростью вращательного движения при реализации компенсационного алгоритма

Момент M должен быть таким, чтобы при любом $t > 0$ выполнялось равенство $\dot{\omega}_o(t) = \varepsilon^*(\omega)$. В общем случае при движении возникает две ситуации из соотношения работы движущих сил и сил сопротивления: если $M = M^*$, тогда $\varepsilon^*(\omega) - \dot{\omega} = 0$; если $M = M^* + \Delta M$, тогда $\varepsilon^*(\omega) - \dot{\omega} \neq 0$. В последнем необходимо регулировать ΔM так, чтобы $\Delta M \rightarrow 0$, тогда $\varepsilon^*(\omega) - \dot{\omega} \rightarrow 0$.

Отсюда следует, что устойчивость системы имеет место при любых $k > 0$, в том числе и при $k \rightarrow \infty$.

Таким образом, при проектировании системы управления имеется возможность назначения

такого коэффициента усиления k , при котором с помощью алгоритма

$$\dot{M} = k(\varepsilon^* - \dot{\omega}); \quad \varepsilon^*(\omega) = \lambda(\omega^0 - \omega).$$

Третий вариант алгоритма. Контур управления организуем так, что один робот будет ведущим и вырабатывать программное перемещение части предмета, связанное с заданной траекторией, а второй – ведомый будет так подстраивать (компенсировать) свои перемещения, чтобы в любой произвольный момент времени малые перемещения относительно другой, условно закреплённой части, не превышали допустимые, определяемые замкнутым контуром, в который

входит предмет манипулирования. Используемый при анализе точности дифференциальный метод определения первичных ошибок выделенного контура, предложенный академиком Н. Г. Бруевичем [10], основан на методе его преобразования таким образом, чтобы выявить кинематические ошибки в направлениях, которые допустимы при заданном согласованном перемещении предмета по заданной траектории. Таким образом, при заданном согласованном перемещении предмета по заданной траектории вычисляются первичные ошибки преобразованием соответствующих контуров, в которые включён предмет манипулирования. Очевидно, что величины одних и тех же первичных ошибок в разных положениях будут разными, что приводит к кинематическим возмущениям в захватном устройстве. Из отмеченного выше следует, что для устранения кинематических ошибок целесообразно использовать алгоритм компенсационного типа.

Рассмотрим построение компенсационного алгоритма, основанного на преобразовании контура O_1ABO_2 , построенного на результирующих векторах двух взаимодействующих роботов и предмета манипулирования. Идея метода заключается в устранении кинематических погрешностей [7], выявленных в упомянутом контуре, за счёт введения виртуальных плоских механизмов, в которых допускаются возможные смещения узлов контура. Нелинейность ошибок устраняется путём построения планов малых перемещений для каждого узла. Делая допущение о том, что кинематические ошибки есть произведение упругих податливостей и сил, действующих в соответствующих контуру направлениях, рассматриваемую задачу можно привести к силовой.

Управление силовыми операциями исполнительных механизмов манипуляторов роботов осуществляется с помощью контуров на основе обратной связи по развиваемым усилиям (моментам). Проектирование этих контуров выполним по следующей схеме:

– по кинематическим соотношениям определяются заданные значения усилий, которые необходимо создать инструментом (схватом) в рабочей точке;

– по уравнениям динамики формируются контуры управления исполнительных двигателей, создающих требуемые моменты в степенях подвижности.

Особенностью такого подхода является то, что управляющие сигналы формируются на основе кинематических уравнений связи между движущимися моментами и составляющими усилий (внешний контур системы), а также по модели приводов (внутренний контур системы) [11]. Два контура синтезируются независимо друг от друга. В рассматриваемой задаче имеем силу F_A^0 и F_B^0 , заданные своими проекциями на неподвижные оси

$F_{Ax}^0, F_{Ay}^0, F_{Az}^0, F_{Bx}^0, F_{By}^0, F_{Bz}^0$, образующие вектор-столбцы F_A^0 и F_B^0 .

Складывая перемещения точки A , вызванные деформацией всех кинематических пар от первой до k -й, получим:

$$\Delta r_A^0 = \sum_{s=1}^k A_{O,s} (\Gamma_s - R_A^s \Gamma_{s\theta} R_k^s) A_{O,s}^{-1} F_k^0 = E_{kA} F_k^0.$$

Таким образом, получено перемещение точки A для левого манипулятора (см. рис. 1). Аналогично, для правой схемы упругое перемещение Δr_B^0 точки B содержит матрицу податливости E_{kB} и силу, приложенную в соответствующей точке правого манипулятора. Точки A и B жёстко связаны звеном, являющимся объектом манипулирования, а в точках A и B ввиду разной податливости $\Delta r_A^0 \neq \Delta r_B^0$. Таким образом, статический анализ схемы позволил выявить кинематическую погрешность контура O_1ABO_2 .

Структурные схемы алгоритмов управления силовыми параметрами в определённых узлах конструкции представлены в работе [12].

1. Model-Based human robot collaboration system for small batch assembly with a virtual fence / H. Lee, Y. Y. Liao, S. Kim et al. // International journal of precision engineering and manufacturing-green technology. 2020. V. 7. P. 609–623. DOI:10.1007/s40684-020-00214-6.
2. A Solution to the kinematics problem for a nondestructive testing system / R. A. Faizrahmanov, R. T. Murzakaev, V. V. Artem'ev, et al. // Russian Electrical Engineering. 2018. V. 89. P. 658–663. DOI:10.3103/S1068371218110032.
3. Voronkov A. D., Diane S. A. Continuous genetic algorithm for grasping an object of a priori unknown shape by a robotic manipulator // Russian Technological Journal. 2023. V. 11. N. 1. P. 18–30. DOI:10.32362/2500-316X-2023-11-1-18-30.
4. Arora R., Bera T. K. Impedance control of three dimensional hybrid manipulator // Journal of Mechanical Science and Technology. 2020. V. 34. P. 359–367. DOI:10.1007/s12206-019-1235-8.
5. Hentout A., Maoudj A., Aouache M. A review of the literature on fuzzy-logic approaches for collision-free path planning of manipulator robots // Artificial Intelligence Review. 2023. V. 56. P. 3369–3444. DOI:10.1007/s10462-022-10257-7.
6. Hua H., Liao Z., Chen Y. A 1-Dof bidirectional graspable finger mechanism for robotic gripper // Journal of Mechanical Science and Technology. 2020. V. 34. P. 4735–4741. DOI:10.1007/s12206-020-1030-6.
7. Chizhikov V. I., Kurnasov E. V. Primary error compensation in grippers with any manipulator structure when robots collaborate in moving an object // Russian Engineering Research. 2023. V. 43. N. 11. P. 1343–1349. DOI:10.3103/S1068798X23110060.
8. Chizhikov V. I., Kurnasov E. V. Interaction of two robots in synchronized operation // Russian Engineering Research. 2020. V. 40. N. 10. P. 804–808. DOI:10.3103/S1068798X20100081.
9. Крутько П. Д. Управление исполнительными системами роботов. М.: Наука, 1991. 336 с.
10. Бруевич Н. Г., Правоторова Е. А., Сергеев В. И. Основы теории точности механизмов. М.: Наука, 1988. 236 с.
11. Голубов В. В., Манько С. В. Автоматизация стыковки автономных мобильных роботов на основе развития метода поисковых случайных деревьев со встречным ростом // Российский технологический журнал. 2024. Т. 12. № 1. С. 7–14. DOI:10.32362/2500-316X-2024-12-1-7-14.
12. Чижиков В. И., Курнасов Е. В. Построение алгоритма согласованного управления двумя роботами, выполняющих совместное манипулирование по заданной траектории // Вестник машиностроения. 2025. Т. 104. №11. С. 910–917. DOI:10.36652/0042-4633-2025-104-11-910-917.

ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛЁНКИ НА ТРЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ

Шпенёв А.Г.¹

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия; kel-a-akris@list.ru

В работе проведено исследование возникающей при трении волокнистых углеродных композитов плёнки продуктов износа и её воздействие на триботехнические параметры пары трения. Построена модель влияния поверхностной плёнки на интенсивность изнашивания и на рельеф, возникающий на поверхности композита при трении. Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными.

Введение

Углеродные композиты находят широкое применение в качестве материала для изготовления авиационных тормозных дисков. В процессе их работы происходит образование плотной плёнки продуктов износа на поверхности трения, значительно влияющей на коэффициент трения и износ дисков, а также на рельеф поверхности композита [1]. При этом толщина плёнки зависит не только от локальных параметров контактного взаимодействия (контактного давления, температуры, скорости скольжения), но и от размеров области контакта (а конкретно от масштабного фактора – отношения периметра области контакта к её площади L/S) [2]. В работе построена модель влияния толщины поверхностной плёнки на интенсивность изнашивания волокнистого композита и на образование рельефа на поверхности трения. С целью верификации модели проведены трибологические испытания углеродного композита АДФ-ОС по схеме «кольцо-кольцо» для трёх различных масштабных факторов, после чего поверхность образцов была исследована методом и оптической профилометрии. Проведено сравнение полученных значений интенсивности изнашивания и шероховатости поверхности при различных масштабном факторе образцов с результатами моделирования.

Материалы и методы испытаний

В работе исследовался композитный материал АДФ-ОС на основе углеродного волокна и углеродной матрицы производства Авиационной Корпорации «Рубин», применяющийся в авиационных тормозных системах. Были проведены испытания по схеме «кольцо-кольцо» в условиях, соответствующих работе тормоза для трёх типоразмеров образцов. Были испытаны полноразмерные тормозные диски, образцы для испытательного стенда ИМ-58 и образцы для лабораторного трибометра УМТ-2 (рис. 1). В процессе испытаний были получены значения средней интенсивности изнашивания и коэффициента трения. Рельеф рабочей поверхности образцов после испытаний был изучен с помощью оптического бесконтактного профилометра S neox (Senofar, Испания), что позволило получить трехмерные профили поверхности и измерить

средний перепад высот Δ между армирующими волокнами и матрицей.



Рис. 1. Кольцевые образцы углеродного волокнистого композита для разных испытательных машин.

Моделирование влияния плёнки на процесс трения и изнашивания

На рис. 2 показана схема взаимодействия между композитными образцами при наличии существенной плёнки продуктов износа в области контакта.

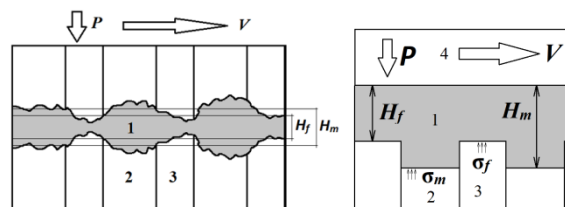


Рис. 2. Схема контакта композита: слева – полная, справа – усредненное приближение. 1 – поверхностная пленка, 2 – матрица композита, 3 – армирующие включения, 4 – контртело.

Пусть P – среднее контактное давление, V – скорость скольжения, H_f и H_m – толщина пленки в области включений и матрицы соответственно, v – доля площади включений в площади поверхности композита (равная объемной доле включений в композите). Упругими деформациями поверхности мы пренебрегаем. Тогда из условия равновесия получаем:

$$v\sigma_f + (1 - v)\sigma_m = P, \quad (1)$$

где σ_f и σ_m – локальные контактные давления в области армирующих включений и матрицы соответственно. Из соображений сохранения объема вещества пленки получаем:

$$vH_f + (1 - v)H_m = H, \quad (2)$$

где H_f и H_m – локальная толщина пленки в области армирующих включений и матрицы

соответственно; H – средняя толщина пленки, которая определяется конфигурацией контакта в целом.

Локальная интенсивность изнашивания в области включений $\bar{u}_f$ и матрицы $\bar{u}_m$ считаем линейно зависящей от локального контактного давления и от локальной толщины плёнки:

$$\bar{u}_{f,m} = K_{f,m} \sigma_{f,m} \frac{H_{max} - H_{f,m}}{H_{max}}, \quad (3)$$

где K_f и K_m – локальные коэффициенты изнашивания включения и матрицы соответственно, H_{max} – максимально возможная толщина пленки, при которой поверхности разделяются полностью. Также предполагаем, что несущая способность поверхностной плёнки обратно пропорциональна её толщине, откуда получаем:

$$H_f \sigma_f = H_m \sigma_m. \quad (4)$$

Перейдём к безразмерным величинам:

$$s_{f,m} = \frac{\sigma_{f,m}}{p}; h = \frac{H}{H_{max}}; h_{f,m} = \frac{H_{f,m}}{H_{max}}; K = \frac{K_f}{K_m}. \quad (5)$$

Тогда из формул (1–4) можно получить систему уравнений относительно неизвестных h_f , h_m , s_f , s_m :

$$\begin{cases} v h_f + (1 - v) h_m = h \\ v s_f + (1 - v) s_m = 1 \\ h_f s_f = h_m s_m \\ K s_f (1 - h_f) = s_m (1 - h_m) \end{cases} \quad (6)$$

которая может быть сведена к квадратному уравнению (оно имеет положительный дискриминант для всех исследуемых значений параметров (K , h и v) и единственное положительное решение).

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 указаны основные параметры трибологических испытаний и полученные результаты.

Таблица 1. Параметры и результаты трибологических испытаний

Величина	Тормоз	ИМ-58	UMT-2	Ед. изм.
Контактное давление, P	0.82	0.72	1.1	МПа
Температура	≈ 1200	≈ 800	≈ 1000	$^{\circ}\text{C}$
Скорость, V	260	198	14.4	км/ч
Масштабный фактор, L/S	$0.3 \cdot 10^{-4}$	$1.8 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-4}$	мкм $^{-1}$
Интенсивность изнашивания u/V	$0.6 \cdot 10^{-8}$	$1.1 \cdot 10^{-8}$	$1.8 \cdot 10^{-8}$	-
Перепад волокно/матрица Δ	1.5...2	1...1.5	0.5...1	мкм

На рис. 3 показана зависимость величины перепада высоты между волокном и матрицей ($h_m - h_f$) от масштабного фактора L/S в соответствии с решением системы (6) и обозначены полученные экспериментально величины в соответствии с табл. 1. Зависимость среднего перепада высоты между волокном и матрицей от масштабного фактора носит немонотонный характер. Однако левая ветвь графика, имеющая возрастающий характер, относится к области, соответствующей линейным размерам пятна контакта в десятки сантиметров. В построенной модели этой области соответствует толщина пленки близкая к H_{max} , а теоретическая интенсивность износа стремится к нулю. В реальных трибосопряжениях таких размеров параметры трения (прежде всего толщина поверхностной пленки) становятся сильно неравномерными по области контакта [3] и применение данной модели возможна только с учетом этого фактора. Столь высокое значение перепада высоты между волокном и матрицей для некоторых УУКМ может вызвать дополнительный износ по механизму разрушения выступающих кончиков волокон.

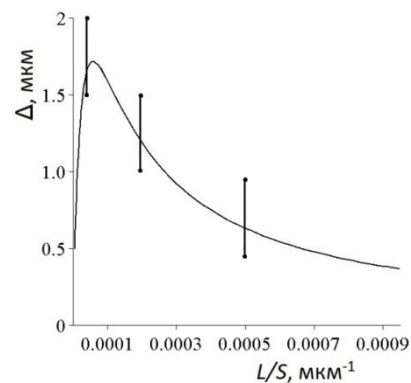


Рис. 3. Зависимость перепада высоты между волокном и матрицей от масштабного фактора с отмеченными экспериментальными результатами

Заключение

Построенная в работе модель влияния поверхностной пленки (третьего тела) на изнашивание и рельеф поверхности трения углеродных композитов позволяет управлять трением композитных материалов, добиваясь оптимального рельефа поверхности скольжения. Такая возможность появляется за счёт того, что параметр L/S можно регулировать, нанося на поверхность материала прорези, ограничивающие область контакта. Это позволяет более точно находить оптимальное соотношение между интенсивностью износа, коэффициентом трения и шероховатостью рабочей поверхности композита для конкретного узла трения.

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024). Благодарим Авиационную корпорацию

«Рубин» за предоставленные материалы.

1. Shpenev A.G., Muravyeva T.I., Shkalei I.V., Bukovskiy P.O. Influence of the Surface Film (Third Body) on the Friction and Wear Process of Carbon-Fiber Composites // J. Surf. Investig. 2022. V.16. P.397–401.
2. Fillot N., Iordanoff I., Berthier Y. Wear modeling and the third body concept // Wear. 2007. V.262. P.949–957.
3. Ostermeyer G.-P., Graf M., Influence of wear on thermoelastic instabilities in automotive brakes // Wear. 2013. V. 308. P. 113–120

ДЕФЕКТЫ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ АМГ6 И АМГ5, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

Щапов Г.В.¹, Казанцева Н.В.¹, Быченко В.А.², Прохорович В.Е.², Коэмец Ю.Н.¹, Ежов И.В.¹, Давыдов Д.И.¹

¹ Институт физики металлов УрО РАН им. М.Н. Михеева, Екатеринбург, Россия; hg-1994@mail.ru

² Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

Сварка трением с перемешиванием (СТП) является перспективной технологией для соединения алюминиевых сплавов, в частности, трудносвариваемых сплавов системы Al-Mg, таких как АМг5 (аналог 5056) и АМг6 (аналог 5083). Эти сплавы широко используются в авиационной, космической и судостроительной отраслях благодаря сочетанию прочности, коррозионной стойкости и легкости. Показано, что в сварных соединениях сплавов АМг5 и АМг6, полученных методом сварки трением с перемешиванием, могут формироваться специфические комплексные дефекты, критически влияющие на механические характеристики сварной конструкции.

Сварка трением с перемешиванием (СТП) — это технология, которая позволяет получать крупногабаритные изделия из алюминиевых, магниевых, титановых, стальных и медных сплавов без использования присадочного материала [1]. Алюминиевые сплавы системы Al-Mg, в частности сплавы АМг5 (аналог AA5056 по классификации ASTM) и АМг6 (аналог AA5083) широко используются в конструкциях, требующих сочетания высокой коррозионной стойкости, хорошей свариваемости и умеренной прочности [2]. Метод СТП для получения изделий из алюминиевых сплавов АМг5 и АМг6 используется в промышленных масштабах на Чебоксарском предприятии «Сеспель». СТП позволяет существенно минимизировать проблемы образования дефектов в этих сплавах, связанные с их высокой теплопроводностью и склонностью к образованию горячих трещин [3]. Однако, как подчеркивают Thomas et al. [4], успешное применение этого метода требует точного контроля процесса тепловложения, определяемого множеством параметров, включая скорость вращения инструмента, скорость сварки, осевое усилие и геометрию рабочего инструмента. При этом, даже незначительные отклонения в параметрах сварки могут привести к образованию различных дефектов, что обуславливает необходимость мониторинга качества полученных сварных конструкций. Цель работы – комплексный анализ качества различных соединений из сплавов АМг5 и АМг6, полученных сваркой трением с перемешиванием.

Материалы и методы

Для исследования использовали сварное соединение пластин толщиной 5 мм из алюминиевого сплава марки АМГ5 и сварное соединение деталей радиатора – корпуса и крышки, изготовленных из пластин промышленного алюминиевого сплава АМГ6. После выполнения СТП было проведено успешное испытание на герметичность сварного соединения деталей радиатора – корпуса и крышки, изготовленных из пластин промышленного алюминиевого сплава

АМГ6. Затем проведена механическая обработка – снятие технологического припуска 1 мм с поверхности крышки и выполнены повторные испытания на герметичность.

Из фрагмента сварного соединения поперек шва были вырезаны образцы для проведения металлографических исследований. Для проведения исследований структуры поверхность образцов подвергали механической шлифовке на наждачной бумаге, далее использовали суспензию коллоидного диоксида кремния на шлифовально-полировальном станке Struers Tegramin-20. Для выявления границ структурных элементов поверхность образцов после шлифовки и полировки подвергали химическому травлению. В качестве травителя использован раствор Келлера: 95 мл H₂O, 2,5 мл HNO₃, 1,5 мл HCl, 1 мл HF. Металлографический анализ проводили на оптическом микроскопе Olympus GX51, оборудованном цифровой системой вывода изображения. Микротвердость была измерена с помощью прибора Металаб-502, нагрузка 0,490 Н, время 10 с. Для анализа химического состава образцов был использован сканирующий электронный микроскоп Quanta 200, оборудованный приставкой для проведения энергодисперсионного микроанализа (EDS). Фазовый анализ был выполнен с помощью рентгеновского дифрактометра ДРОН-3, Cu K α . Механические испытания на растяжение были выполнены с помощью испытательной машины INSTRON при комнатной температуре.

Результаты и их обсуждения

Нахлесточный сварной шов сварного соединения из алюминиевого сплава АМГ6 был выполнен в штатном режиме, никаких визуальных дефектов на поверхности крышки не было выявлено. При повторных испытаниях произошла разгерметизация сварного шва (Рис.1).

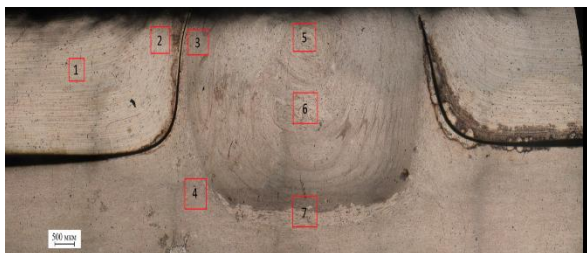


Рис 1. Комплексные дефекты в сварном соединении алюминийевого сплава АМг6, поперечное сечение, оптическая металлография, панорама

На рисунке 2 приведены оптические снимки поперечного сечения сварного шва из сплава АМг5. Комплексный дефект, проходящий через зону ядра сверху вниз, указан стрелками.

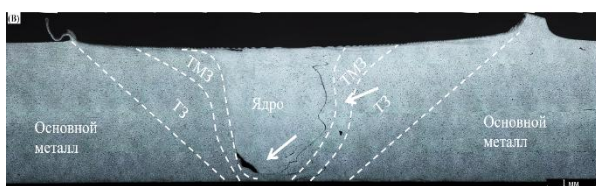


Рис 2. Комплексные дефекты в сварном соединении алюминийевого сплава АМг5, поперечное сечение, оптическая металлография, панорама

В обоих случаях (как в сварном соединении из сплава АМг6, так и в сварном соединении из сплава АМг5) в структуре сварных соединений наблюдается образование комплексных дефектов несплавления, которые, в зависимости от области, в которой они образуются, могут иметь характерные особенности различных типов дефектов. Такие комплексные дефекты образуются за счет различия термопластических условий различных областей сварного соединения, через которые проходит общий макродефект в условиях СТП. При дальнейшей нагрузке области с комплексными дефектами становятся местами разрушения сварного соединения (Рис.1,3).



Рис.3. Разрушение сварного соединения сплава АМг5: (а) вдоль комплексного дефекта; (б) по основному металлу в бездефектном сварном соединении, оптическая металлография

Заключение

Показано, что как в нахлесточных сварных соединениях сплава АМг6, так и в стыковых соединениях платин сплава АМг5, в зависимости от зоны сварного соединения, через которую он проходит, макродефект принимает вид и характерные особенности различных дефектов несплавления, типа: дефекта зацепления (hook defect), дефекта типа канавки (groove like defect) и дефекта соединения (Lazy-S), что связано с различием в температурно-деформационных условиях формирования каждой из зон сварного соединения в условиях СТП.

Наличие комплексных дефектов значительно снижает прочность сварного соединения. При нагружении зоны комплексных дефектов становятся областями разрушения.

Работа выполнена в рамках государственного задания РАН и МИНОБРНАУКИ России в Университете ИТМО и Институте физики металлов УрО РАН с привлечением инженеров ПО «Полет» ГКНПЦ им. М. В.Хруничева и Учреждения науки ИКЦ СЭКТ.

1. Thomas WM, Nicholas ED, Watts ER, Staines, DG. Friction based welding technology for aluminium. In: Gregson PJ, Harris S, editors. Material Science Forum 2002. Vol. 396–402. P. 1543–1548.
2. Zhang Y. Et al. Microstructural characteristics and mechanical properties of friction stir welded AA5056 alloy// Materials Characterization. 2011. Vol. 62(8). P. 751–759.
3. Sato Y.S. et al. Microstructural factors governing hardness in friction-stir welds of solid-solution-hardened Al alloys // Metallurgical and Materials Transactions A. 2001. Vol. 32(12). P. 3023–3031.
4. Nandan R. Et al. Recent advances in friction-stir welding – Process, weldment structure and properties// Progress in Materials Science. 2008. Vol. 53(6). P. 980–1023.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМА ЗАЗОРА В КОНТАКТЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО РЕЛЬЕФА С УПРУГИМ ТЕЛОМ

Яковенко А.А.

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия;
anastasiya.yakovenko@phystech.edu

В работе исследуется контакт периодической системы штампов с упругим полупространством и предложен способ оценки объема свободного пространства в контакте. Полученные результаты позволяют оценить влияние геометрии расположения штампов на объем межконтактного пространства, что может быть использовано для исследования задач герметичности и разработки способов ее улучшения за счет формирования на поверхности тел заданного микрорельефа.

А.Н. Леванова, Т. Ванхайма и Н.

Практически все реальные поверхности тел не являются идеально гладкими, а имеют некоторый поверхностный рельеф на различных масштабных уровнях. Поэтому при взаимодействии тел их контакт локализуется на отдельных пятнах, дискретно расположенных в пределах номинальной области контакта. Как следствие, фактическая площадь контакта в разы меньше номинальной, что необходимо учитывать при исследовании работы сопряжений. Дискретность контакта также приводит к неоднородным полям напряжения и температур в приповерхностных областях [1,2]. Наличие поверхностного микрорельефа тел также приводит к наличию некоторого зазора между соприкасающимися телами, через который могут протекать газ или жидкость, нарушая герметичность соединений [3]. Зазор между поверхностями деформируемых тел определяется не только механическими характеристиками материалов, но и геометрическими параметрами шероховатости, а значит, учет поверхностной микрогеометрии тел в исследовании их контакта позволит прогнозировать утечки уплотнительных устройств, а также улучшить их герметичность.

В данной работе исследуется контакт упругих тел с заданным поверхностным микрорельефом, а также влияние его параметров на объем межконтактного пространства. Полученные результаты могут быть использованы для разработки методов повышения герметичности соединений за счет формирования определенного микрорельефа.

Постановка задачи

Рассматривается задача контакта периодической системы одинаковых осесимметричных штампов с упругим полупространством (рис. 1). Для упрощения анализа предполагается, что все штампы имеют одинаковую высоту и сферическую форму контактирующей поверхности, которая описывается функцией $f(r) = r^2 / (2R)$, где R – радиус кривизны. Плотность расположения штампов $\bar{N}$ (среднее число штампов на единицу площади) определяется расстоянием между штампами l и схемой их расположения. Для

определенности рассмотрим две геометрии расположения штампов: треугольную и квадратичную. Система внедряется в полупространство под действием номинального давления $\bar{p}$. Предполагается, что в области контакта отсутствует трение, а каждое пятно контакта представляет собой круг радиуса a .

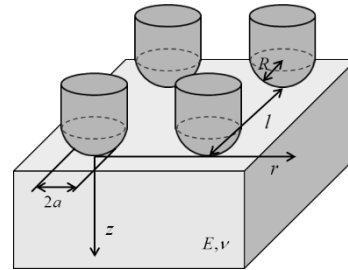


Рис. 1. Схема контакта периодической системы штампов с упругим полупространством

Метод решения

Для решения периодических контактных задач в [4] был предложен принцип локализации, согласно которому, распределение контактных давлений под произвольным фиксированным штампом можно определить, учитывая реальные распределения давлений лишь под близлежащими штампами, а действие остальных заменить номинальным давлением, равномерно распределенным вне круга определенного радиуса. Данный подход позволяет определить размеры пятен контакта и распределение контактных давлений на них.

Начнем исследование изменения межконтактного пространства при изменении приложенной к системе штампов нагрузки с анализа смещений двух точек свободной границы упругого полупространства, одна из которых расположена в центре ненагруженной области (1), а другая – между двумя близлежащими штампами (2). Если периодическая система штампов является квадратичной, то точка (1) – это центр квадрата стороной l , в вершинах которого расположены штампы (рис. 2б), а если треугольная – центр равностороннего треугольника со стороной l (рис. 2а).

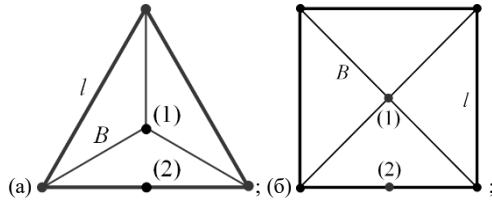


Рис. 2. Расположение точки центра ненагруженной области в треугольной (а) и квадратичной решетке (б)

Для упрощения расчетов заменим действие контактного давления под близлежащими к рассматриваемым точкам штампами на сосредоточенные силы $P = \bar{p}/\bar{N}$, приложенные на расстоянии либо B , либо $l/2$ (рис. 2). Если k – это число близлежащих штампов, то в случае точки (2) $k = 2$, а в случае точки (1) $k = 3$ для треугольной решетки и $k = 4$ для квадратичной решетки. Действие всех остальных штампов, исходя из принципа локализации, заменяется номинальным давлением, равномерно распределенным вне круговой области радиуса $A_0 = \sqrt{k/(\pi\bar{N})}$.

Используя данную замену, получим следующее вертикальное смещение d_1 точки центра ненагруженной области относительно границы полупространства, всюду нагруженного номинальным давлением [5]:

$$d_1 = -\frac{\bar{p}}{\pi E'} \left(\frac{k}{\bar{N}B} - 2\pi \sqrt{\frac{k}{\pi\bar{N}}} \right), \quad (1)$$

где $E' = E/(1-\nu^2)$ (E – модуль Юнга, ν – коэффициент Пуассона), $B = l/\sqrt{3}$ и $\bar{N} = 2/(\sqrt{3}l^2)$ для треугольной решетки, $B = l/\sqrt{2}$ и $\bar{N} = 1/l^2$ для квадратичной решетки. Для точки (2) ее относительное смещение будет определяться следующим образом:

$$d_2 = \frac{2\bar{p}}{\pi E'} \left(\frac{2}{\bar{N}l} - \sqrt{\frac{2\pi}{\bar{N}}} \right). \quad (2)$$

Как следует из результатов, разница в смещении двух точек $\Delta d = d_2 - d_1$ прямо пропорциональна шагу решетки l и приложенному номинальному давлению $\bar{p}$. Для треугольной решетки Δd равно $0.004 \bar{p}l/E'$, а для квадратичной – $0.134 \bar{p}l/E'$. Так как в обоих случаях разница в смещениях положительна, а сами смещения точек отрицательны, то точка (1) будет подниматься выше точки (2) над границей упругого полупространства, всюду нагруженного номинальным давлением. Отношение смещений двух точек (смещения точки (2) к смещению точки (1)) является постоянной величиной и в случае треугольной решетки равно примерно 0.99, а в случае квадратичной – 0.71.

Чтобы найти объем зазора в контакте, разобьем ячейку одного периода на 6 (треугольная решетка)

и 8 (квадратичная решетка) одинаковых частей. Обозначим объем этих частей как V_1 . Он зависит от высоты штампа h и равен $hl\sqrt{4B^2 - l^2}/8$. Для нахождения объема деформированного полупространства V_2 , смоделируем его пирамидой (рис. 3), основание которой представляет собой трапецию площадью S_2 . Тогда объем V_2 равен $lS_2/6$. Высота трапеции равна $\sqrt{4B^2 - l^2}/2$, а основания $d_0 - d_1$ и $d_0 - d_2$, где d_0 – глубина внедрения штампа относительно границы полупространства, всюду нагруженного номинальным давлением.

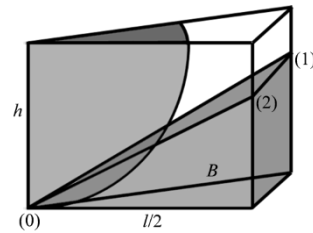


Рис. 3. Схема определения объема межконтактного пространства

Чтобы найти смещение штампа также используется метод локализации [4] и действие всех штампов, кроме исследуемого, заменяется номинальным давлением. Тогда для смещения d_0 (относительно границы полупространства, всюду нагруженного номинальным давлением) получим следующую формулу [6]:

$$d_0 = \frac{a^2}{R} - \frac{2\bar{p}}{E'} \sqrt{A^2 - a^2}, \quad (3)$$

где $A = \sqrt{1/(\pi\bar{N})}$ – радиус круговой области, вне которой действие штампов заменяется равномерно распределенным номинальным давлением. Радиус отдельного пятна контакта a находится из следующего уравнения:

$$\frac{a^3}{\arccos\left(\frac{a}{A}\right) + \frac{a}{A}\sqrt{1 - \left(\frac{a}{A}\right)^2}} = \frac{3R\bar{p}}{2\pi E'\bar{N}}. \quad (4)$$

Таким образом, объем межконтактного пространства V в ячейке одного периода (рис. 3) будет равен объему этой ячейки ($6V_1$ – для треугольной и $8V_1$ – для квадратичной) за вычетом объема деформируемого полупространства ($6V_2$ – для треугольной и $8V_2$ – для квадратичной) и частей штампа, входящих в одну ячейку периода ($0.5V_3$ – для треугольной и V_3 – для квадратичной, где V_3 – объем штампа, равный $\pi h^2 R$).

Численные результаты

Формулы (1)-(4) позволяют найти смещения точек полупространства (0), (1) и (2), а, следовательно, и объем зазора. На рис. 4

представлены зависимости безразмерного объема межконтактного пространства V в ячейке периода (незакрашенная часть фигуры на рис. 3) от величины номинального давления для разных значений шага решетки l . Из результатов следует, что объем зазора в треугольной решетке меньше, чем в квадратичной, для которой плотность расположения штампов $\bar{N}$ меньше. Увеличение шага решетки, что соответствует уменьшению плотности $\bar{N}$, также приводит к росту объема межконтактного пространства. При этом скорость снижения объема V увеличивается с уменьшением плотности расположения штампов. Поэтому при больших нагрузках уменьшение плотности, наоборот, ведет к снижению объема межконтактного пространства.

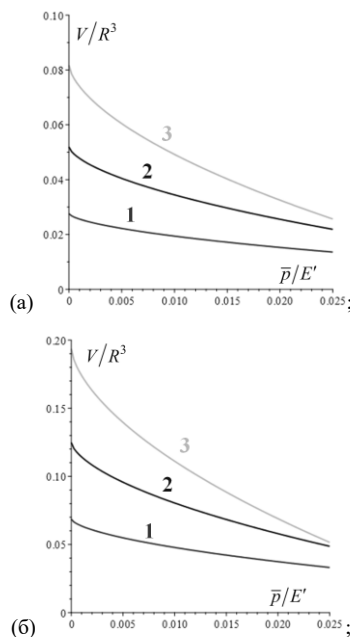


Рис. 4. Зависимость объема межконтактного зазора в ячейке периода треугольной (а) и квадратичной (б) решеток с $h = 0.1R$ и шагом $l = R$ (1), $l = 1.25R$ (2), $l = 1.5R$ (3)

Отметим, что данный способ моделирования дает заниженную оценку объема зазора V , так как не учитывает пересечение фигур (пирамиды и части параболоида на рис. 3). Если не учитывать объем штампов V_3 , то значение объема зазора будет, наоборот, выше истинного. Таким образом, представленный метод исследования объема межконтактного пространства позволяет определить границы, в которых расположено истинное значение объема V .

Выводы

В работе представлен способ исследования межконтактного пространства на примере задачи внедрения периодической системы штампов в упругое полупространство. Показано, что плотность расположения штампов влияет не только на сам объем пространства в зазоре, но и на скорость его уменьшения. Полученные результаты могут быть использованы для анализа работы уплотнительных соединений и разработке способов повышения герметичности изделий путем изменения поверхностного микрорельефа соприкасающихся частей.

Работа выполнена при поддержке РФ (грант № 25-11-00350).

1. Горячева И.Г., Мещерякова А.Р. Моделирование накопления контактно-усталостных повреждений и изнашивания в контакте неидеально гладких поверхностей // Физ. мезомех. 2022. Т. 25. № 4. С. 514—522.
2. Liu Y., Barber J. R. Transient heat conduction between rough sliding surfaces // Tribol. Lett. 2014. V. 55. P. 23—33.
3. Persson B.N.J. Fluid leakage in static rubber seals // Tribol. Lett. 2022. V. 70. № 31.
4. Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука. 2001. 478 с.
5. Yakovenko A., Goryacheva I. The discrete contact problem for a two-level system of indenters // Continuum Mech. Thermodyn. 2023. V. 35. P. 1387—1401.
6. Yakovenko A., Goryacheva I. The periodic contact problem for spherical indenters and viscoelastic half-space // Tribol. Int. 2021. V. 161. 2021

ЗАМЕНА МАТЕРИАЛА И ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ АКСИАЛЬНО-ПОРШНЕВОГО НАСОСА

Якубовский А.А.,¹ Буков О.С.,¹ Лукьянов А.И.¹

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия; anton.at444@gmail.com

В данной работе рассматривается процесс создания цифрового двойника распределителя аксиально-поршневого насоса, изготовления его прототипа по методу FDM печати и отработка технологии механической обработки деталей из УУКМ.

Цель

Цель данной работы разработка цифрового двойника распределителя гидрообъемной передачи для изготовления его прототипа из пластика полученных на 3D принтере и отработка технологии механической обработки партии деталей из УУКМ.

Введение

Для изготовления пар трения скольжения аксиально-поршневых насосов в большинстве случаев применяют пару сталь – латунь, в данной работе для создания распределителя использовали ABS пластик и УУКМ.

Различные [1] технологии аддитивного производства нашли применение для изготовления прототипов и деталей по индивидуальному заказу для аэрокосмической, автомобильной, электронной и биомедицинской промышленности, и ожидается, что использование 3D-печати в производстве будет расширяться по мере совершенствования материалов и методов.

В данной работе [2] рассматривается создание 3D-прототипов рабочих колес гидравлических машин, напечатанных из АБС-пластика, и проверка их рабочих характеристик по сравнению с обычными стальными рабочими колесами в насосном и турбинном режиме. Эксплуатационные характеристики рабочих колес, испытанных и измеренных в гидравлическом контуре для режима насоса, показали, что все варианты имеют очень близкие функциональные значения друг другу и очень идентичные тенденции функциональных кривых полного напора, потребляемой мощности и общего механического КПД в зависимости от расхода в сравнении с двумя рабочими режимами: 1450 об/мин и 2950 об/мин. Формы отдельных кривых практически идентичны, а значения высоты подачи и мощности соответствуют кратности рабочей скорости. Общие значения КПД насосов при работе со скоростью 1450 об/мин составляли около 52%, а при работе со скоростью 2950 об/мин – около 62%. Следуя этим граничным условиям, эта передовая технология может быть успешно использована при проверке вновь разрабатываемых деталей насосов и турбин.

Использование 3D-печати [3] высокого разрешения сокращает время производства, упрощает технологию изготовления и обеспечивает высокую размерную точность. В статье представлены конструкция и процесс изготовления

компонентов нового решения осевой гидротурбины, оснащенной генератором на постоянных магнитах и погружным рабочим колесом. Экспериментальные исследования на стенде в водной среде выявили практическую пригодность полимеров в качестве возможного материала для испытания прототипного оборудования, позволяющего компонентам работать на высокой скорости в течение всего периода испытаний.

Материалы и методы

В процессе разработки технологии механической обработки дисков из УУКМ было установлено, что кромки диска не обладают достаточной прочностью для применения станков с ЧПУ, имеющих гидравлические зажимы. Во время установки имеют места разрушения кромок рис 1. Для устранения этого недостатка была разработана и изготовлена специальная разрезная оправка, применение которой, позволило исключить сколы заготовок из УУКМ за счет равномерного распределения усилия зажима по образующей цилиндрической базовой поверхности.

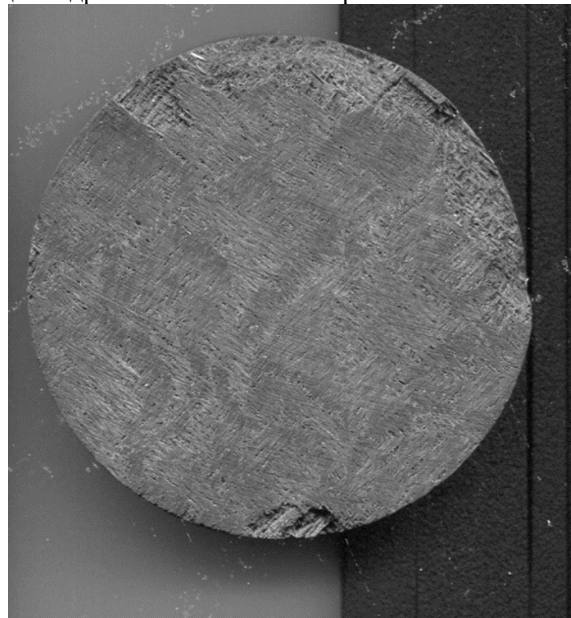


Рис. 1. Скол кромки УУКМ

Для решения проблемы был разработан цифровой двойник распределителя в программе «КОМПАС-3Д» и изготовлен прототип с применением аддитивной технологии по методу FDM печати. Для изготовления заготовки

распределителя использовали принтер Creality K1 Max, которая была напечатана из ABS пластика от компании Creality серии «hyper series», данный пластик производится с улучшенными прочностными характеристиками и предназначен для высокоскоростной печати, что сокращает время печати. Одним из недостатков [4] FDM принтера является фиксированная толщина слоя, которая приводит к геометрическим отклонениям по оси Z, данные отклонения были получены на деталях с высотой печати 0,25 мм. В источнике [5], утверждалось, что оптимальная толщина слоя для ABS пластика составляет 0,1-0,2 мм. Толщина слоя детали распределителя составляла 0,05 мм, для более точной геометрии по оси Z, что позволило добиться максимального качества детали, а также при такой высоте печати усадка пластика была минимальной. Скорость печати внешнего периметра составляла 250 мм/с, внутренних 300 мм/с, скорость заполнения 300 мм/с, сплошного заполнения 250 мм/с, заполнение детали 100%, шаблон заполнения «перекрестная решетка», время печати 2 часа 8 минут, масса детали 19 г (рис. 2).

Заполнение 100% детали было выбрано для увеличения прочности распределителя, так как [6] заготовки, напечатанные со 100% заполнением, имели высокий модуль Юнга. Также высокая скорость печати позволила достичь наименьшую степень пористости, что повысило прочность детали.

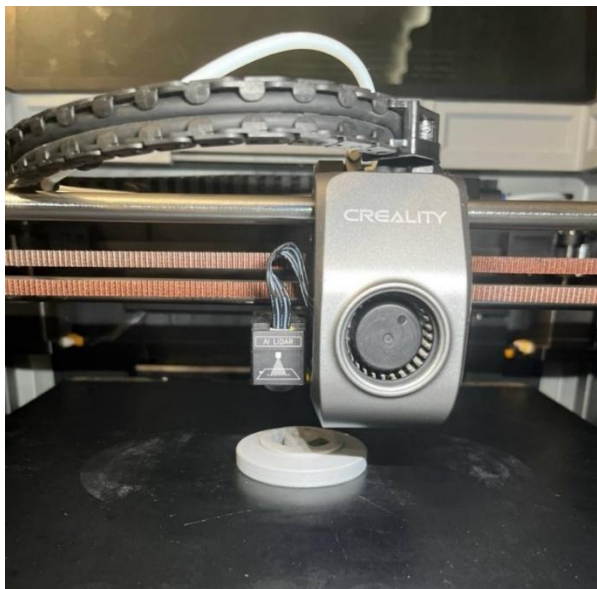


Рис. 2. Прототип распределителя, полученный методом FDM

На основе созданной цифровой модели изготовлена с помощью механической обработки на станках с ЧПУ опытная партия распределителей из

модифицированного углерод-углеродного композита (рис. 3) для проведения стендовых испытаний.



Рис. 3. Распределитель из углеродного композита

Заключение

Разработан цифровой двойник для изготовления прототипа распределителя из ABS пластика на 3D принтере и отработана технология механической обработки с применением цифрового двойника и специальной оправки для зажима заготовок при изготовлении опытной партии распределителей из УУКМ.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания, код (шифр) научной темы, присвоенной учредителем (организацией) FFGU-2024-0023

1. Shinde V.V., Wang Y., Salek M.F., Auad M.L., Beckingham L.E., Beckingham B.S. Material Design for Enhancing Properties of 3D Printed Polymer Composites for Target Applications // Technologies. 2022. Vol. 128. P.104457.
2. Sitte D., Sutanto H. Performance Analysis of Hydraulic Machines Using Impellers Made from Conventional Steel and 3D Printing Co-polymer // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. Vol. 1115. P. 012049.
3. Nedelcu D., Cojocaru V., Micu L.M., Florea D., M Hluscu M. Using of Polymers for Rapid Prototyping of an Axial Microturbine Runner and Wicked Gates // Materiale Plastice. 2019. Vol. 56(2). P. 454-459.
4. Novak-Marcincin J., Novakova-Marcincinova L. Application of FDM rapid prototyping technology in experimental gearbox development process // Tehnički vjesnik. 2012. Vol. 19(3). P. 689-694.
5. Zharylkassyn B., Perveen A., Talamona D. Effect of process parameters and materials on the dimensional accuracy of FDM parts // Materials Today: Proceedings, 2021. Vol. 44. P. 1307-1311.
6. Doshi M., Mahale A., Singh SK., Deshmukh S. Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects // Materials Today: Proceedings. 2022. Vol. 50. P. 2269-2275.

СОДЕРЖАНИЕ

№ п.п.	Авторы, название статей и организаций	Стр.
1	Рагуткин А.В. ТЕРМОДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ РАЗРУШЕНИЯ И АДАПТАЦИИ МАТЕРИАЛОВ К ДИНАМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	3
2	Аббясов А.М. ПРИМЕНЕНИЕ ГРАМИАННОГО ПОДХОДА ДЛЯ СИНТЕЗА РОБАСТНОЙ МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЫ С ПОЛИНОМИАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ <i>ИГЭУ, Иваново, Россия</i>	5
3	Албагачиев А.Ю., Ерофеев М.Н., Яковлева А.П. ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ КОМБИНИРОВАННЫХ ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ И НЕЙРОСЕТЕВОГО УПРАВЛЕНИЯ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия; МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия</i>	8
4	Албагачиев А.Ю., Карцев И.С. ВЛИЯНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ НА МОМЕНТ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	11
5	Архипов В.Е., Куксенова Л.И., Москвитин Г.В., Козлов Д.А., Пугачев М.С. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ МЕДИ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	14
6	Албагачиев А.Ю., Кушнир А.П., Макаров М.А., Хоменко С.Н., Огорельцев Р.М. АВТОМАТИЗАЦИЯ СКЛАДСКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия; РТУ МИРЭА, Москва, Россия</i>	16
7	Албагачиев А.Ю., Сергеев С.А. ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦЕПНЫХ МУФТ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	18
8	Албагачиев А.Ю., Сергеев С.А. МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦЕПНЫХ МУФТ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	21
9	Аноприенко А.К., Гантимиров Б.М. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАССИВАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ НА ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ ПАР ТРЕНИЯ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия, Научный центр нелинейной волновой механики и технологии РАН; Москва, Россия</i>	24
10	Архипов В.Е., Москвитин Г.В., Пугачев М.С. ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО МЕДНО-ЦИНКОВОГО ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ ТИПА «ЛАТУНЬ» <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	26
11	Барчукова А.С., Ветрова С.М. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ЛЕТУЧИХ ИНГИБИТОРОВ КОРРОЗИИ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	28

- 12 Бирюков В. П., Горюнов Я. А., Якубовский А.А. 30
ОЦЕНКА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИЭФИРИМИДА МОДИФИЦИРОВАННОГО РАЗЛИЧНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ
ИМАШ РАН, Москва, Россия
- 13 Бирюков В.П., Якубовский А.А., Горюнов Я.А. 33
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОЛИМЕРОВ И КОМПОЗИТОВ В УСЛОВИЯХ СУХОГО ТРЕНИЯ И В МАСЛЕ
ИМАШ РАН, Москва, Россия
- 14 Блинов Д.С., Морозов М.И., Пугачевский Д.Н. 35
ОСОБЕННОСТЬ СИЛОВОГО РАСЧЕТА ПЛАНЕТАРНЫХ РОЛИКОВИНТОВЫХ МЕХАНИЗМОВ ДЛЯ РОБОТОТЕХНИКИ
МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия; ООО «НПО ПКРВ», Москва, Россия
- 15 Бобылев А. А. 38
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОДНОСТОРОННЕГО ДИСКРЕТНОГО КОНТАКТА ДЛЯ УПРУГОЙ ПОЛУПЛОСКОСТИ С ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫМ ПОКРЫТИЕМ
МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
- 16 Броновец М.А. 42
ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПАР СКОЛЬЖЕНИЯ ОТКРЫТОГО КОСМОСА
ИПМех РАН, Москва, Россия
- 17 Буяновский И.А., Самусенко В.Д., Стрельникова С.С. 44
АКТУАЛЬНОСТЬ РАЗРАБОТКИ ТРИБОМЕТРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР
ИМАШ РАН, Москва, Россия
- 18 Буяновский И.А., Хрущов М.М., Самусенко В.Д. 47
ТРИБОЛОГИЧЕСКАЯ ШКОЛА М.М. ХРУЩОВА
ИМАШ РАН, Москва, Россия
- 19 Веденеев М.С., Шилов М.А. 51
МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ЭЛАСТОМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ СКОЛЬЖЕНИИ
ИГЭУ, Иваново, Россия; ВятГУ, Киров, Россия
- 20 Веремейчик А.И. 54
МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗГИБА СТАЛЬНОГО СТЕРЖНЯ ПОСЛЕ ТЕРМООБРАБОТКИ ДВИЖУЩИМСЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ИСТОЧНИКОМ
БрГТУ, Брест, Беларусь
- 21 Воронин Н.А. 57
ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ КАВИТАЦИИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ УСЛОВИЙ СМАЗЫВАНИЯ ВОДОЙ ЖИДКОСТНЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ
ИМАШ РАН, Москва, Россия
- 22 Гадолина И.В., Ерпалов А.В, Беневоленская Е.М. 60
ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ К ЗАДАЧЕ ОЦЕНКИ БЛОКА НАГРУЖЕНИЯ
ИМАШ РАН, Москва, Россия; ЮУрГУ, Челябинск, Россия; ВНИКТИ, Коломна, Россия
- 23 Гаврилина Л.В., Печейкина М.А., Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю. 63
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ УПЛОТНЕНИЙ В АВИАЦИОННЫХ ГТД
ИМАШ РАН, Москва, Россия; МЭИ, Москва, Россия

24	Гайдар С.М., Лапсарь О.М. ВЛИЯНИЕ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ НА КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛОВ <i>МАДИ, Москва, Россия</i>	66
25	Гайдар С.М., Лапсарь О.М. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ РАЗРАБОТАННОГО ИНГИБИТОРА В УСЛОВИЯХ СВР <i>РГУ им. А. Н. Косыгина, Москва, Россия</i>	68
26	Гайдар С.М., Барчукова А.С. СИНТЕЗ ПОВРЕХНОСТНО-АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ <i>РГУ им. А. Н. Косыгина, Москва, Россия</i>	70
27	Ганиев С. Р., Касилов В. П., Кислогубова О. Н., Бутикова О. А., Кочкина Н. Е. ВОЛНОВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ДИСПЕРСИЙ ХИТОЗАН–МОНТМОРИЛЛОНИТ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия; ИХР РАН, Иваново, Россия</i>	72
28	Гиршфельд П.А., Ромашова Е.Ю., Горохов А.Д. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ ПОЛИМЕРОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДОЛОГИИ РИСКОВ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	74
29	Гиршфельд П.А., Ромашова Е.Ю., Горохов А.Д. УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ПРОЦЕССОВ ЭКСТРУЗИИ ПОЛИМЕРОВ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ПРИЕМЛЕМЫХ РИСКОВ НЕСООТВЕТСТВИЙ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	77
30	Гиршфельд П.А., Ромашова Е.Ю., Складнова М.С. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА НА ЭТАПАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА МАШИН <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	80
31	Горохов Е.В., Рябкова В.В., Бабин Д.М., Аборкин А.В. ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ НА ХАРАКТЕР ДВИЖЕНИЯ РАЗМОЛЬНЫХ ТЕЛ В ПЛАНЕТАРНОЙ МЕЛЬНИЦЕ <i>ВлГУ, Владимир, Россия</i>	83
32	Горохов А.Д., Угурчиев А.М., Складнова М.С. КЛАССИЧЕСКИЕ РЕГРЕССИИ И АНСАМБЛИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	85
33	Горюнов Я. А., Лешаков И. А., Роцин М. Н. СТЕНД ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ АКСИАЛЬНО-ПОРШНЕВОГО НАСОСА <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	89
34	Денисов О.В., Малышев В.Н. СПОСОБ УМЕНЬШЕНИЯ БОКОВОГО ИЗНОСА ПРИ ИСПЫТАНИИ ПОКРЫТИЙ НА АБРАЗИВНОЕ ИЗНАШИВАНИЕ <i>РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия</i>	91
35	Дербуш Д.А., Шалыгин М.Г. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФАКТИЧЕСКОЙ ПЛОЩАДИ КОНТАКТНОГО СОЕДИНЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПОКОЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ ШЛИФОВАНИЕМ <i>ФКУ войсковая часть 15644, г. Знаменск, Россия; БГТУ, г. Брянск, Россия</i>	94

- | | | |
|----|--|-----|
| 36 | Дмитриев А.Н., Бурова Ю.Е., Цымбалист М.М., Витькина Г.Ю.
ТРЕХМЕРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДОМЕННОГО ПРОЦЕССА
<i>ИМЕТ УрО РАН Екатеринбург, Россия</i> | 97 |
| 37 | Думанский А.М., Алимов М.А.
АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНОСТИ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ СКОРОСТНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ И НАГРУЖЕНИИ (ЧАСТЬ 1: СКОРОСТНОЕ НАГРУЖЕНИЕ)
<i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i> | 99 |
| 38 | Думанский А.М., Алимов М.А.
АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНОСТИ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ СКОРОСТНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ И НАГРУЖЕНИИ (ЧАСТЬ 2: СКОРОСТНОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ)
<i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i> | 102 |
| 39 | Екимова Т.А., Емец К.С.
КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ СООТНОШЕНИЯ «СОСТАВ-СВОЙСТВО» ЧУГУНОВ МАРКИ ВЧ50
<i>ПетрГУ, Петрозаводск, Россия</i> | 106 |
| 40 | Ерпалов А.В., Хорошевский К.А., Гадолина И.В.
АУГМЕНТАЦИЯ ПРОЦЕССОВ НАГРУЖЕНИЯ ПО ЗАДАННОМУ КРИТЕРИЮ ПОВРЕЖДЕНИЯ
<i>ЮУрГУ, Челябинск, Россия; ИМАШ РАН, Москва, Россия</i> | 109 |
| 41 | Жиркевич В.Ю.
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ОДНОГО ИЗ СПОСОБОВ СИНТЕЗА НАНОАЛМАЗОВ КАК ОСНОВЫ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
<i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i> | 113 |
| 42 | Завойчинская Э.Б., Лавриков Г.Е.
МОДЕЛЬ УСТАЛОСТНОГО МАСШТАБНО-СТРУКТУРНОГО РАЗРУШЕНИЯ КАК СОСТАВЛЯЮЩАЯ СИНТЕТИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ ПРИ НАГРУЖЕНИЯХ С АСИММЕТРИЕЙ ЦИКЛА
<i>МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ИМАШ РАН, Москва, Россия</i> | 116 |
| 43 | Зюзин Д.И.
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕТРОЛОГИИ НА НАНОУРОВНЕ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ
<i>АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия</i> | 120 |
| 44 | Иванов Г.Ю., Кулаков О.И., Фролов А.Д.
НЕЛИНЕЙНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ИНТЕНСИВНОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ ОТ ПЛОТНОСТИ ЗАПОЛНЕНИЯ В FDM-ОБРАЗЦАХ ИЗ ПОЛИЛАКТИДА
<i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i> | 123 |
| 45 | Казаков К.Е.
ЗАДАЧА ИЗНАШИВАНИЯ ВНУТРЕННЕГО ПОКРЫТИЯ ТРУБЫ ЖЕСТКОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ВСТАВКОЙ
<i>ИПМех РАН, Москва, Россия</i> | 127 |
| 46 | Казанцева Н.В., Кузьмина А.В., Байкузина А.Р., Ежов И.В., Плотников М.С., Сахаров Н.А., Коэмец Ю.Н., Чернышихин С.В.
ПАРАМЕТРЫ 3D ПЕЧАТИ ДЛЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ
<i>ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия; НИТУ МИСИС, Москва, Россия</i> | 129 |

- | | | |
|----|---|-----|
| 47 | <p>Камцев В.А., Филипович О.В.</p> <p>ИНТЕГРАЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО МОДУЛЯ АНАЛИЗА ЗАКОНОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН В ИНФОРМАЦИОННУЮ СИСТЕМУ СБОРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА</p> <p><i>СевГУ, Севастополь, Россия</i></p> | 131 |
| 48 | <p>Капустин В.В., Памфилов Е.А.</p> <p>ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ АНТИФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ И ИСКУССТВЕННЫХ ПОЛИМЕРОВ</p> <p><i>БГТУ, Брянск, Россия</i></p> | 134 |
| 49 | <p>Карцев С.В., Гаврилов Д.А.</p> <p>ОБОСНОВАНИЕ СПОСОБОВ НАНЕСЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПЛАЗМЕННЫМ МЕТОДОМ</p> <p><i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i></p> | 136 |
| 50 | <p>Карцев С.В., Елагин С.Г., Аноприенко А.К.</p> <p>АНАЛИЗ РАБОТЫ И ПРИЧИНЫ ВЫХОДА ИЗ СТРОЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ОПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ МЕЛЬНИЦЫ МОКРОГО САМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ММС-70×23 «ГИДРОФОР»</p> <p><i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i></p> | 140 |
| 51 | <p>Киричек А.В., Макаренко К.В., Котлярова И.А., Илюшкин Д.А., Зенцова Е.А.</p> <p>ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОХЛАЖДЕНИЯ НА СТРУКТУРУ ЗАГОТОВКИ, СИНТЕЗИРОВАННУЮ ВААМ-МЕТОДОМ</p> <p><i>БГТУ, Брянск, Россия</i></p> | 143 |
| 52 | <p>Козлов Д.А.</p> <p>ВЛИЯНИЕ ИОННОЙ ИМПЛАНТАЦИИ НА СТРУКТУРУ И ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СТАЛИ ПРИ РЕВЕРСИВНОМ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ</p> <p><i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i></p> | 146 |
| 53 | <p>Конев Е.М.</p> <p>СТАТИСТИЧЕСКАЯ БИНАРНАЯ МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ</p> <p><i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i></p> | 148 |
| 54 | <p>Константинов Е.О., Шалюхин К.А., Коровушкин В.В.</p> <p>МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ НА ТРИБОМЕТРЕ ПО СХЕМЕ ВАЛ-ВТУЛКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ АНТИФРИКЦИОННОГО СТЕКЛОЭПОКСИДНОГО МАТЕРИАЛА</p> <p><i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i></p> | 151 |
| 55 | <p>Коровушкин В.В., Шалюхин К.А., Константинов Е.О.</p> <p>ПРОГРАММНО-АПАРАТНЫЕ СРЕДСТВА АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ИСПЫТАНИЙ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ</p> <p><i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i></p> | 153 |
| 56 | <p>Корнеев А.А.</p> <p>РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ УЗЛОВ ТРЕНИЯ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ</p> <p><i>РГУ им. А. Н. Косыгина, Москва, Россия</i></p> | 155 |
| 57 | <p>Корольков О.Е., Столяров В.В.</p> <p>МЕХАНИЗМ IN SITU ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ ТИТАНА</p> <p><i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i></p> | 157 |

- 58 Короткевич С.В., Буяновский И.А., Плескачевский Ю.М. 161
ПРИНЦИП НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ И ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ
РУП «Гомельэнерго», г. Гомель, РБ; ИМАШ РАН, Москва, Россия; БелГУТ, г. Гомель, РБ
- 59 Кравченко И.Н., Жачкин С.Ю., Трифонов Г.И., Котов А.П. 164
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОКРЫТИЙ В УСЛОВИЯХ КАЧЕНИЯ
ИМАШ РАН, Москва, Россия; ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, Россия
- 60 Кравченко И.Н., Феськов С.А., Артемьева А.Д., Аноприенко А.К., Куцова С.С. 167
ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В АГРОИНЖЕНЕРИИ: СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ
ИМАШ РАН, Москва, Россия; Брянский ГАУ, Брянск, Россия
- 61 Краско А.С., Кружкова М.С., Пупукин С.А. 170
ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПОСРЕДСТВОМ ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНОГО СОСТАВА ОБОРУДОВАНИЯ
РТУ МИРЭА, Москва, Россия; МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
- 62 Кувшинников В.С., Ковшов Е.Е., Сударев А.В., Корчагин В.Д. 173
ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ПРИ СИМУЛЯЦИИ ОПЕРАЦИЙ КОНТРОЛЯ В ПРОМЫШЛЕННОЙ РАДИОГРАФИИ
АО «НИКИМТ-АТОМСТРОЙ», Москва, Россия
- 63 Куксенова Л.И., Савенко В.И., Козлов Д.А. 177
ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛА ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТОДАМИ ТРИБОТЕХНОЛОГИЙ
ИМАШ РАН, Москва, Россия; ИФХЭ РАН, Москва, Россия
- 64 Кулаков О.И., Фролов А.Д., Иванов Г.Ю. 180
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ СОЖ НА СИЛУ ТРЕНИЯ ПРИ ТОЧЕНИИ СТАЛИ 45
ИМАШ РАН, Москва, Россия; РТУ МИРЭА, Москва, Россия
- 65 Кулаков О.И., Фролов А.Д., Иванов Г.Ю. 182
О ВЫБОРЕ РЕЖИМА ИНЕРЦИОННОЙ СВАРКИ СТАЛИ 45
ИМАШ РАН, Москва, Россия
- 66 Кушнир А.П., Макаров М.А., Хоменко С.Н. 184
МЕТОД ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОСАДОЧНЫХ ПОЗИЦИЙ И ОЦЕНКИ ЗАПОЛНЕННОСТИ ЯЧЕЕК
ИМАШ РАН, Москва, Россия; РТУ МИРЭА, Москва, Россия
- 67 Лагута В.С. 187
ФОРМИРОВАНИЕ НАЧАЛЬНОГО СОСТАВА ОБОРУДОВАНИЯ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ ПРОИЗВОДСТВ
МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия
- 68 Лазарев П.А., Разносчиков А.С., Бусурина М.Л., Боярченко О.Д., Ковалев И.Д., Сычев А.Е. 189
ПРИМЕНЕНИЕ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕНИЯ ДЛЯ КОНСОЛИДАЦИИ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНОГО СПЛАВА Ti20Al3Si9, ПОЛУЧЕННОГО МЕТОДОМ СВС
ИСМАН РАН, Черноголовка, Россия; ВлГУ, Владимир, Россия
- 69 Лапсарь О.М., Ветрова С.М. 191
ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ

СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ

МАДИ, Москва, Россия; РГАУ-МСХА, Москва, Россия

- | | | |
|----|---|-----|
| 70 | <p>Лебединский С.Г.
 АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ОСТАНОВКИ УСТАЛОСТНОЙ ТРЕЩИНЫ В СТАЛИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ И ЭКСПЛУАТАЦИОННОМ НАГРУЖЕНИИ
 ИМАШ РАН, Москва, Россия</p> | 193 |
| 71 | <p>Лим А.А., Кудрявцев И.В., Кутин А.А.
 ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ВВОДА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ ОБОРУДОВАНИЯ ЗА СЧЕТ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ
 РТУ МИРЭА, Москва, Россия</p> | 196 |
| 72 | <p>Литвинов А.П., Ашкинази Е.Е., Фёдоров С.В.
 РОСТ АЛМАЗНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ВЫСОКОАСПЕКТНЫХ ПОДЛОЖКАХ С ВРАЩЕНИЕМ В МИКРОВОЛНОВОМ РЕАКТОРЕ
 МГТУ «Станкин», Москва, Россия; ИОФ РАН, Москва, Россия</p> | 198 |
| 73 | <p>Лукин Д.Д., Шилов М.А.
 ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОЦЕНКИ ФРИКЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ
 ИГЭУ, Иваново, Россия; ВятГУ, Киров, Россия</p> | 200 |
| 74 | <p>Лямина Е.А.
 РАСШИРЕНИЕ СФЕРИЧЕСКОЙ ПОРЫ В БЕСКОНЕЧНОЙ СРЕДЕ С УЧЕТОМ ЕЕ РАЗРЫХЛЕНИЯ
 ИПМех РАН, Москва, Россия</p> | 203 |
| 75 | <p>Макаренко К.В., Котлярова И.А., Илюшкин Д.А., Зенцова Е.А.
 К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОТВЕРДОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ МЕТОДОМ СКРЕТЧ-ТЕСТИРОВАНИЯ
 БГТУ, Брянск, Россия</p> | 205 |
| 76 | <p>Масько С. В., Золотов А. В.
 ВЛИЯНИЕ ЗАГУСТИТЕЛЕЙ НА ПРОТИВОИЗНОСНЫЕ СВОЙСТВА ПО ГОСТ 9490–75 ДЛЯ БЕЗЗОЛЬНЫХ ДИТИОФОСФАТОВ В МАСЛЕ И-20А
 ИМАШ РАН, Москва, Россия; РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия</p> | 208 |
| 77 | <p>Матвеев К.В., Канашов С.С.
 ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ МИКРОСФЕР ИЗ ПОЛИАМИДА 12 ДЛЯ 3D ПЕЧАТИ В АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ
 ЮУрГУ, Челябинск, Россия</p> | 211 |
| 78 | <p>Мельник М.А.
 ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРОТЕКАНИЯ ПРИ ТРЕНИИ ЯВЛЕНИЙ С ПРЕВРАЩЕНИЕМ ВЕЩЕСТВА
 РУТ (МИИТ), Москва, Россия</p> | 213 |
| 79 | <p>Метель А.С., Волосова М.А., Мельник Ю.А., Мустафаев Э.С., Григорьев С.Н.
 СНИЖЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ И ПОВЫШЕНИЕ АБРАЗИВНОЙ СТОЙКОСТИ ПОЛЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ПУЧКОМ БЫСТРЫХ АТОМОВ АРГОНА И ОСАЖДЕНИЕМ ИЗНОСОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ
 МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия</p> | 216 |
| 80 | <p>Мисоченко А.А.
 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ТОКА НА ДЕФОРМИРУЕМОСТЬ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОГО ТИТАНА В ПРОЦЕССЕ ПРОКАТКИ
 ИМАШ РАН, Москва, Россия</p> | 220 |

- | | | |
|----|--|-----|
| 81 | <p>Михеев А. В., Тананов М. А.
 ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ИСПЫТАНИИ ТВЁРДЫХ СМАЗОК
 ИМАШ РАН, Москва, Россия</p> | 223 |
| 82 | <p>Мухарлямов Р.Г., Борисов А.В., Каспирович И.Е., Маслова К.С.
 ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ И ГИПЕРКОМПЛЕКСНЫХ ЧИСЕЛ К СОСТАВЛЕНИЮ СИСТЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ ДВИЖЕНИЯ АНТРОПОИДОВ СО ЗВЕНЬЯМИ ПЕРЕМЕННОЙ ДЛИНЫ НА ПЛОСКОСТИ И В ПРОСТРАНСТВЕ
 ИФИТ РУДН имени Патриса Лумумбы, Москва, Россия</p> | 227 |
| 83 | <p>Навроцкий Р.А., Москвитин Г.В.
 ОЦЕНКА РЕСУРСА ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС ПО КРИТЕРИЮ ПРЕДЕЛЬНОГО МЕХАНИЧЕСКОГО ИЗНОСА
 ИМАШ РАН, Москва, Россия</p> | 230 |
| 84 | <p>Назаров В.В.
 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОРОГА ПОЛЗУЧЕСТИ И ПРЕДЕЛА КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПРОЧНОСТИ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ
 МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия</p> | 232 |
| 85 | <p>Назаров В.В.
 СРАВНЕНИЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ БЕЗ РАЗДЕЛЕНИЯ НА ТИП ПЛОСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ
 МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия</p> | 234 |
| 86 | <p>Нахатакян Ф.Г., Нахатакян Д.Ф.
 КОНТАКТНАЯ ДЕФОРМАЦИЯ ЗУБЬЕВ В ЗОНЕ НАЧАЛЬНОГО КАСАНИЯ
 ИМАШ РАН, Москва, Россия</p> | 236 |
| 87 | <p>Нахатакян Ф.Г., Нахатакян Д.Ф., Зенкина Я.П., Зуськова В.Н.
 ВЛИЯНИЕ РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА В РОЛИКОВОМ ПОДШИПНИКЕ НА МАКСИМАЛЬНУЮ НАГРУЗКУ НА РОЛИК
 ИМАШ РАН, Москва, Россия; МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия; МАИ, Москва, Россия</p> | 239 |
| 88 | <p>Нахатакян Ф.Г., Пузакина А.К., Нахатакян Д.Ф., Зенкина Я.П.
 ПОВЫШЕНИЕ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ РОЛИКОВОГО ПОДШИПНИКА БОМБИНИРОВАНИЕМ ЕГО РОЛИКОВ
 ИМАШ РАН, Москва, Россия; МГТУ им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия</p> | 242 |
| 89 | <p>Нахатакян Ф.Г., Пузакина А.К., Нахатакян Д.Ф., Зуськова В.Н.
 СНИЖЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ РОЛИКОВОГО ПОДШИПНИКА ИЗ-ЗА РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА В НЕМ
 ИМАШ РАН, Москва, Россия; МАИ, Москва, Россия</p> | 245 |
| 90 | <p>Нефёдкин Д.Ю., Севальнёв Г.С.
 ПРИМЕНЕНИЕ МАРТЕНСИТНО-СТАРЕЮЩЕЙ СТАЛИ СИСТЕМЫ FE-NI-CO-MO-Ti ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ВОЛНОВЫХ ГИРОСКОПОВ
 НИИ "КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ" – ВИАМ, Москва, Россия</p> | 248 |
| 91 | <p>Офицеров О.О.
 ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОДУКЦИИ НА ЭТАПАХ ЕЁ ВНЕДРЕНИЯ В ЭКСПЛУАТАЦИЮ
 ИМАШ РАН, Москва, Россия</p> | 251 |
| 92 | <p>Памфилов Е.А., Пилюшина Г.А., Кузьмин П.В.
 ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ШТАМПОВ ДЛЯ ХОЛОДНОЙ ЛИСТОВОЙ ШТАМПОВКИ</p> | 253 |

БГТУ, Брянск, Россия

- | | | |
|-----|--|-----|
| 93 | Панин С.С., Брызгалов Е.А., Яковенко Н.И., Довбненко М.С.
ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛНОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА ГИДРАТАЦИИ ПОЛИСАХАРИДОВ
<i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i> | 256 |
| 94 | Панин С.С., Довбненко М.С., Яковенко Н.И., Брызгалов Е.А.
АВТОМАТИЧЕСКИЙ ПОИСК ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕЗОНАНСНОГО РЕЖИМА УСТАНОВОК ВОЛНОВОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ С ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМ ПРИВОДОМ
<i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i> | 258 |
| 95 | Панов А.Н., Махутов Н.А., Ромашова Е.Ю., Ерофеев М.Н., Гиршфельд П.А.
МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В МАШИНОВЕДЕНИИ. К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ
<i>ЮРС-РУСЬ, Санкт-Петербург, Россия; ИМАШ РАН, Москва, Россия</i> | 260 |
| 96 | Панов А.Н., Махутов Н.А., Ромашова Е.Ю., Ерофеев М.Н., Гиршфельд П.А.
МЕТОДОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ В МАШИНОВЕДЕНИИ. ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ ДЛЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ
<i>ЮРС-РУСЬ, Санкт-Петербург, Россия; ИМАШ РАН, Москва, Россия</i> | 263 |
| 97 | Пастухов А.Г., Тимашов Е.П., Вольвак С.Ф., Бахарев Д.Н., Волков М. И., Вергун В.И.
ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ УЗЛОВ ПОСЕВНЫХ МАШИН НА ОСНОВЕ МЕТОДА НАЗНАЧЕНИЯ ДИФФЕРЕНЦИРОВАННЫХ РЕМОНТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ
<i>Белгородский ГАУ, Белгород, Россия; ЛГУ им. В. Даля, Луганск, Россия</i> | 266 |
| 98 | Петрова И.М., Буяновский И.А., Самусенко В.Д.
К ПОВРЕЖДЕНИЮ КОНТАКТИРУЮЩИХ ДЕТАЛЕЙ СОВРЕМЕННЫХ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ ВСЛЕДСТВИЕ КОНТАКТНОГО ИЗНАШИВАНИЯ И МАЛО/МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ
<i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i> | 270 |
| 99 | Печейкина М.А., Раков Д.Л., Сухоруков Р.Ю.
УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ
<i>МЭИ, Москва, Россия; ИМАШ РАН, Москва, Россия</i> | 272 |
| 100 | Пикина А.М., Лапсарь О.М.
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФТОРСОДЕРЖАЩИХ ПАВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В КАЧЕСТВЕ ПРИСАДОК В КОНСИСТЕНТНЫЕ СМАЗКИ
<i>МАДИ, Москва, Россия</i> | 275 |
| 101 | Пикина А.М., Ветрова С.М.
ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ УЗЛОВ ТРЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАВ
<i>МАДИ, Москва, Россия</i> | 277 |
| 102 | Пилюшина Г.А., Памфилов Е.А.
ГЕРМЕТИЗИРУЮЩИЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ОТ ФРЕТТИНГ-КОРРОЗИИ
<i>БГТУ, Брянск, Россия</i> | 279 |
| 103 | Поляков С.А., Куксенова Л.И., Кулешова Е.М.
АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ ОСТАТОЧНОЙ ПЛЕНКИ НА ПОВЕРХНОСТЯХ СОПРЯЖЕНИЙ СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ
<i>ИМАШ РАН, Москва, Россия; МГТУ имени Н.Э. Баумана, Москва, Россия</i> | 282 |

104	Раков Д.Л. ЧАСТИЧНАЯ КЛАСТЕРИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ ПРИ СОЗДАНИИ НОВЫХ МАШИН <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	284
105	Раша Аларус, Зорин В.А. АНАЛИЗ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС РЕДУКТОРОВ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ <i>МАДИ, Москва, Россия</i>	287
106	Ромашова Е.Ю. К ВОПРОСУ О РИСКАХ ЗАМЕНЫ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В ТЕХНИЧЕСКИХ НОРМАТИВНЫХ АКТАХ ПРИ ВЕРИФИКАЦИИ СООТВЕТСТВИЯ ТРЕБОВАНИЯМ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	290
107	Самусенко В.Д., Яковлева В.А., Татур И.Р., Буяновский И.А. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВРЕМЕНИ ОТРАБОТКИ ТУРБИННОГО МАСЛА НА ЕГО ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧЕТЫРЕХШАРИКОВОЙ МАШИНЫ ТРЕНИЯ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия; РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия</i>	292
108	Сафонова Н.К., Щербов Р.М. ОСОБЕННОСТИ НАСТРОЙКИ И РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ШЕСТИЗВЕННОГО МАНИПУЛЯТОРА RUKA В ЗАДАЧАХ, ТРЕБУЮЩИХ ВЫСОКОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ <i>НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия</i>	294
109	Северов П.Б. ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ МИГРАЦИЯ ОБЛАСТИ МАКСИМАЛЬНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ УГЛЕПЛАСТИКА В ПРОЦЕССЕ МЕХАНИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	297
110	Сидорова Д.М. СТРУКТУРНЫЙ ПОДХОД К АНАЛИЗУ ОТКАЗОВ ТОРЦОВЫХ ЧЕРНОВЫХ ФРЕЗ <i>РТУ МИРЭА, Москва, Россия</i>	301
111	Смирнов Н.И., Волков М.В. РАЗРАБОТКА МЕТОДОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ ТРЕНИЯ ПРИВОДА ОРИЕНТАЦИИ В ВАКУУМЕ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия; ООО «Бюро 1440»</i>	304
112	Смирнов Н.И. ТРИБОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫХ ЛОПАСТНЫХ НАСОСОВ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	306
113	Сороковнин М.Е. МЕТОД ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ МЕХАТРОННЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ <i>ИГЭУ, Иваново, Россия</i>	309
114	Стащенко В.И., Скворцов О.Б. МОНИТОРИНГ ПРОЦЕССОВ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ КОНТАКТНОЙ ОБЛАСТИ <i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i>	312
115	Столяров В.В. ДЕФОРМАЦИОННОЕ ПОВЕДЕНИЕ ПРИ СЖАТИИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ СЛАБОЛЕГИРОВАННОГО АЛЮМИНИЯ	314

ИМАШ РАН, Москва, Россия

- | | | |
|-----|---|-----|
| 116 | Столяров В.В.
СТРУКТУРНОЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ И ДИНАМИЧЕСКОЕ НАГРУЖЕНИЕ БРОНЗЫ
<i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i> | 317 |
| 117 | Талалай М.В.
МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ КОМПЛЕКСОВ
<i>Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия</i> | 319 |
| 118 | Тимашов Е.П., Пастухов А.Г., Вергун В.И.
РАЗРАБОТКА ЦИФРОВЫХ ДВОЙНИКОВ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ ДЛЯ ИХ АВТОМАТИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ
<i>Белгородский ГАУ имени В. Я. Горина, Белгород, Россия</i> | 321 |
| 119 | Тимашов Е.П., Пастухов А.Г., Вергун В.И.
РАЗРАБОТКА ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ
<i>Белгородский ГАУ имени В. Я. Горина, Белгород, Россия</i> | 324 |
| 120 | Угурчиев А.М., Горохов А.Д.
АГЕНТНАЯ RAG-СИСТЕМА С ОБРАБОТКОЙ ДОКУМЕНТОВ ПО УСТРОЙСТВУ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ
<i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i> | 327 |
| 121 | Угурчиев У.Х., Новикова Н.Н.
ИНЖЕНЕРНЫЙ РАСЧЕТ СРЕДНЕЙ КОНТАКТНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ ПРОКАТКЕ ТОНКОЙ СТАЛЬНОЙ ПОЛОСЫ
<i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i> | 329 |
| 122 | Фомина Е.И., Думанский А.М., Худорожко М.В.
ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОДНОНАПРАВЛЕННОГО УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ СКОРОСТНОМ НАГРУЖЕНИИ И ДЕФОРМИРОВАНИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЛИНЕЙНОГО УРАВНЕНИЯ НАСЛЕДСТВЕННОГО ТИПА
<i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i> | 333 |
| 123 | Хади А.А., Буковский П.О.
ВЛИЯНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНОГО ПОЛИМЕРНОГО МОДИФИКАТОРА НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МДО ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИЕВОМ СПЛАВЕ Д16
<i>НИУ МГСУ, Москва, Россия; ИПМех РАН, Москва, Россия</i> | 335 |
| 124 | Хлопков В.П., Фомин Н.А., Носко А.Л., Сафронов Е.В.
ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧНОСТИ ЦЕПНОЙ ПЕРЕДАЧИ В ПРИВОДНОМ РОЛИКОВОМ КОНВЕЙЕРЕ ДЛЯ ПАЛЛЕТ
<i>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия</i> | 338 |
| 125 | Хоперскова Ю.С., Нефёлов И.С.
АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСОБЕННОСТЕЙ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ 3D-СКАНЕРОВ ПРИ КОНТРОЛЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ГЕОМЕТРИИ ДЕТАЛЕЙ АВТОМОБИЛЕЙ
<i>МАДИ, Москва, Россия</i> | 341 |
| 126 | Царьков А.В., Гузев Д.М., Хейло С.В.
ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ
<i>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия; РГУ им. А.Н. Косыгина, Москва, Россия</i> | 344 |

- | | | |
|-----|---|-----|
| 127 | <p>Цуканов И.Ю., Любичева А.Н.</p> <p>ОСОБЕННОСТИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ С РЕГУЛЯРНЫМ РЕЛЬЕФОМ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ГРАФИТОВЫМ УПЛОТНЕНИЯМ</p> <p><i>ИПМех РАН, Москва, Россия</i></p> | 347 |
| 128 | <p>Чижигов В.И., Курнасов Е.В.</p> <p>РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТАМИ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ КИНЕМАТИКОЙ ПРИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЕ</p> <p><i>РТУ МИРЭА, Москва, Россия</i></p> | 349 |
| 129 | <p>Шпенёв А.Г.</p> <p>ТЕОРЕТИКО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛЁНКИ НА ТРЕНИЕ УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИТОВ</p> <p><i>ИПМех РАН, Москва, Россия</i></p> | 352 |
| 130 | <p>Щапов Г.В., Казанцева Н.В., Быченко В.А., Прохорович В.Е., Коэмец Ю.Н., Ежов И.В., Давыдов Д.И.</p> <p>ДЕФЕКТЫ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ АМГ6 И АМГ5, ПОЛУЧЕННЫХ СВАРКОЙ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ</p> <p><i>ИФМ УрО РАН, Екатеринбург, Россия; Университет ИТМО Санкт-Петербург, Россия</i></p> | 355 |
| 131 | <p>Яковенко А.А.</p> <p>ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕМА ЗАЗОРА В КОНТАКТЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО РЕЛЬЕФА С УПРУГИМ ТЕЛОМ</p> <p><i>ИПМех РАН, Москва, Россия</i></p> | 357 |
| 132 | <p>Якубовский А.А., Буков О.С., Лукьянов А.И.</p> <p>ЗАМЕНА МАТЕРИАЛА И ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЯ АКСИАЛЬНО-ПОРШНЕВОГО НАСОСА</p> <p><i>ИМАШ РАН, Москва, Россия</i></p> | 360 |