

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Российская академия наук

Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт
машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук**

Научный Совет РАН по машиностроению

Межведомственный научный совет по трибологии

Российский национальный комитет по теории механизмов и машин

Ассоциация инженеров-трибологов России

ТРИБОЛОГИЯ – МАШИНОСТРОЕНИЮ

XV Международная научно-техническая конференция

Сборник трудов конференции

*Proceedings of XV International scientific conference
«Tribology for Mechanical Engineering»*

12-13 ноября 2024 года

Москва

УДК [531.43/.46+621.89](063)

ББК 34.413

T67

Главный редактор: Буяновский И.А.

Ответственный редактор: Самусенко В.Д.

Редакционная коллегия: Албагачиев А.Ю., Бирюков В.П., Куксенова Л.И., Прожега М.В.,
Стрельникова С.С., Цуканов И.Ю.

T67 Трибология – машиностроению: Труды XV Международной научно-технической конференции – М.: ИМАШ РАН, 2024. – 250 с.

ISBN 978-5-904282-20-2

В сборнике представлены статьи участников XV Международной научно-технической конференции «Трибология – машиностроению» (Трибомаш-2024), проходившей с 12 по 13 ноября 2024 года в ИМАШ РАН. На конференции были представлены результаты новых исследований в областях как теоретической, так и прикладной трибологии, которые выполнены отечественными и зарубежными специалистами за последние годы.

Основные направления работы конференции: фундаментальные проблемы трибологии, смазка и смазочные материалы, конструирование и расчёты узлов трения, трибологическое материаловедение, трибодиагностика и трибомониторинг, экологические проблемы трибологии, микро- и нанотрибология.

Сборник отражает современные научно-технические тенденции и рассчитан на научных работников, аспирантов, инженеров, конструкторов и технологов, занимающихся проектированием, изготовлением и эксплуатацией машин и оборудования.

ББК 34.413

УДК [531.43/.46+621.89](063)

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 978-5-904282-20-2

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), 2024

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАШИНЫ ТРЕНИЯ МТА-2

¹Абрамов К.А. *, ²Тюленев Д.Г., ²Пилюгин С.М.

* rosoil@rosoil.ru

¹Уфимский университет науки и технологий (УУНиТ), Уфа, Россия;

²ООО «Хозрасчетный творческий центр Уфимского авиационного института», Уфа, Россия.

Показана конструкция модернизированной машины трения МТА-2, которая позволяет измерять силу трения, нормальную нагрузку и температуру смазочного материала. Целью работы является создание программного обеспечения для машины трения МТА-2, позволяющее регистрировать и обрабатывать результаты испытаний, тем самым повысить информативность, точность и достоверность получаемых результатов экспериментальной оценки противозадирных и антифрикционных свойств испытываемых материалов, а также снизить время обработки результатов эксперимента. Программное обеспечение позволяет регистрировать данные, рассчитывать коэффициент трения, как для исследуемых смазочных материалов, так и для пар трения, состоящих из конструкционных и инструментальных материалов.

Ключевые слова: трение, износ, программное обеспечение, автоматизация, коэффициент трения, сила трения, трибология.

Введение

Оценка противозадирных, антифрикционных и противоизносных, свойств смазочных материалов является неотъемлемой частью работ по созданию новых масел и смазочных материалов. Первоначальные испытания проводятся на лабораторных приборах и установках [1-7].

Можно отметить ряд тенденций в области создания испытательного триботехнического оборудования. Наметился отход от создания универсального многоцелевого испытательного оборудования, который можно объяснить стремлением упростить и удешевить машину трения. Вторая тенденция связана с совершенствованием измерительной системы разрабатываемых машин трения. В первую очередь это касается компьютеризации сбора и обработки экспериментальных данных [8-10].

Таким образом, создание программного обеспечения, позволяющее регистрировать и обрабатывать результаты испытаний, тем самым повысить информативность, точность и достоверность получаемых результатов

IMPROVEMENT OF THE MTA-2 FRICTION MACHINE

Abramov K.A., Tyulenev D.G., Pilyugin S.M.

The design of an upgraded friction machine for determining the extreme pressure, antifriction and anti-wear properties of lubricants is presented. The upgraded machine allows you to measure the friction force, the normal load. The aim of the work is to create software for the MTA-2 friction machine (links to previous works), which allows recording and processing test results, thereby increasing the information content, accuracy and reliability of the results obtained from the experimental assessment of extreme pressure and antifriction properties of the tested materials, as well as reducing the processing time of the experimental results. The software allows you to record data and calculate the coefficient of friction, both for the lubricants under study and for friction pairs consisting of structural and instrumental materials.

Keywords: friction, wear, software, automation, coefficient of friction, friction force, tribology.

экспериментальной оценки противозадирных и антифрикционных свойств испытываемых материалов, а также снизить время обработки результатов эксперимента, является актуальной научно – технической задачей.

Материалы и методы

Авторами данной статьи проведена модернизация известной машины трения МТА-2 (рис1), которая заключается в создании системы плавного нагружения узла трения и установки измерительных систем для измерения величин сил трения между трущимися образцами и нормальной нагрузке на пару трения.

После модернизации машины трения датчики позволяют регистрировать нагрузку на рычаге и силу трения в режиме реального времени. Датчик силы (поз. 8 на рис.1) фиксирует силу трения. Система плавного нагружения (поз.3 на рис.1) оснащена датчиком силы, который регистрирует через рычаги (поз. 4 и 5 на рис.1) величину нормальной нагрузки на узел трения.

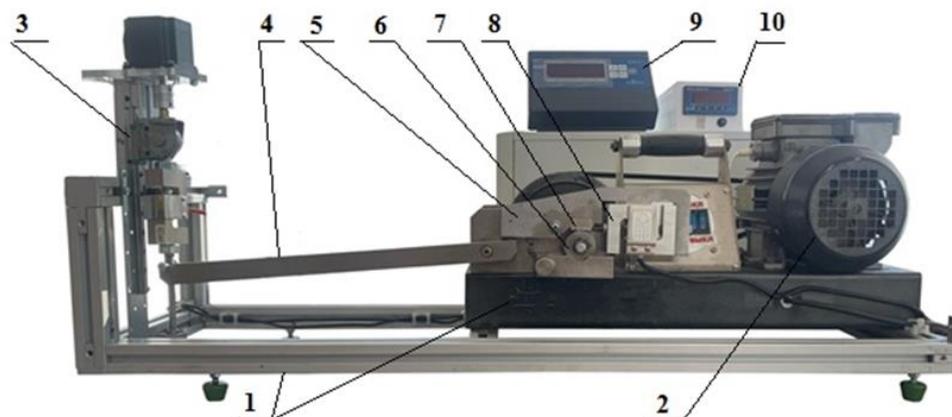


Рис. 1. Внешний вид модернизированной машины трения для определения противозадирных, антифрикционных и противоизносных свойств смазочных материалов: 1 – станина, 2 – электродвигатель, 3 – система плавного нагружения узла трения, 4 – рычаг, 5 – рычаг с верхним образцом 6 в виде ролика или бруска, 7 – нижний образец в виде кольца, 8 – силоизмерительный датчик, 9 – прибор, регистрирующий нормальную нагрузку на узел трения и температуру смазочного материала, 10 – прибор, регистрирующий силу трения между трущимися образцами

Важным показателем при оценке противозадирных, антифрикционных и противоизносных, свойств смазочных материалов является температура смазочного материала. Для ее отслеживания в реальном времени установка была оснащена платой Arduino Micro и термопарой. Термопара помещается в ванну со смазочным материалом.

Для обработки получаемых экспериментальных данных по нагрузке на узел трения, силы трения и температуры была разработана программа (рис. 2, рис. 3), которая позволяет регистрировать измерения с датчиков в реальном времени, вычислять коэффициент трения, сохранять данные в текстовых и графических форматах, а также формировать протоколы испытаний.

Показания коэффициента трения вычисляются на основании силы трения и нормальной нагрузки.

После окончания испытаний на экране компьютера появится окно для сохранения результатов. Необходимо указать название, дату и описание испытания. Результаты можно сохранить отдельными файлами (текстовые и графические) и сформировать отчет в формате PDF.

Расчет коэффициента трения μ производится по значению силы трения и нормальной нагрузки согласно формуле (1):

$$\mu = \frac{F_{тр}}{P_n} \quad (1)$$

где $F_{тр}$ – сила трения, Н; P_n – нормальная нагрузка на узел, Н.

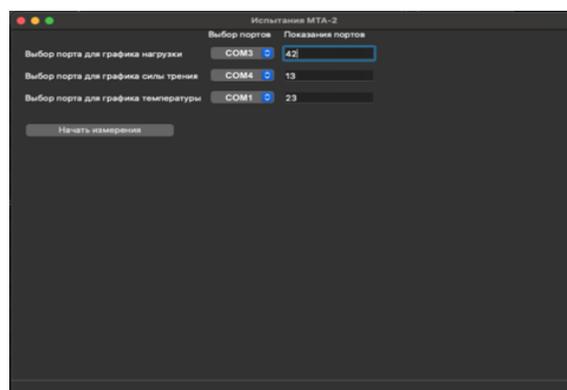


Рис. 2. Начальное окно. Выбор портов датчиков

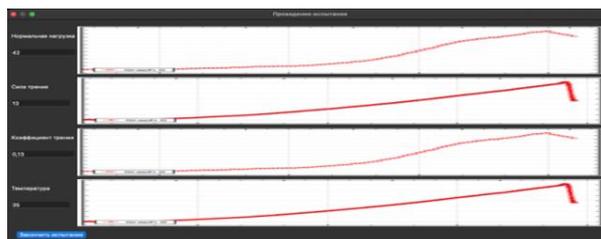


Рис. 3. Окно на экране компьютера при проведении испытаний

Результаты и обсуждение

Для тестирования разработанной программы были проведены испытания канатных смазочных материалов и получены протоколы испытаний. В результате работы исследовались такие смазочные материалы: Росойл К-112, Росойл К-110, Росойл-Торсиол-35 и Nyrosten N113 (Германия). Были проведены 2 типа испытаний, для определения нагрузки заклинивания (табл. 1) и коэффициента трения и температуры в течении 10 минут при нагрузке 145,3 кгс (рис. 4, рис. 5).

Табл. 1. Результаты испытаний на заклинивание

Название	Нагрузка заклинивания, кгс	Сила трения, Н	Коэффициент трения	Площадь пятна износа, мм ²
Росойл К-112	283,1	13,8	0,049	1,99
Росойл К-110	293,0	15,6	0,053	2,97
Росойл Торсиол 35	268,3	16,7	0,062	2,07
Nyrosten N113	553,8	18	0,033	8,69

По результатам сравнительных испытаний табл. 1 видно, что наилучшие противозадирные и антифрикционные свойства у канатной смазки Nyrosten N113, а противоизносные свойства у смазки Росойл К-112.

Вторая серия испытаний для тестирования программы проводилась при фиксированной нагрузке 145,3 кгс в течении 10 минут. На рисунке 4 показана зависимость температуры от времени испытаний, а на рисунке 5 зависимость коэффициента трения от времени испытаний для различных смазочных материалов.

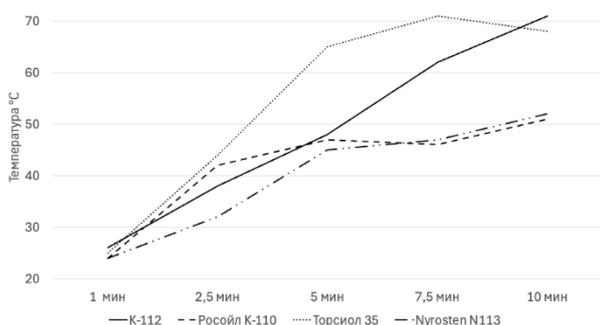


Рис. 4. Зависимость температуры смазочного материала от времени испытаний при нагрузке 145,3 кгс для различных смазочных материалов

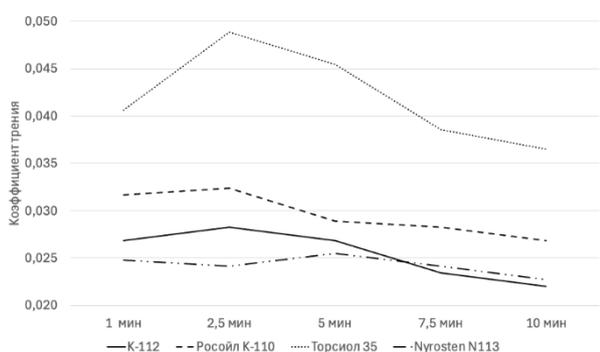


Рис. 5. Зависимость коэффициента трения от времени испытаний при нагрузке 145,3 кгс для различных смазочных материалов

По результатам сравнительных испытаний наибольшие значения температуры и коэффициента трения наблюдались при применении смазочного материала Росойл-Торсиол-35, а самые низкие при использовании Nyrosten N113.

Заключение

Разработанное программное обеспечение позволяет получать данные испытаний в реальном режиме времени и фиксировать зависимости «нагрузка на узел трения – время», «сила трения – время», «температура – время» и «коэффициент трения – время».

Проведены тестовые испытания программного обеспечения на примере сравнения противозадирных, противоизносных и антифрикционных характеристик канатных смазочных материалов.

- [1] Чичинадзе А.В. Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения. Под ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 1990. – 412 с.
- [2] Современная трибология. Итоги и перспективы / Отв. редактор К.В. Фролов. - М.: Изд-во ЛКИ, 2008. – 480 с.
- [3] Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник /под ред. К.В. Фролова, Е.А. Марченко. – М.: Машиностроение, 2008. – 384 с
- [4] Шаповалов В.В., Сладковски А., Эркенов А.Ч. Актуальные задачи современной триботехники и пути их решения // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2015. – № 1 (658). – С. 64-75.
- [5] Ибатуллин И.Д., Журавлев А.Н., Утянкин А.В., Галлямов А.Р., Неяглов Р.Р. Стенд и методики триботехнических испытаний материалов. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва. – 2011. – № 3-1 (27). – С. 218-223.
- [6] Федоров С.В. Структурно-энергетическая интерпретация трибосистемы // Трение и износ. – 2021. – Т. 42. – №2. – С. 186-195.
- [7] Испытания по методу Райхерта: сайт компании "Моденжи" г. Брянск: 2023. <https://modengy.ru/about/> (Дата обращения 21.10.2024)
- [8] Абрамов А.Н., Тюленев Д.Г., Шолом В.Ю., Пузырьков Д.Ф. Комплекс методов испытаний смазочных материалов применяемых в процессах металл обработки. XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник трудов в 4 томах. Т.4: Материалы симпозиумов. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. – с. 425-427.
- [9] Шолом В.Ю., Жернаков В.С, Абрамов А.Н. Методология исследований триботехнических характеристик и выбора смазочных материалов для процессов холодной обработки металлов давлением // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2016. – № 4. – С. 10-15.
- [10] Белов И.Б., Шолом В.Ю., Абрамов А.Н. Смазочные материалы «РОСОЙЛ». XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики: сборник трудов в 4 томах. Т.4: Материалы симпозиумов. – Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. – с. 437-439.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СУХОГО ТРЕНИЯ

¹Албагачиев А.Ю., ^{1,2}Кушнир А.П.*

* 89169521579@yandex.ru

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, РФ;
²РТУ-МИРЭА, Москва, РФ.

В работе рассмотрены автоколебательные процессы, возникающие при сухом трении. Приведены математические модели и результаты динамического моделирования, проведенные в среде Матлаб-Симьюлинк. Область применения полученных результатов – механизмы, работающие в условиях сухого трения при малых скоростях.

Ключевые слова: сухое трение, автоколебания, динамическое моделирование.

Введение

Сила трения играет огромную роль в технике, так как она во многом определяет условия работы машин и механизмов, влияет практически на все их характеристики, включая точность, жесткость, надежность, долговечность, тепловыделение, виброустойчивость, допустимые скорости рабочих органов и т.д.

В этой связи разработка имитационных моделей процесса трения является актуальной, так как позволяет создать более адекватные цифровые двойники машин в целом.

Особый интерес приобретает исследование трения при малых, так называемых, ползучих скоростях, при которых возникают автоколебательные процессы, что негативно сказывается на плавности и точности работы всего механизма.

Типичная экспериментальная зависимость [1] изменения силы трения от времени при переходе от покоя к движению показана на рис. 1.

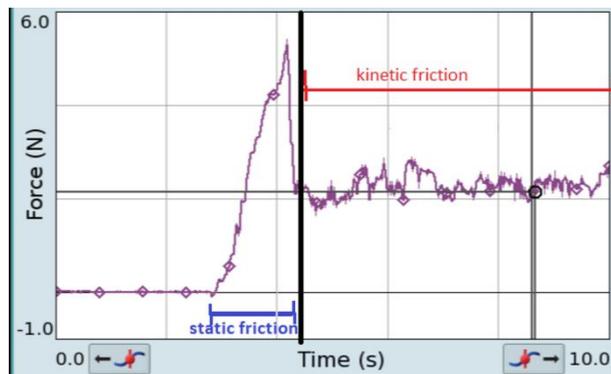


Рис. 1. Динамика изменения силы трения при переходе от покоя к движению

DRY FRICTION SIMULATION

Albagachiev A.Yu., Kushnir A.P.

The paper considers the self-oscillatory processes that occur during dry friction. Mathematical models and results of dynamic modeling carried out in the Matlab-Simulink environment are presented. The field of application of the obtained results is mechanisms operating in conditions of dry friction at low speeds.

Keywords: dry friction, self-oscillation, dynamic modeling.

В соответствии с опытными данными [2, 3] можно условно выделить два режима – покой и движение. Соответственно, этим двум режимам соответствуют два разных коэффициента трения:

f_0 – коэффициент трения покоя;

f_v – коэффициент трения движения.

Переменное значение коэффициента трения приводит при малых скоростях движения тела трения к возникновению фрикционных автоколебаний [4], для описания которых разработан ряд математических моделей [5].

Типовая модель для описания процесса трения приведена на рис. 2.

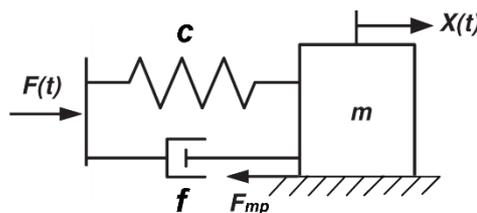


Рис. 2. Типовая модель для описания процесса трения

Применительно к режиму сухого трения модель, приведенная на рис. 2, может быть упрощена, так для рассматриваемого режима коэффициент жидкостного трения равен нулю, рис. 3.

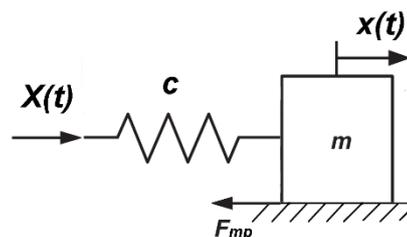


Рис. 3. Упрощенная модель сухого трения

Объект исследования - пара трения двух плоских тел.

Предмет исследования - процесс трения при малых скоростях.

Целью работы является получение динамической имитационной модели, описывающей процесс трения при малых скоростях.

В качестве **методов исследования** использован аппарат математического анализа, реализованный в системе Матлаб-Симьюлинк.

В качестве **исходных данных и допущений** примем постоянными ряд параметров:

- жесткость упругого элемента $c = \text{const}$;
- масса тела трения $m = \text{const}$;
- коэффициент трения покоя $f_0 = \text{const}$;
- коэффициент трения движения $f_v = \text{const}$;
- скорость перемещения упругого элемента

$$V = X(t)/t = \text{const},$$

где $X(t)$ - величина перемещения упругого элемента.

Разделим процесс движения на два этапа. Пусть начальная скорость тела равняется нулю. При упругом сжатии перемещения элементов тела на первом этапе будут равны, рис. 4:

$$X(t) \neq 0; x(t) = 0 \quad (1)$$

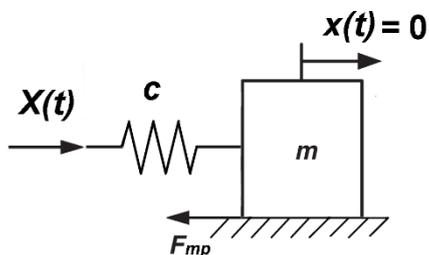


Рис.4. Схема модели первого этапа

Сила трения покоя F_0 будет линейно возрастать пропорционально времени, достигая максимума в конце первого этапа, рис. 5.

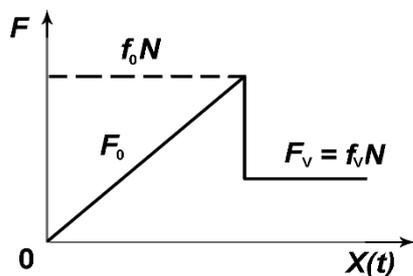


Рис. 5. Изменение силы трения

На втором этапе упругие силы начинают превышать силу статического трения, и начинается движение тела в соответствии с уравнением (2)

$$m \frac{dx}{dt} = \sum F = c(V_0 t - x) - f_v mg \quad (2)$$

Решение системы уравнений (1, 2) в программе Матлаб-Симьюлинк показано на рис. 6, результаты моделирования перемещения - на рис. 7.

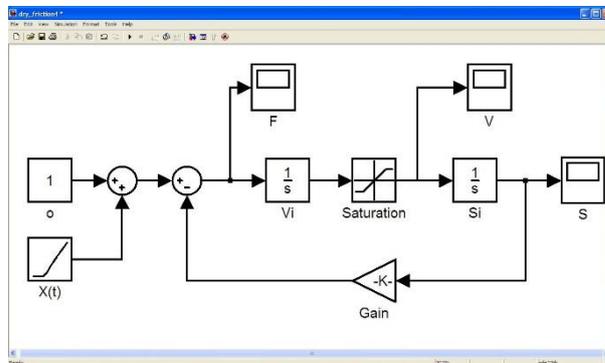


Рис. 6. Динамическая модель сухого трения

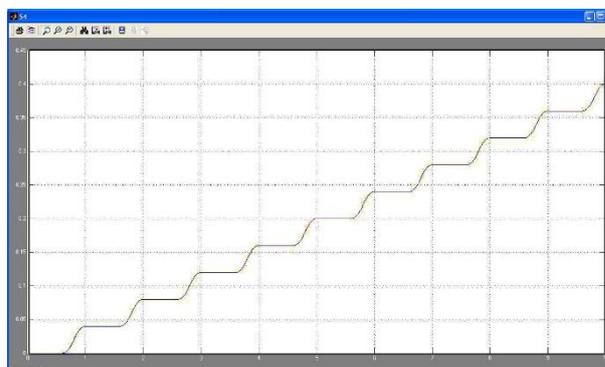


Рис. 7. Результаты моделирования перемещения тела трения от времени при малых скоростях скольжения

Особенностью данной модели является то, что исходные блоки программы не содержат гармонических источников, а автоколебания возникают благодаря разности значений коэффициентов трения покоя и трения движения.

- [1] Трение и смазка твёрдых тел / Ф.П. Боуден, Д. Тейбор; Перевод с англ. Н.М. Михина и А.А. Силина; Под ред. д-ра техн. наук И.В. Крагельского. – М.: Машиностроение, 1968. – 543 с.
- [2] Дерягин Б.В. Что такое трение? – М.: Изд. АН СССР, 1963. – 228 с.
- [3] Крагельский И.В., Щедров В.С. Развитие науки о трении. Сухое трение. – М.: Изд. АН СССР, 1956. – 236 с.
- [4] Крагельский И.В., Гитис Н.В. Фрикционные автоколебания. – М.: Наука, 1987. – 181 с.
- [5] Зобова А. А. Обзор моделей распределенного сухого трения // Прикладная математика и механика. – 2016. – Т. 80. – №. 2. – С. 194-206.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ

Албагачиев А.Ю., Мухтарова А.Б.*

* aygerim.tokhmetova@mail.ru

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия.

В данной работе показано численное исследование температуры легированного смазочного слоя. На основе метода прогонки решено дифференциальное уравнение с граничными и начальными условиями.

Ключевые слова: моторное масло, шунгит, температуры легированного смазочного слоя.

Введение

Смазочные масла с шунгитом обеспечивают антифрикционное и противоизносное действие [1-2], однако из-за отсутствия методики подбора композиции легированной добавкой, создание таких смазочных материалов проводится чисто эмпирически [3]. Поэтому в данной работе разработаны численные методы для расчета температуры смазочного слоя.

Цель предлагаемой статьи – построение метода для определения температуры легированного масла шунгитом.

В данном исследовании применяется моторное масло Mobil Ultra SAE 10W-40 с добавлением шунгита. Концентрация шунгита в смазочном масле варьируется в пределах 0,05-1 %.

Численное исследование

Рассмотрим задачу на основе дифференциального уравнения с применением численного метода решения, которое имеет следующий вид:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \alpha^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}, \quad (1)$$

где θ – температура смазочного слоя, z – координата, α – температуропроводность, t – время.

Начальные и граничные условия имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} \theta(z, 0) &= 0, 0 > z > H; \\ -\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} &= \alpha \tau v_0 \left(1 - \frac{z}{H}\right), t > 0; \\ z = H: \theta(\infty, t) &= 20, \end{aligned} \quad (2)$$

NUMERICAL STUDY OF THE LUBRICATING LAYER TEMPERATURE COMPARATIVE STUDIES OF THE TEMPERATURE OF THE LUBRICATING LAYER

Albagachiev A.U., Mukhtarova A.B.

This paper shows a numerical study of the temperature of the alloyed lubricating layer. Based on the probing method, a differential equation with boundary and initial conditions is solved.

Keywords: motor oil, shungite, temperature of the alloyed lubricating layer.

где α – коэффициент распределения теплоты между смазкой и вращающейся со скоростью v_0 поверхности, λ – теплопроводность смазочного слоя, H – зазор, τ – напряжение сдвига смазочного слоя.

Для замены дифференциальных операторов в (1) на их конечно – разностные аналоги применим неявную схему:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \frac{\theta_i^{n+1} - 2\theta_i^n + \theta_i^{n-1}}{k^2},$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \frac{\theta_{i+1}^{n+1} - 2\theta_i^{n+1} + \theta_{i-1}^{n+1}}{h^2}.$$

После подстановки конечно-разностных элементов в дифференциальное уравнение, получим:

$$\begin{aligned} \frac{\theta_i^{n+1} - 2\theta_i^n + \theta_i^{n-1}}{k^2} &= \alpha^2 \frac{\theta_{i+1}^{n+1} - 2\theta_i^{n+1} + \theta_{i-1}^{n+1}}{h^2}, \\ c^2 \rho^2 \frac{\theta_i^{n+1} - 2\theta_i^n + \theta_i^{n-1}}{k^2} &= \lambda^2 \frac{\theta_{i+1}^{n+1} - 2\theta_i^{n+1} + \theta_{i-1}^{n+1}}{h^2}, \\ -\lambda^2 k^2 \theta_{i+1}^{n+1} - \theta_i^{n+1} (\rho^2 c^2 h^2 + 2\lambda^2 k^2) &+ \lambda^2 k^2 \theta_{i-1}^{n+1} = \\ &\rho^2 c^2 h^2 \theta_i^n + 2\lambda^2 k^2 \theta_i^{n-1} \quad (3) \end{aligned}$$

В результате получаем нестационарную задачу, которую необходимо решать на каждом шаге по времени.

Для решения системы уравнений превратим задачу (3) в систему уравнений первого порядка, для этого применим набор чисел α_i и β_i , при которых выполняется следующее равенство:

$$\theta_i^{n+1} = \alpha_i \theta_{i+1}^{n+1} + \beta_i,$$

$$\theta_i^{n+1} = \frac{-\lambda^2 k^2}{\rho^2 c^2 h^2 + 2\lambda^2 k^2 - \lambda^2 k^2 \alpha_{i-1}} \theta_{i+1}^{n+1} + \frac{\lambda^2 k^2 \beta_{i-1} - \rho^2 c^2 h^2 \theta_i^n - 2\lambda^2 k^2 \theta_i^{n-1}}{\rho^2 c^2 h^2 + 2\lambda^2 k^2 - \lambda^2 k^2 \alpha_{i-1}}.$$

Для определения α_i и β_i необходимы значения α_1 и β_1 , которые были найдены из граничных условий с помощью ряда Тейлора:

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_1 = -1, \\ \beta_1 = \frac{\alpha \tau v_0 h}{\lambda \left(1 - \frac{1}{a^2 k^2}\right)} \left(1 - \frac{z}{H}\right) - \\ - \frac{2}{a^2 k^2 \left(1 - \frac{1}{a^2 k^2}\right)} \theta_1^n + \frac{1}{a^2 k^2 \left(1 - \frac{1}{a^2 k^2}\right)} \theta_1^{n-1}. \end{array} \right.$$

Численное решение краевой задачи гиперболического типа (1) с начальными и граничными условиями (2) получили методом прогонки. Была разработана программа на языке программирования Python, с использованием программных библиотек Pandas, Numpy и matplotlib.

Для сравнения численного результата краевую задачу решали методом Ньютона и стрельбы. После сопоставления с экспериментальными данными пришли к следующим результатам (см. табл. 1).

Табл. 1. Сопоставление данных

Смазочное масло	θ , °C (метод прогонки)	θ , °C (метод Ньютона)	θ , °C (метод стрельбы)	θ , °C (эксперимент)
Масло + 0,05% шунгита	22,3	21	21	22,8
Масло + 0,1% шунгита	21,8	21	20	22
Масло + 0,5% шунгита	21	20	19	21
Масло + 1% шунгита	20,5	21	21	20,8

Из таблицы 1 видно, что численное решение методом прогонки ближе к экспериментальным результатам.

Отметим, что при росте концентрации шунгита в моторном масле температура легированного смазочного слоя снижается.

Выводы

Проведено сравнение численных и экспериментальных данных температуры легированного смазочного слоя шунгитом с экспериментальными данными. Получено решение уравнения гиперболического типа с граничными и начальными условиями методом прогонки, Ньютона и стрельбы. Результаты, полученные методом прогонки, хорошо коррелируют с экспериментальными данными. Рост концентрации добавки снижает температуру смазочного слоя.

[1] Meng Y. et al. A review of advances in tribology in 2020–2021 //Friction. – 2022. – Т. 10. – №. 10. – С. 1443-1595.

[2] Duan L., Li J., Duan H. Nanomaterials for lubricating oil application: A review //Friction. – 2023. – Т. 11. – №. 5. – С. 647-684.

[3] Тохметова А.Б., Михеев А.В., Тананов М.А. Исследования трибологических свойств моторного масла с содержанием фуллеренов //Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2022. – №. 4. – С. 108-112.

ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МЕДНО-ЦИНКОВОГО ПОКРЫТИЯ ТИПА «ЛАТУНИ» НА РАБОТУ СОПРЯЖЁННОЙ ПАРЫ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

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

* GVMoskvitin@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, РФ.

Проведён расчёт величины фрагментов частиц корунда для покрытия из меди ($\approx 0,159$ мкм), а также меди и цинка ($\approx 1,72$ мкм), и показано влияние его на повышение качества поверхности контртела с 10 до 11 класса чистоты. Предложен механизм массопереноса меди и цинка на сопряжённую поверхность за счёт повышения энергии активации и изменения микрорельефа поверхности контртела. На основе результатов металлофизического анализа выявлено изменение содержания меди в цинке с формированием фаз, присущих латуням в широком диапазоне от α – до η - фазы с изменением механических свойств в микрообъёмах покрытия, что с учётом наличия градиента в фазовом составе и твёрдости, а именно модифицированном цинке до 170 HV, меди до 100 HV и цинке до 50 HV, может оказать влияние на сопротивление износу.

Ключевые слова: газодинамическое напыление, структура, износ, фазовый состав, частицы, испытания.

Введение

Для изготовления подшипников трения скольжения используются металлические и неметаллические материалы, металлы и сплавы и, в частности медь и латуни, используемые в виде изделий или наносимые как покрытия [1,2]. В зарубежных научных центрах проводятся исследования структуры и свойств покрытий триботехнического назначения, нанесённых газодинамическим напылением, с использованием частиц латуни разного химического состава или смеси меди и цинка с химическими соединениями в исходном состоянии, а также с предварительной и последующей термической обработкой [2,4,5]. В Российской Федерации для нанесения разнообразных функциональных покрытий используют метод «холодного» газодинамического

INFLUENCE OF FEATURES FORMATION STRUCTURE COPPER-ZINC COATING "BRASS" TYPE ON THE WORK OF THE CONJUGATED SLIDING FRICTION PAIR

Arkhipov V.E., Moskvitin G.V., Pugachev M.S.

The calculation of the size of corundum particle fragments for a copper coating ($\approx 0.159 \mu\text{m}$), as well as copper and zinc ($\approx 1.72 \mu\text{m}$) was performed, and its effect on improving the surface quality of the counterbody from 10 to 11 purity class was shown. A mechanism for the mass transfer of copper and zinc to the mating surface due to an increase in the activation energy and a change in the microrelief of the counterbody surface was proposed. Based on the results of metallographic analysis, a change in the copper content in zinc was revealed with the formation of phases inherent in brass in a wide range from α - to η - phase with a change in mechanical properties in microvolumes of the coating, which, taking into account the presence of a gradient in the phase composition and hardness, namely modified zinc up to 170 HV, copper up to 100 HV and zinc up to 50 HV, can affect wear resistance.

Keywords: gas-dynamic spraying, structure, wear, phase composition, particles, testing.

напыления механической смеси частиц металлов и оксида алюминия (корунда), который вводится в состав для деформации и уплотнения металлов покрытия с целью повышения адгезии (≤ 50 МПа) и когезионной прочности (≤ 130 МПа) [6,7].

Результаты сравнительных испытаний покрытий на основе меди и медно-цинкового покрытия типа «латуни», нанесённых на подложку из стали 40Х при температуре 450 °С, в условиях сухого трения при комнатной температуре показали, что износ покрытия типа «латуни» в 4 раза меньше, чем у покрытия меди [8,9]. Интенсивность изнашивания контртела в паре с медно-цинковым покрытием методом взвешивания выявить не удалось.

Целью данной работы являлось исследование влияния технологических параметров холодного

газодинамического напыления механической смеси частиц меди, цинка и корунда на формирование структуры и свойств медно-цинкового покрытия типа «латуни».

Материалы, Методики

Покрытие на подложку из стали 40X напыляли на газодинамической установке «ДИМЕТ – 404» при использовании потока воздуха с температурой нагрева в диапазоне 270-450 °С. Скорость перемещения сопла распылителя составляла – 10 см/с и расстояние от среза сопла до поверхности 10⁻² м. При нанесении покрытия применялась механическая смесь частиц меди и цинка и оксида алюминия (Al₂O₃) в состоянии поставки марки С-01-11 с соотношением компонентов по массе Cu:Zn:Al₂O₃ = 35%:35%:30%, изготовленная в Обнинском центре порошкового напыления [6].

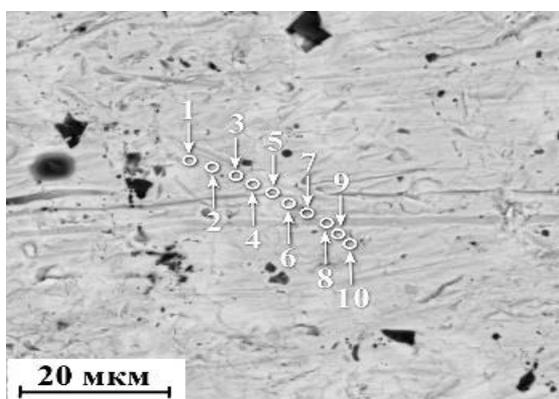
Результаты исследования

Рентгеноструктурный фазовый анализ покрытий на основе частиц меди, цинка, а также меди и цинка (медно-цинкового) с корундом, напылённых при температуре потока воздуха 360 °С, позволил определить, что в покрытии меди оксид алюминия не выявляется (≤1%), а в покрытии на основе цинка и медно-цинковом покрытии их массовая доля составляет ≈5,6%. На основании полученных результатов можно утверждать, что цинк, в основном, является тем компонентом покрытия, в который «внедряются» твёрдые частицы оксида алюминия и его фрагменты [8,10].

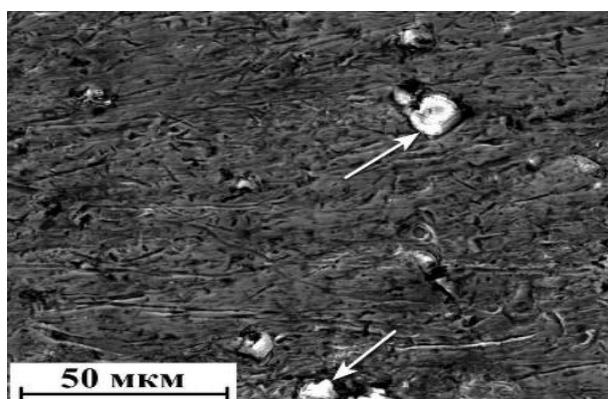
В 9 точках (спектрах, S = 3,14-7,07 мкм²) поверхности покрытия на основе меди, цинка, а также смеси частиц меди и цинка с корундом микрорентгеноспектральным анализом проводилась оценка состава покрытия (рис. 1а).

На основе соотношения массовой доли и интенсивности линий меди и алюминия к площади инициирования спектра рассчитывалась величина частицы оксида алюминия, которая не превышает 0,113 мкм². Содержание корунда (Al₂O₃) значительно отличалось по местам инициирования спектров от 1,87 масс% (интенсивность 63,74) до 0,09 масс% (интенсивность 3,01), что можно интерпретировать как наличие одной частицы разного размера или, что более вероятно разного количества частиц. Принимая условно, что частица одна, тогда её размер не может превышать 0,159 мкм, В таком случае, воздействие покрытия меди с закреплёнными в основе твёрдыми частицами корунда на контртело следует воспринимать как обработку абразивным инструментом (полировку) с повышением качества поверхности с 10 до 11 [11].

Микрорентгеноспектральный анализ выявил, что диффузия меди в частичку цинка сопровождается изменением концентрации меди от 100 ат% до 8 ат% и, в соответствии с диаграммой состояния медь-цинк, в частице цинка размером ≤35 мкм должны присутствовать твёрдый раствор цинка в меди с разной концентрацией цинка (α – фаза), твёрдый раствор меди в цинке (η – фаза) и твёрдые растворы электронного типа на базе CuZn₃ (ε – фаза), Cu₅Zn₈ (γ – фаза), и Cu Zn (β' – фаза), что даёт основание отнести эти покрытия к многокомпонентным (рис. 2) [1,10]. Следует отметить, что области, имеющие α – фазу с разной концентрацией меди, соответствуют латуням в диапазоне марок Л90 - Л63, а также область существования α + β' - фаз (Л59), у которых предел прочности изменяется от 260 Н/мм² до 390 Н/мм² и относительное удлинение в пределах 44-58%, что может оказывать влияние на сопротивление износу [12].



а



б

Рис. 1. Покрытие на основе смеси частиц меди и цинка: места микрорентгеноспектрального анализа на поверхности покрытия (а), изображение поверхности, полученное с помощью детектора вторичных электронов (б)

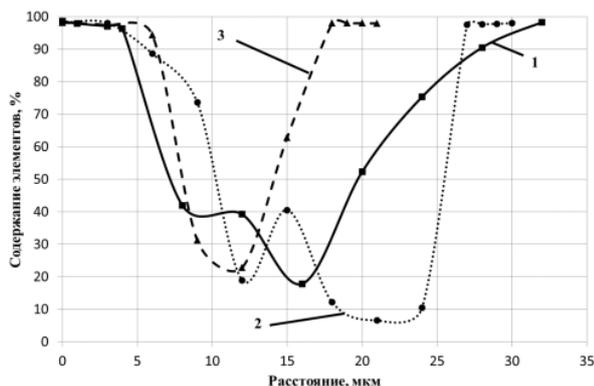


Рис. 2. Изменение содержания меди по частице цинка в медно-цинковом покрытии, нанесённом при температуре:
1 – 270 °С, 2 – 360 °С, 3 – 450 °С

Модифицированные частицы цинка имеют твёрдость порядка 170 HV при твёрдости частиц меди до 100 HV и цинка до 50 HV, что придаёт поверхности значительный градиент в макро свойствах. Рентгеноструктурный фазовый анализ наиболее часто выявляет в медно-цинковом покрытии наличие ϵ – и γ – фаз с массовой долей до 17% и 47% соответственно, что даёт основание назвать эти покрытия - типа «латуни» [10, 13].

При обработке медно-цинкового покрытия на абразивной бумаге наиболее быстро удаляются структуры, имеющие низкую твёрдость, например оксиды меди и цинка, выявляемые по краям частиц, а также металлы, имеющие более низкую твёрдость, что сопровождается формированием макрорельефа, который может, как и открытые поры (4-6%), выполнять роль масляных ван (рис. 16) [13].

Такой характер формирования и строения покрытия типа «латуни» даёт основание отнести их к **НОВЫМ МАТЕРИАЛАМ** триботехнического назначения.

Заключение

1. На основании проведённых расчётов показано наличие мелких фрагментов частиц оксида алюминия в покрытии меди ($\approx 0,159$ мкм) и медно-цинковом покрытии ($\approx 1,72$ мкм) и их влияние на качество поверхности пары трения скольжения из стали и медного, а также медно-цинкового покрытия.

2. Предложен механизм массопереноса меди и цинка на сопряжённую поверхность и обратно, который связан с активацией поверхности контртела и созданием определённого микрорельефа на поверхности контртела фрагментами частиц корунда, способного захватывать медь и латунь из покрытия с переносом массы с одной поверхности на другую, что позволяет паре трения иметь низкую

степень изнашивания, вплоть до эффекта безызносности.

3. Анализ распределения меди по частице цинка с изменением содержания от 100 ат% до 8 ат% показал наличие структур от α – фазы до η – фазы с существенным градиентом механических свойств в микро-, а также макрообъёмах медно-цинкового покрытия, а именно модифицированном цинке до 170 HV, меди до 100 HV и цинке до 50 HV, что может, как и макрорельеф поверхности создавать на ней области для удержания масла.

- [1] Ефремов Б.Н. Латуни. От фазового строения к структуре и свойствам. – М: ИНФРА-М, 2020. – 314 с.
- [2] Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. – М.: Высшая школа, 1991. – 319 с.
- [3] Diao P. et al. Microstructure, mechanical properties, and cavitation erosion performances of cold sprayed CuZn35 coatings //Surface and Coatings Technology. – 2022. – Т. 451. – С. 129074.
- [4] Wei F. J. et al. Thermomechanical properties of cold-sprayed copper coatings from differently fabricated powders //Surface and Coatings Technology. – 2022. – Т. 434. – С. 128128.
- [5] Zhu Z. et al. Effect of WC-17Co content on microstructure, mechanical properties and tribological behavior of low-pressure cold sprayed tin bronze composite coating //Surface and Coatings Technology. – 2023. – Т. 465. – С. 129589.
- [6] Димет. Применение технологии и оборудования. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dimet-r.narod.ru/> - (Дата обращения 14.10.2023).
- [7] Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. – М.: ФизМатЛит, 2010. – 536 с.
- [8] Архипов В.Е., Куксенова Л.И., Пугачев М.С., Козлов Д.А., Москвитин Г.В. Влияние модифицированных медью поверхностных слоёв на работоспособность пар трения скольжения сталь – сталь // Трение и износ – 2023. – Т. 44. – № 4. – С. 322-335.
- [9] Сачек Б.Я., Мезрин А.М., Архипов В.Е., Лондарский А.Ф. Модифицирование поверхностей трибосопряжений напылением металлических покрытий как средство повышения их фреттингостойкости // Трение и износ – 2018. – Т. 39. – № 4. – С. 24-29.
- [10] Архипов В.Е., Муравьёва Т.И., Пугачев М.С., Шкалей И.В. Влияние технологических параметров газодинамического напыления на структурно - фазовые превращения в покрытии типа «латуни» //Упрочняющие технология и покрытия. – 2020. № 12. – С. 554-560
- [11] Лоскутов В.В. Шлифование металлов. Учебник для СПТУ. Изд. 7-е. – М.: «Машиностроение», 1985. – 256 с.
- [12] Архипов В.Е., Муравьёва Т.И., Москвитин Г.В., Пугачев М.С., Щербак О.О. Влияние термической обработки на фазовый состав медно-цинкового покрытия на сталях // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2023. – № 7. – С. 3-7.
- [13] Крагельский И.В., Алисин В.В. Трение, изнашивание и смазка. Справочник. Книга 1. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ К ЗАДИРУ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ В РЕЖИМЕ МЕТАЛЛОПЛАКИРОВАНИЯ

Береснева В.Л., Корнеев А.А.*

* vso3@yandex.ru

РГУ им. А.Н. Косыгина, Москва, Российская Федерация.

В статье рассмотрены вопросы повышения задиристости стальных трущихся поверхностей. Решить эту проблему предлагается путем формирования приработочного покрытия фрикционной обработкой в режиме металлоплакирования. Предлагается состав технологической среды и режимы нанесения покрытия с улучшенными трибологическими характеристиками. Технология нанесения этого покрытия является простой, недорогой и экологичной, благодаря чему она может применяться для повышения стойкости к задиру поверхностей узлов трения различного оборудования.

Ключевые слова: трибопокрытие, схватывание и заедание, металлоплакирование, финишная антифрикционная безабразивная обработка.

Введение

Схватывание – это вид изнашивания, который возникает в результате заедания деталей механизмов при трении без смазки или при недостаточной смазке. Этот процесс сопровождается возникновением царапин, рисок и задиrow на поверхностях трущихся деталей. Причинами схватывания могут быть различные факторы, включая недостаточное количество или качество смазочного материала, неправильный выбор материалов пар трения, неравномерный износ деталей, перегрев механизма и загрязнения на поверхности деталей [1]. Это приводит к наиболее опасным разрушениям трущихся поверхностей.

Теория схватывания основана на явлении молекулярного взаимодействия между поверхностями трущихся деталей. Согласно этой теории, при определенных условиях силы молекулярной адгезии становятся настолько большими, что происходит непосредственный контакт металла с металлом, что приводит к схватыванию и заеданию.

Различают схватывание I рода (холодный задр) и II рода (горячий задр). В первом случае схватывание возникает из-за высоких контактных нагрузок при невысоких температурах. Во втором

INCREASING THE RESISTANCE TO SCUFFING OF CONTACT SURFACES BY FRICTION TREATMENT IN THE METAL PLATING MODE

Beresneva V.L., Korneev A.A.

The article discusses the issues of increasing the abrasion resistance of steel rubbing surfaces. It is proposed to solve this problem by forming a work-in-progress coating by friction treatment in the metal plating mode. The composition of the technological medium and coating modes with improved tribological characteristics are proposed. The technology of applying this coating is simple, inexpensive and environmentally friendly, so it can be used to increase the resistance to scuffing of the surfaces of friction units of various equipment.

Keywords: tribo-coating, setting and jamming, metal plating, finishing antifric-tion-free abrasive treatment.

случае схватывание возникает при высоких температурах в зоне контакта.

В общем случае процесс схватывания происходит в несколько этапов:

1. Начало контакта поверхностей – трущиеся поверхности начинают контактировать друг с другом.

2. Разрушение масляной пленки – в результате высоких нагрузок или низкой температуры происходит разрушение слоя масла между поверхностями.

3. Прямой контакт металл-металл – при отсутствии масляной пленки поверхности начинают взаимодействовать непосредственно.

4. Развитие процессов схватывания – начинается образование царапин, рисок и задиrow на поверхностях деталей.

5. Проявление признаков схватывания – возникают видимые следы повреждений на поверхностях, такие как задиры и царапины.

К одним из действенных технологических методов борьбы с этим вредным явлением можно отнести нанесение переработанных трибопокрытий. Обладая низкой сдвиговой прочностью, они обеспечивают трибосопряжению защиту от заедания и относительно малые потери на трение [2].

Трибопокрытия формируются различными методами при фрикционном контакте: при переносе материала с одной поверхности на другую, из технологической среды или металлопакирующих смазочных материалов. Для формирования качественного покрытия процесс может протекать при повышенной температуре, с использованием электрического тока или магнитных полей.

Самым известным способом создания трибопокрытий является финишная антифрикционная безабразивная обработка [3-6]. При данном способе покрытие формируется при фрикционном контакте поверхности и инструмента в присутствии специальной технологической среды. Полученное трибопокрытие позволяет сократить время приработки узлов трения, повышает площадь фактического контакта и снижает вероятность возникновения задиров на трущихся поверхностях.

Наиболее простой способ сформировать противозадирное покрытие – провести фрикционную обработку поверхности в режиме металлоплакирования.

С ее помощью на обрабатываемой поверхности детали узла трения образовывается пленка толщиной около 1 мкм из пластичного металла. Это достигается применением специального инструмента, выполненного из упругого материала (войлок, фетр или резина) и технологической среды, содержащей ПАВы, ионы металлов и другие компоненты.

Цель данного исследования – разработать состав технологической среды и способ формирования противозадирного покрытия с улучшенными трибологическими характеристиками.

Материалы и методы

Для повышения трибологических характеристик формируемого покрытия было решено в качестве базового компонента разрабатываемой технологической среды использовать органический растворитель, содержащий в себе поверхностно активные вещества. В качестве такого материала использовалась композиция фторсодержащая многофункциональная «Эпилам СКФ-05» (ТУ 2412-002-13868195-2012). Это подвижная прозрачная жидкость без воды и механических примесей с массовой долей фторсодержащего поверхностно-активного вещества около 1,5%. В нем было растворено 5% хлорида меди (II).

Были изготовлены стальные образцы (сталь 45, твердость HRC 35) в виде роликов и колодок с шероховатостью рабочей поверхности Ra 0,32. Трибопокрытие формировалось посредством

натирания поверхности фетровым роликом, смоченным технологической средой. Режимы нанесения покрытия: время нанесения – 30 секунд, скорость скольжения – 0,2 м/с, удельная нагрузка на образец – 0,5 МПа.

Испытания подготовленных образцов в количестве 20 штук (десять без покрытия, десять с покрытием) проводились по ГОСТ 23216-84 на триботехническом комплексе ТК-1 по схеме колодка-ролик-колодка при скорости скольжения 2 м/с. Смазывание образцов (маслом И-20А) было разовым, в начале испытаний.

Результаты и обсуждение

При проведении испытаний по определению предельной нагрузки на трущиеся материалы при ступенчатом нагружении образцов было выявлено, что на образцах без покрытия при удельной нагрузке 20 МПа произошел задира. На образцах с покрытием задира не произошел при максимальной удельной нагрузке в данном испытании (25 МПа). Результаты испытаний по определению предельной нагрузки на трущиеся материалы при ступенчатом нагружении образцов приведены на рис. 1.

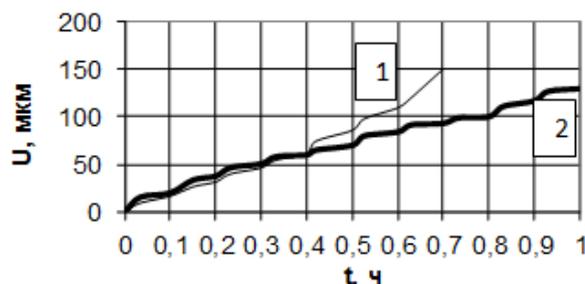


Рис. 1. Графики зависимости износа образцов от удельной нагрузки (время испытания 1 час):
1 – без покрытия; 2 – с покрытием

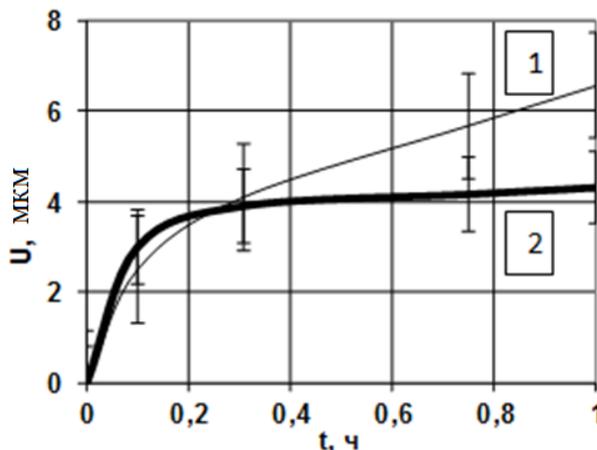


Рис. 2. Графики зависимости износа образцов от времени испытания (удельная нагрузка 7,5 МПа):
1 – без покрытия; 2 – с покрытием

На рис. 2 представлены результаты часовых испытаний на износ образцов без и с покрытием при удельной нагрузке 7,5 МПа.

Анализ графиков показывает, что у образцов с трибопокрытием период приработки значительно ниже, чем у образцов без покрытия.

При этом на начальном этапе испытаний можно видеть ускоренный износ образцов с покрытием, что, скорее всего, связано с процессами адаптации поверхности. После завершения этого периода наблюдается снижение интенсивности изнашивания примерно в полтора раза.

Заключение

Испытания продемонстрировали, что трибопокрытие позволяет увеличить продолжительность работы узла трения, особенно при тяжелых режимах работы. Применение данного покрытия сокращает время приработки сопряжений в три раза и существенно улучшает их эксплуатационные характеристики. Технология нанесения этого покрытия является простой, недорогой и экологичной, благодаря чему она успешно применяется для улучшения характеристик узлов трения в оборудовании текстильной и легкой промышленности.

[1] Гаркунов Д.Н., Корник П.И. Виды трения и износа. Эксплуатационные повреждения деталей машин. – Москва: Изд-во МСХА, 2003.

[2] Буяновский И.А., Самусенко В.Д. Граничная смазка как защита трибосопряжения от износа и заедания при жестком режиме работы // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2019. – № 8. – С. 379-384.

[3] Балабанов В.И., Голубев И.Г., Добряков Д.В. Совершенствование технологического процесса фрикционного нанесения защитных покрытий // Техника и оборудование для села. – 2023. – № 10(316). – С. 31-34.

[4] Гаркунов Д.Н. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) поверхностей трения деталей // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2009. – № 2. – С. 10-17.

[5] Ипатов А.Г., Шмыков С.Н., Ширококов В.И. Разработка технологии получения антифрикционного покрытия методом ФАБО и анализ свойств покрытия // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2024. – № 1(77). – С. 79-85.

[6] Корнеев А.А., Голубев А. П. Использование трибопокрытий для снижения вероятности риска возникновения схватывания и заедания трущихся поверхностей // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2020. – № 18. – С. 4-7.

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФОТОПОЛИМЕРА В ПАРЕ СО СТАЛЬЮ 40X

Бирюков В.П.*, Горюнов Я.А.

* laser-52@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия.

Приведены результаты триботехнических испытаний образцов из фотополимерной смолы на основе соевого масла с различным временем отверждения в паре трения со сталью 40X при нагрузке 1...6,59 МПа и скорости скольжения 0,25...3,69 м/с. Установлено, что наименьшим коэффициентом трения обладал образец, подверженный обработке ультрафиолетовым излучением в течение 45 минут.

Ключевые слова: коэффициент трения, аддитивные технологии, фотополимер, ультрафиолетовое облучение.

Введение

Аддитивное производство, также известное как 3D-печать – это быстроразвивающаяся перспективная технология, которая привлекла внимание всего мира. Проекционная масочная стереолитография (Digital Light Processing (DLP)) относится к высокоточным методам и является широко используемой технологией трехмерной печати, основанной на принципе отверждения фотополимерной смолы ультрафиолетовым излучением. Данные принтеры работают по принципу послойного выращивания, где в ванну с прозрачным дном наливают материал для печати, далее платформа к которой будут крепиться будущие слои опускается, оставляя зазор равный величине слоя, следом ультрафиолетовый проектор, установленный под ванной, засвечивает и целиком отверждает требуемый слой, заранее нарезанный в программе. После печатная платформа поднимается, смола заполняет дно ванны, платформа опускается и процесс повторяется. Данная технология нашла широкое применение во многих сферах производства: автомобилестроении, авиастроении, медицине и т.д. Она применима для различных задач начиная быстрым прототипированием, изготовлением неотчетливых механизмов, форм для литья под давлением и заканчивая изготовлением функциональных прототипов и конечных изделий. Применение промышленных принтеров для трехмерной печати позволяет

INFLUENCE OF ULTRAVIOLET CURING ON TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF PHOTOPOLYMER PAIRED WITH 40CR STEEL Biryukov V.P., Goryunov Ya.A.

The results of tribological tests of samples made of photopolymer resin based on soybean oil with different curing times in a friction pair with 40Cr steel at a hardness of 1...6.59 MPa and a sliding speed of 0.25...3.69 m/s are presented. It was found that the lowest friction coefficient, depending on the sample, is changed by ultraviolet curing treatment for 45 minutes.

Keywords: friction coefficient, additive technologies, photopolymer, ultraviolet radiation.

повысить эффективность производственного процесса при изготовлении деталей сложной конструкции, производство которых затруднительно классическими методами. Материал для выращивания представляет собой смесь из трех основных компонентов: олигомеров, мономеров и фотоинициаторов. Кроме основных компонентов в состав смол могут вводиться наполнители различного функционального назначения.

Было проведено сравнение износостойкости образцов из полиметилметакрилата (ПММА) [1], диаметром 19,5 и высотой 3,7 мм, изготовленных тремя способами. Образцы из первой группы были изготовлены методом литья в силиконовые формы. Образцы из второй группы – методом лезвийной обработки на фрезерном станке. Образцы из третьей группы были выращены методом цифровой обработки светом (DLP) с высотой отверждаемых слоев 50 мкм. Испытания для определения триботехнических характеристик проводились по схеме «шар-плоскость образца». Шар из стеатита (силиката магния) диаметром 6 мм совершал возвратно поступательные движения в течение 5000 циклов при нагрузке 5 Н. Длина хода составляла 1 см. Наименьшая глубина износа 85,7 мкм была зафиксирована у образцов из второй группы, за ними следовали образцы из третьей группы с глубиной износа 99,1 мкм и образцы из первой группы 111,4 мкм, соответственно. Заключение, что лучшей износостойкостью обладал образец,

изготовленный методом лезвийной обработки на фрезерном станке.

Образцы с размерами $15 \times 15 \times 2$ мм были выращены из фотоотверждаемой смолы на основе полипропилена [2] методом цифровой обработки светом (DLP) с высотой отверждаемых слоев 25 мкм. Первая партия состояла образцов без дополнительной обработки. Вторая партия состояла из образцов, на поверхность которых было нанесено покрытие из аморфного алмазоподобного углерода (DLC), легированное вольфрамом толщиной 0,8 мкм. На поверхность образцов из третьей партии, наносилось покрытие DLC нелегированное вольфрамом. Испытания для определения триботехнических характеристик проводились по схеме «стальной шар-плоскость образца» при нагрузке 100 мН. Шар из стали AISI 52100 диаметром 4 мм совершал возвратно-поступательные движения с длиной хода 2,5 мм и скоростью скольжения 2,5 мм/с, соответственно. Наилучшие показатели коэффициента трения 0,15...0,2 имели образцы из второй партии, за ними следовали образцы из третьей партии коэффициент трения которых составлял 0,3...0,6. Коэффициент трения необработанных образцов составлял 0,75...0,9. Определено, что нанесение на поверхность выращенных образцов покрытия из аморфного алмазоподобного углерода увеличило износостойкость.

Было произведено несколько партий образцов с размерами $15 \times 15 \times 5$ мм, выращенных из фотоотверждаемой смолы на основе акрилата [3] методом цифровой обработки светом (DLP) с толщиной отверждаемых слоев 100 мкм. Первая партия образцов состояла из образцов из чистой смолы. Вторая партия состояла из образцов с содержанием микрокапсул PS 1 мас.%. Остальные образцы были изготовлены с содержанием микрокапсул PS размером 10-30 мкм (пропитанных маслом PAO6) 5, 10, 15, 20 мас.%, соответственно. Испытания по определению триботехнических характеристик проводились по схеме «стальной шар-плоскость образца» при нагрузке 3 и 5 Н. Шар из стали GCr15, диаметром 4 мм, совершал возвратно-поступательные движения с длиной хода 3 мм. Средняя скорость скольжения составляла 30 мм/с. Наименьший коэффициент трения 0,05 зафиксирован при испытании образцов с содержанием микрокапсул PS 10 мас.%, что в 15 раз меньше, чем у образцов из чистой смолы 0,78. Образцы с добавлением микрокапсул PS с содержанием 5 и 20 мас.% имели коэффициенты трения 0,10-0,13 и 0,057-0,082 в зависимости от

нагрузки. Минимальная скорость изнашивания $7,1 \times 10^{-6}$ мм³/Нм также наблюдалась при испытании образцов с содержанием микрокапсул PS 10 мас.%. При этом скорость изнашивания образцов из чистой смолы составляла $8,1 \times 10^{-4}$ мм³/Нм. Однако с увеличением содержания микрокапсул PS скорость износа композита увеличивалась. Наибольшую твердость по Шору 88 D имели образцы из чистой смолы, следом следовали образцы с содержанием микрокапсул 1 мас.% – 76 D и далее по убыванию до образцов с содержанием 20 мас.% – 64 D, соответственно. Установлено, что добавление микрокапсул PS резко увеличивало износостойкость.

Целью настоящей работы являлось определение влияния ультрафиолетового излучения на коэффициент трения образцов фотополимера.

Материалы и методы

Образцы были выращены на фотополимерном 3D-принтере по технологии DLP. В качестве материала для выращивания была использована смола Anycubic ECO UV Resin Clear на основе эпоксидированного соевого масла. Первая партия образцов (1) состояла образцов без дополнительной обработки. Вторая партия (2) была подвергнута обработке ультрафиолетовым излучением (УФО) в течение 30 минут. Третья партия (3) была подвергнута УФО в течение 45 минут, четвертая партия образцов (4) – 60 минут, соответственно. Габариты образцов составляли $70 \times 20 \times 10$ мм. Испытания для определения триботехнических характеристик выполняли по схеме: «торец кольцевой оправки (сталь 40X) – широкая сторона образца (фотополимер)» в условиях смазки маслом МГЕ-10а. Торцу оправки перед каждым циклом испытаний была передана шероховатость наждачной бумагой зернистостью P600 и P1200. Испытания проводились при нагрузке 1-6,59 МПа и скорости скольжения 0,25-3,69 м/с. Исследование морфологии поверхности трения образцов были выполнены на цифровом микроскопе.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены графики зависимости коэффициента трения от скорости скольжения при обработке торца кольцевой оправки наждачной бумагой зернистостью P600 (рис. 1, а) и P1200 (рис. 1, б). Минимальные значения коэффициента трения 0,06...0,08 получены для пары трения сталь 40X–фотополимер, подверженный обработке ультрафиолетовым излучением в течение 45 минут. Далее по возрастанию коэффициентов трения следовали необработанные образцы, затем образцы с временем отверждения 30 и 60 минут, соответственно. Однако у необработанного образца

при скорости скольжения более 1,5 м/с наступает заедание. При испытании образцов, отвержденных в течение 30, 45 и 30 минут, на скорости скольжения свыше 3,0 м/с наблюдалось плавление образцов фотополимера с последующим снижением коэффициента трения.

На рисунке 2 приведены графики зависимости коэффициента трения от давления при обработке торца кольцевой оправки на наждачной бумаге зернистостью Р600 (рис. 2, а) и Р1200 (рис. 2, б). Наименьшим коэффициентом трения 0,17...0,2 обладал необработанный образец. Следом по возрастанию следовали образцы, обработанные ультрафиолетовым излучением в течение 45, 60 и 30 минут. При скорости скольжения свыше 4,5 МПа у необработанного образца наступал зади́р. Стоит отметить, что при испытании обработанных образцов зади́р происходил при нагрузке около 6,5 МПа.

Из графиков видно, что обработка ультрафиолетовым излучением позволила увеличить диапазон скорости скольжения в 1,5-2 раза, а нагрузки примерно в 1,4 раза, соответственно.

Заключение

Проведенные эксперименты показали, что наименьшим коэффициентом трения обладал образец, подверженный обработке ультрафиолетовым излучением в течение 45 минут. Необработанный образец показывал меньший коэффициент трения, но при меньших скорости и нагрузке.

[1] Huettig F. et al. Polishability and wear resistance of splint material for oral appliances produced with conventional, subtractive, and additive manufacturing //Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. – 2017. – Т. 75. – С. 175-179.

[2] Marian M. et al. Combining multi-scale surface texturing and DLC coatings for improved tribological performance of 3D printed polymers //Surface & Coatings Technology. – 2023. – Т. 466 – С. 129682.

[3] Yang C. et al. 3D Printing Composite with Microcapsules for On-Demand Lubrication //Tribology Letters. – 2024. – Т. 72. – №. 1. – С. 31.

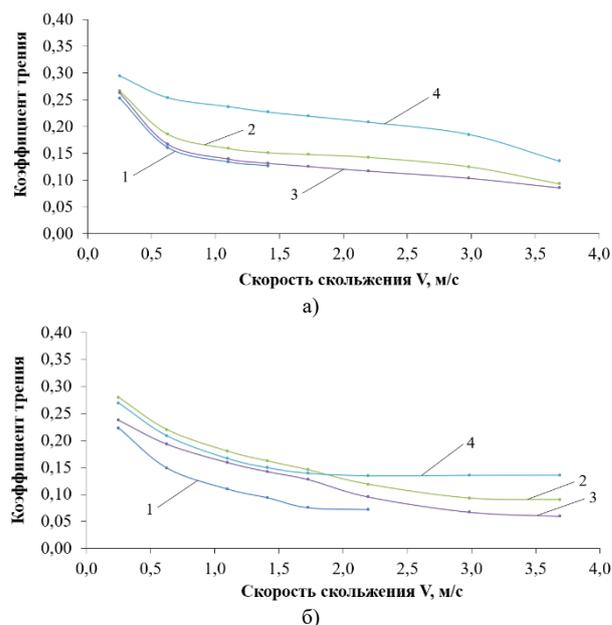


Рис. 1. График зависимости коэффициента трения от скорости скольжения при обработке стали 40X наждачной бумагой Р600 (а) и Р1200 (б): 1 – необработанные образцы, 2 – УФО 30 минут, 3 – УФО 45 минут, 4 – УФО 60 минут

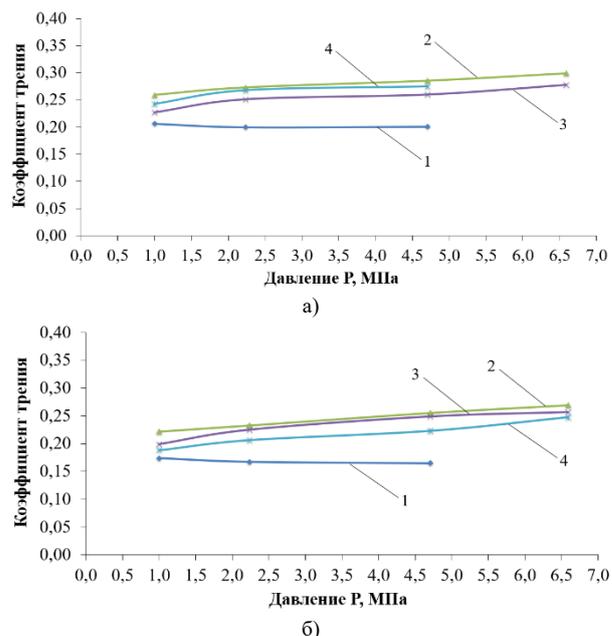


Рис. 2. График зависимости коэффициента трения от давления при обработке стали 40X наждачной бумагой Р600 (а) и Р1200 (б): 1 – необработанные образцы, 2 – УФО 30 минут, 3 – УФО 45 минут, 4 – УФО 60 минут

ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ НА КОЭФФИЦИЕНТЫ ТРЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ

Бирюков В.П.*, Якубовский А.А.

* laser-52@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия.

Работа посвящена определению коэффициента трения сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), высокомолекулярного полиэтилена (ВМПЭ), полиэтилентерефталата (ПЭТ) и полиоксиметилена (ПОМ). Получены закономерности коэффициентов трения в зависимости от шероховатости поверхности втулки. Наименьшими коэффициентами трения обладали образцы ВМПЭ за ними по убыванию износостойкости следовали образцы, СВМПЭ, ПЭТ и ПОМ. Результаты исследований могут быть использованы для замен металлических деталей в автомобилестроении, кораблестроении и подвижном состав железнодорожного транспорта.

Ключевые слова: сверхвысокомолекулярный полиэтилен, коэффициент трения, композиционный полимер.

Введение

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) в работе [1] был изготовлен в виде штифтов диаметром 5 мм и высотой 7,5 мм, для определения коэффициента трения в зависимости от траектории движения, а (прямая линия), б (круг), в (спираль Архимеда), г (Лемниската). Испытание проводили по схеме «штифт-диск» (СоСг, диаметр 60 мм, толщина 6 мм), при скорости скольжения 51 мм/с, при давлении 122-126 Н. Были получены самые низкие коэффициенты трения при использовании траектории (а) 0,118-0,034, а при траектории (б) 0,204, при траектории (в) 0,17-0,043, при траектории (г) 0,223-0,047. Было выявлено, что кривизна движения влияет на рост коэффициента трения СВМПЭ.

Для испытаний в работе [2] были использованы прямоугольные образцы из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), Испытание на скольжение проводили по схеме «шар-плоскость» (Al_2O_3 , диаметр 1,5 мм), с продолжительностью 3000 циклов, при нагрузке 100-1000 мН, скорости скольжения 1, 8, 12 мм/с, путь трения составлял 4,8 м, при контактном давлении 30-60 МПа. Данные испытания показали, что коэффициент трения СВМПЭ в среднем имеет

EFFECT OF SURFACE ROUGHNESS ON FRICTION COEFFICIENTS OF POLYMERS

Biryukov V.P., Yakubovsky A.A.

The work is devoted to determining the friction coefficient of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE), high molecular weight polyethylene (HMWPE), polyethylene terephthalate (PET) and polyoxymethylene (POM). The patterns of friction coefficients depending on the bushing surface roughness are obtained. The lowest friction coefficients were found in HMWPE samples, followed by UHMWPE, PET and POM samples in decreasing wear resistance. The research results can be used to replace metal parts in the automotive industry, shipbuilding and rolling stock of railway transport.

Keywords: ultra-high molecular weight polyethylene, coefficient of friction, composite polymer.

значение 0,1. Также испытание показало, что низкие нагрузки привели к длительному времени приработки, изменение скорости скольжения не оказало влияния на динамический коэффициент трения.

Образцы штифтов в работе [3] были изготовлены из СВМПЭ и его композита с добавками медного порошка с размером частиц 20 мкм и связующего компонента WD-60, диаметром 10 мм и высотой 20 мм. Испытания на износ проводили по схеме «штифт-диск» (Абразивная бумага W20) при скорости скольжения 150 мин⁻¹, с силой нагружения 24 Н. Испытания на сжатие проводили на приборе ДУ-35 при комнатной температуре и относительной влажности 40%, а скорости сжатия 2 мм/мин. По окончании испытаний потери от износа для обоих материалов составили соответственно 0,033 и 0,021 мм, т.е. потери от износа композита существенно на 36,4% ниже, а коэффициент трения увеличился примерно на 3,1%. Установлено, что предел текучести композита под давлением на 5,2 % выше, а соответствующая деформация на 7,7 % выше, чем у чистого СВМПЭ в области упругой деформации.

Для испытаний в работе [4] были изготовлены дисковые образцы, где в качестве подложки использовались пластины из Si толщиной 455-575 мкм, на

которые наносили раствор из СВМПЭ. Испытания на трение были проведены по схеме «шар-диск» (Si_3N_4 с диаметром 4 мм), при частоте вращения диска 2 мин^{-1} , линейной скорости $0,21 \text{ мм/с}$, и нагрузках 15, 25, 50, 75 мН. Коэффициенты трения были равны 0,035, 0,03, 0,025, 0,02 соответственно приложенной нагрузки. Коэффициент трения демонстрировал тенденцию к уменьшению с увеличением приложенной нагрузки.

Целью нашей работы было определение значения коэффициентов трения в зависимости от шероховатости поверхности торца контрообразца (втулки) при обработке наждачной бумагой зернистостью P180, P600, P1200.

Материалы и методы

Для выполнения экспериментов были изготовлены прямоугольные образцы полимеров сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) (1), высокомолекулярного полиэтилена (ВМПЭ) (2), полиэтилентерефталата (ПЭТ) (3) и полиоксиметилена (ПОМ) (4) с размерами $40 \times 20 \times 10 \text{ мм}$. Определение трибологических характеристик проводили на машине трения МТУ-01 при испытании плоских образцов в паре трения с кольцевым контрообразцом из стали 40Х. Торцы кольцевого контрообразца обрабатывали на наждачной бумаге из карбида кремния с зернистостью P180, P600, P 1200. Давление и скорость скольжения были $0,73 \text{ МПа}$ и $0,5 \text{ м/с}$ соответственно. Испытания проводили без применения смазки.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены графики коэффициентов трения в зависимости от шероховатости поверхности контрообразца. При уменьшении шероховатости после обработки с P180 до P600, коэффициент трения уменьшается в 1,5-2 раза для всех образцов, что возможно связано с увеличением площади фактического контакта в паре трения. При снижении шероховатости после обработки на P1200 коэффициент трения увеличивался, что могло быть связано с возрастанием силы молекулярного взаимодействия, согласно молекулярно-механической теории трения.

Из анализа полученных данных, установлено, что при обработке торца стальной втулки наждачной бумагой P 600, получены наименьшие коэффициенты трения. Так наименьший коэффициент трения 0,1 имел образец (2), далее следовали образцы (1) и (3), с коэффициентом трения 0,25 и 0,3 соответственно, самый худший результат был у образца (4), с коэффициентом трения 0,38.

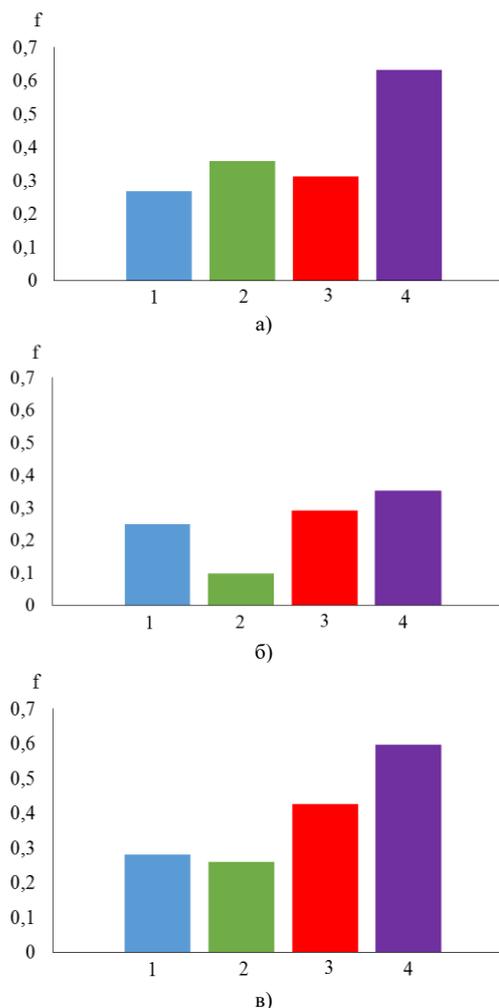


Рис. 1. Графики коэффициентов трения зависимости от шероховатости поверхности стали при обработке на наждачной бумаге P180 (а), P600 (б), P1200 (в), 1 – СВМПЭ, 2 – ВМПЭ, 3 – ПЭТ, 4 – ПОМ

Заключение

Проведенные эксперименты показали, что при снижении шероховатости поверхности стали после обработки наждачной бумагой P600, коэффициент трения уменьшается в 1,5-2 раза, а при дальнейшем снижении шероховатости после обработки на P1200 коэффициенты трения увеличиваются. Наименьшим коэффициентом трения 0,1 обладал образец (2), за ним по возрастающей следовали образцы (1), (3) и (4) с коэффициентами трения 0,25, 0,3 и 0,38 соответственно.

- [1] Dunn A.C. et al. Spatial geometric effects on the friction coefficients of UHMWPE //Wear. – 2008. – Т. 264. – №. 7-8. – С. 648-653.
- [2] Živić F., Babić M., Mitrović S. Friction Coefficient of UHMWPE During Dry Reciprocating Sliding // Tribology in Industry. – 2014. – Т. 36. – №. 3. – С. 281-286.
- [3] Jian L., Zhiguang G., Meng H. et al. Tribological characteristics of UHMWPE composite and relationship with its compressive behavior //Science in China Series G: Physics, Mechanics and Astronomy. – 2004. – Т. 47. – С. 79-87.
- [4] Minn M., Sinha S.K. The frictional behavior of UHMWPE films with different surface energies at low normal loads //Wear. – 2010. – Т. 268. – №. 7-8. – С. 1030-1036.

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОДНОСТОРОННЕГО ДИСКРЕТНОГО КОНТАКТА ДЛЯ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ УПРУГОЙ ПОЛОСЫ

Бобылев А.А.

abobylov@gmail.com

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

Рассмотрены задачи о вдавливании жесткого штампа с регулярным микрорельефом в стратифицированную упругую полосу. 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.

Ключевые слова: односторонний дискретный контакт, стратифицированная упругая полоса.

Введение

Одним из направлений повышения триботехнических характеристик контактирующих деталей машин и механизмов является использование функциональных покрытий. Среди существующих принципов создания покрытий перспективной является концепция многослойной архитектуры покрытий, так как подобные покрытия способны удовлетворять набору зачастую противоречивых требований. Разработан ряд технологий, позволяющих создавать композиции из чередующихся слоев функционально-градиентных материалов [1].

При исследовании локального контактного взаимодействия тел с покрытиями в качестве расчетной схемы, как правило, выбирается упругая полоса или слой, сцепленные с основанием. Учет поверхностного микрорельефа контактирующих тел в виде волнистости или шероховатости приводит к постановке задач дискретного контакта [2-3].

Цели и задачи исследования

Рассматриваются задачи одностороннего дискретного контакта стратифицированной упругой полосы (СУП) и жесткого гладкого штампа конечных размеров, основание которого имеет регулярный микрорельеф (РМР). Задачи этого класса являются нелинейными. В настоящей работе разработан вычислительный алгоритм и проведено

NUMERICAL SOLUTION TO UNILATERAL DISCRETE CONTACT PROBLEMS FOR A STRATIFIED ELASTIC STRIP

Bobylov A.A.

The problems are considered for the indentation of a stratified elastic strip by a rigid punch with a regular microrelief. Boundary variational formulations of the problems are given using the Poincaré-Steklov operator. To approximate this operator the fast Fourier transform algorithms is applied. A variational formulation of a boundary value problem for transforms of displacements is used to calculate a transfer function. Some regularities of contact interaction have been established.

Keywords: unilateral discrete contact, stratified elastic strip.

численное исследование закономерностей контактного взаимодействия для штампов с РМР.

Постановка контактных задач

Пусть невесомая СУП занимает область $\Omega = \{\mathbf{x} = (x_1, x_2) \in \mathbf{R}^2 : |x_1| \leq \infty, 0 \leq x_2 \leq h\}$ и состоит из произвольного числа N изотропных упругих слоев Ω_n , границы раздела которых параллельны оси Ox_1 . Слои пронумерованы как $1, \dots, N$ в порядке возрастания координаты x_2 .

Границу полосы $x_2 = 0$ обозначим Γ_0 , границу раздела слоев Ω_n и Ω_{n+1} – через Γ_n , а границу полосы $x_2 = h$ – через Γ_N . Параметры Ламе материала полосы являются произвольными ограниченными функциями координаты x_2 : $\lambda = \lambda(x_2)$ и $\mu = \mu(x_2)$, имеющими разрывы первого рода на границах Γ_n раздела слоев.

Далее под $u(x)$, $\varepsilon(x)$, $\sigma(x)$ будем понимать соответственно вектор перемещений и тензоры деформаций и напряжений в точке $x \in \Omega$. Полоса находится в условиях плоской деформации. Напряженно-деформированное состояние слоев Ω_n , $n = \overline{1, N}$, описывается системой уравнений:

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

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

По границе Γ_0 полоса жестко соединена с недеформируемым основанием. На границах раздела слоев также задаются условия полного сцепления. В полосу вдавливается гладкий жесткий штамп. Часть границы Γ_N , по которой возможен контакт полосы со штампом, обозначается Γ_p . Положение и предельные размеры Γ_p , т.е. номинальная область контакта, задаются априори, исходя из геометрических соображений. Остальная часть границы Γ_N свободна от внешних нагрузок.

Форма основания штампа с РМР описывается функцией $\Phi(x_1)$, значение которой в точке $x \in \Gamma_p$ 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 полосы. 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 $\delta = (\delta_1, \delta_2)$ и углом поворота φ_3 . Главный вектор $F = (F_1, F_2)$ и главный момент M_3 внешних сил, приложенных к штампу, считаются заданными. В качестве центра приведения выбирается точка $x^c = (x_1^c, x_2^c)$. Рассматривается задача нормального контакта полосы со штампом, поэтому полагаем $F_1 = 0$ и $\delta_1 = 0$.

Контактное взаимодействие штампа с полосой описывается условиями одностороннего гладкого контакта:

$$u_2 \leq \Phi + \delta_2 + \varphi_3(x_1 - x_1^c), \quad \sigma_{22} \leq 0, \quad \sigma_{12} = 0, \\ \sigma_{22} [u_2 - \Phi - \delta_2 - \varphi_3(x_1 - x_1^c)] = 0 \quad \text{на } \Gamma_p. \quad (2)$$

Для замыкания постановки контактной задачи используется условие конечности потенциальной энергии деформации упругой полосы.

Оператор Пуанкаре-Стеклова

Для СУП 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

$$w(x_1) = \int_{\Gamma_p} g(x_1 - \xi_1) q(\xi_1) d\xi_1, \quad (3)$$

где $g(\cdot)$ – функция Грина. Получить представление этой функции в явном виде для произвольной СУП затруднительно. Учитывая, что правая часть (3) является интегральным оператором типа свертки, с помощью интегрального преобразования Фурье

можно получить алгебраическое соотношение для трансформант нормальных перемещений $\tilde{w}(\alpha)$ и нормальных напряжений $\tilde{q}(\alpha)$:

$$\tilde{w}(\alpha) = \tilde{g}(\alpha) \tilde{q}(\alpha), \quad (4)$$

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 [4]. Аппроксимация вариационной задачи производилась методом конечных элементов. Для решения полученной системы линейных алгебраических уравнений разработан вариант алгоритма предобусловленного метода сопряженных градиентов, учитывающий структуру матрицы системы уравнений.

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 [5].

Вариационные формулировки задач

Для построения вариационных формулировок задач одностороннего дискретного контакта введем функциональные пространства – гильбертов триплет $H^{1/2}(\Gamma_p) \subset L_2(\Gamma_p) \subset \tilde{H}^{-1/2}(\Gamma_p)$ [6]. Отношение двойственности $\tilde{H}^{-1/2}(\Gamma_p) \langle \cdot, \cdot \rangle_{H^{1/2}(\Gamma_p)}$, порожденное продолжением скалярного произведения в $L_2(\Gamma_p)$, обозначим через $\langle \cdot, \cdot \rangle$.

Образует 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 [6] можно показать, что искомые нормальные напряжения $q \in V$ удовлетворяют граничному вариационному неравенству

$$a(p - q, q) - b(p - q) \geq 0 \quad \forall p \in V, \quad (5)$$

где $a(p, q) = \langle p, Gq \rangle$ – непрерывная положительно определенная билинейная форма; $b(p) = \langle p, \Phi \rangle$ – непрерывная линейная форма. Вариационное неравенство (5) эквивалентно задаче минимизации граничного функционала: найти $q \in V$ такой, что

$$J(q) = \inf_{p \in V} \left\{ J(p) = \frac{1}{2} a(p, p) - b(p) \right\}. \quad (6)$$

Конечномерная аппроксимация задачи

Выбор метода аппроксимации задачи (6) определяется, в первую очередь, возможностью построения эффективной с вычислительной точки зрения аппроксимации ОПС (3). Из (4) 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. Учитывая, что для произвольной СУП 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. Для уменьшения возникающей при этом ошибки периодичности вводится расширенная вычислительная область $\Gamma_c \subset \Gamma_N$ такая, что $\Gamma_p \in \Gamma_c$, $\text{diam } \Gamma_c = k \text{diam } \Gamma_p$, $k \in \mathbb{N}$, $k > 1$, где k – коэффициент расширения вычислительной области.

Аппроксимация задачи минимизации (6) производится с помощью гранично-элементного подхода. Для решения полученной задачи квадратичного программирования используется вычислительный алгоритм на основе метода сопряженных градиентов [6], учитывающий вид множества ограничений и допускающий случаи внецентренного нагружения штампа.

Численные результаты

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 вдавлении в СУП гладкого жесткого штампа с РМР, состоящим из K микровыступов. Форма основания штампа с РМР описывалась функцией

$$\Phi(x_1) = \Phi_1(x_1) + \Phi_2(\xi_1) / K, \quad (7)$$

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 номинальной области контакта, $\{\cdot\}$ – дробная часть числа. Для

пары функций $\{\Phi_1, \Phi_2\}$ формула (7) 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.

Расчеты выполнялись для семейств штампов с РМР, заданных следующими парами функций:

$$\Phi_1(x_1) = h_1 d \left[H(|2x_1/d - 1| - c_1) \right]^{m_1},$$

$$\Phi_2(\xi_1) = h_2 d \left[H(|2\xi_1 - 1| - c_2) \right]^{m_2},$$

где $h_i \geq 0$, $0 \leq c_i \leq 1$, $m_i \geq 1$ – безразмерные параметры, $i = 1, 2$; $H(\cdot)$ – функция Хевисайда.

Введем на множестве микровыступов сеточную координату $i = \overline{1, K}$ и обозначим через Γ_{pi} часть Γ_p , соответствующую микровыступу с координатой i . Для каждого штампа введем сеточную функцию нормализованных контактных усилий $R = [r_i]$

$$r_i = \frac{K}{|F_2|_{\Gamma_{pi}}} \int pd\xi_1.$$

В результате проведенных расчетов установлено существование для семейства штампов с РМР предельной огибающей нормализованных контактных усилий на микровыступах, форма и положение которых зависят от параметров внешней нагрузки, отношения размера номинальной области контакта к толщине полосы, а также закона изменения упругих свойств по толщине СУП.

Заключение

Разработанный подход к решению плоских задач одностороннего дискретного контакта может быть обобщен на случай пространственных задач для стратифицированного упругого слоя.

- [1] Погребняк А.Д. и др. Структура и свойства нанокompозитных, гибридных и полимерных покрытий. – М.: URSS, 2018. – 344 с.
- [2] Горячева Г.И. Механика трения. – М.: Наука, 2001. – 478 с.
- [3] Goryacheva I., Makhovskaya Yu. Discrete Contact Mechanics with Applications in Tribology. – Amsterdam: Elsevier, 2022. – 209 с.
- [4] Бобылев А.А. Численное построение трансформанты ядра интегрального представления оператора Пуанкаре-Стекклова для упругой полосы // Дифференц. уравнения. – 2023. – Т. 59, № 1. – С. 115-129.
- [5] Бобылев А.А. О вычислении передаточной функции оператора Пуанкаре-Стекклова для функционально-градиентной упругой полосы // Вестник Московского университета. Серия 1. Математика. Механика. – 2023. – №. 5. – С. 52-60.
- [6] Бобылев А.А. Применение метода сопряженных градиентов к решению задач дискретного контакта для упругой полуплоскости // Известия российской академии наук. Механика твердого тела. – 2022. – № 2. – С. 135-153.

ТРИБОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИТИОФОСФАТНЫХ ПРИСАДОК ПО РД 50-531-85

Большаков А.Н., Щербаков Ю.И.

* bolshakov.and@gmail.com

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия.

Проведена оценка трибологических характеристик смазочных композиций на основе дитиофосфатных присадок по РД 50-531-85, рассчитаны их противоизносные параметры. Среди исследуемых присадок наибольшее значение $p_0 = 1250$ МПа было получено для противоизносной присадки ДФ-11, наименьшее $p_0 = 460$ МПа для противоизносной и антифрикционной присадки АДТФ.

Ключевые слова: противоизносные характеристики, диаметр пятна износа, четырехшариковая машина трения, коэффициент трения, дитиофосфатные присадки.

Введение

При разработке новых ресурсосберегающих смазочных масел и смазок, а также функциональных присадок, как правило, на начальном этапе для оценки их трибологических характеристик проводятся испытания на лабораторных установках, осуществляющих трение образцов простой геометрической формы (шаров, плоских брусков, цилиндров) в стандартных условиях.

Одним из хорошо известных стандартных лабораторных методов является метод оценки смазывающих свойств масел и смазок на четырехшариковой машине (ЧШМ) согласно ГОСТ 9490–75 (ASTM D 2783, ASTM D 2596, DIN 51350). Критерием противоизносных свойств по этой методике является показатель износа $D_{и}$, представляющий собой среднюю величину диаметров пятен износа нижних шариков после часового испытания на стандартной ЧШМ. Этот критерий имеет недостаток, связанный с тем, что процесс изнашивания на ЧШМ включает три стадии (приработочную, установившегося изнашивания и безыносную) для которых характерна разная скорость изнашивания.

В 1985 году в ИМАШе научным коллективом был разработан метод оценки противоизносных свойств на стандартной ЧШМ при постоянной нагрузке (РД 50-531-85) в основе которого лежат идеи М.М. Хрущева [1] и работы Л.Ю. Пружанского [2].

TRIBOLOGICAL STUDY OF DITHIOPHOSPHATE ADDITIVES ACCORDING TO A RD 50-531-85 METHOD

Bolshakov A.N., Shcherbakov Y.I.

The tribological characteristics of lubricating compositions based on dithiophosphate additives according to a RD 50-531-85 method were investigated, and their antiwear parameters were calculated. Among the studied additives, the highest value $p_0 = 1250$ MPa was obtained for the anti-wear additive DF-11, the lowest $p_0 = 460$ MPa for the antiwear and antifriction additive ADTF.

Keywords: antiwear characteristics, wear scar diameter, four-ball friction machine, dithiophosphate-based additives.

Особенностью данного метода является получение характеристик процесса изнашивания в виде параметров линейной аппроксимации зависимости интенсивности изнашивания нижних шаров от контактного давления, которая в общем случае может быть описана уравнением:

$$I_h = k(p - p_0), \quad (1)$$

где I_h – интенсивность изнашивания, p – контактное давление, а характеристикой противоизносных свойств смазочного материала являются тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс k и удельное давление p_0 при котором происходит прекращение износа.

Материалы и методы

Большое влияние на трибологические характеристики моторных масел оказывают присадки с содержанием фосфора и серы. Использование этих присадок для улучшения антифрикционных свойств моторных масел является одним из наиболее эффективных способов снижения расхода топлива в двигателях внутреннего сгорания. Поэтому в качестве исследуемых присадок были выбраны широко распространенные противоизносные и антифрикционные присадки, являющиеся производными дитиофосфорных кислот: ДФ-11 и ДФ-11к (диалкилдитиофосфаты цинка); ПАФ-4 (диалкилдитиофосфат молибдена); АДТФ (аминная соль диалкилдитиофосфорной кислоты). В качестве

базового использовалось масло МС-20. Все перечисленные присадки вводились в базовое масло в количестве 1% масс.

Испытания проводили на ЧШМ ИМАШ со стандартными шариками диаметром 12,7 мм из стали ШХ-15 (частота вращения 1500 об/мин, осевая нагрузка 196 Н, продолжительность испытаний – 120 мин).

В соответствии с выбранным шагом дифференцирования, выполнялось измерение диаметров пятен износа на микроскопе со специальным приспособлением, позволяющим производить замер без разборки чаши с тремя нижними шарами. Во время испытаний также измерялись коэффициенты трения, средние значения которых приведены в табл. 1.

Результаты и обсуждение

Результаты эксперимента представлены на рис. 1 в виде зависимостей интенсивности изнашивания I_h от давления p .

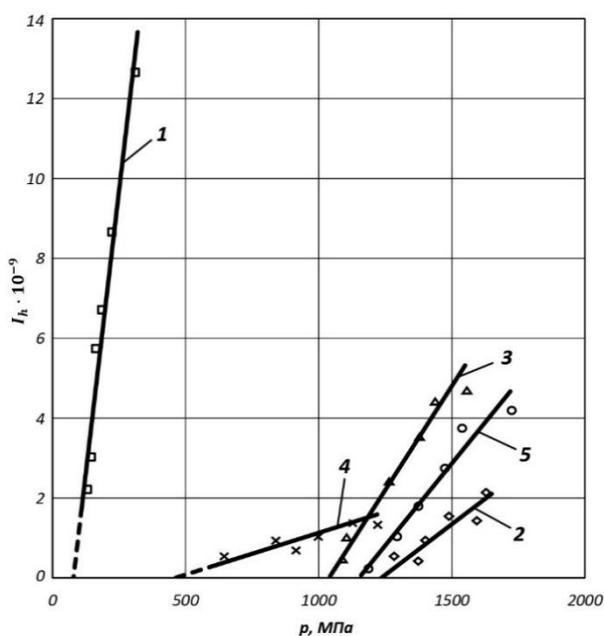


Рис. 1. Зависимости интенсивности изнашивания I_h от давления p в контакте при испытании на ЧШМ смазочных композиций: 1 – МС-20; 2 – МС-20+1%ДФ-11; 3 – МС-20+1%ПАФ-4; 4 – МС-20+1%АДФ; 5 – МС-20+1%ДФ-11к

Табл. 1. Значения коэффициентов трения и противозносные характеристики исследуемых смазочных материалов

	Смазочный материал				
	МС-20	МС-20+1%ДФ-11	МС-20+1%ПАФ-4	МС-20+1%АДФ	МС-20+1%ДФ-11к
p_0 , МПа	79	1235	1038	460	1151
$k \cdot 10^{-9}$	0,0566	0,0051	0,0104	0,0021	0,0082
f	0,054	0,048	0,045	0,051	0,05

Для базового масла имеет место зависимость, которая аппроксимируется прямой с минимальным значением p_0 и максимальным значением k . Введение присадок увеличивает значение p_0 и заметно снижает наклон прямых. Присадки ПАФ-4 и ДФ-11к обладают близкими противозносными характеристиками, но наблюдается заметное различие рельефа поверхностей на фотографиях пятен износа (рис. 2 в, г). Среди исследуемых присадок наибольшее значение $p_0 = 1250$ МПа было получено для противозносной присадки ДФ-11, наименьшее $p_0 = 460$ МПа для противозносной и антифрикционной присадки АДФ, при минимальном темпе изменения износа (минимальные значения k).

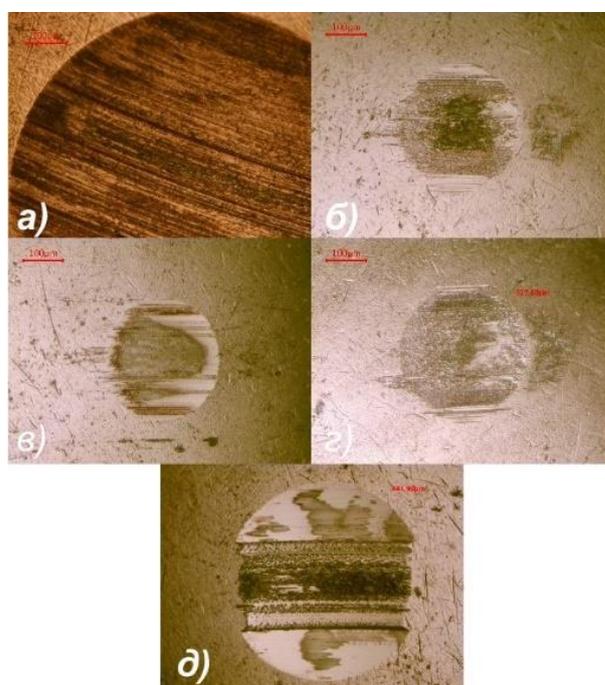


Рис. 2. Фотографии пятен износа нижних шариков после испытаний смазочных композиций на ЧШМ: а – МС-20; б – МС-20+1%ДФ-11; в – МС-20+1%ПАФ-4; г – МС-20+1%ДФ-11к; д – МС-20+1%АДФ

Заключение

На примере исследования растворов дитиофосфатных присадок базовом масле МС-20 показано, что оценка смазочных материалов по методике РД 50-531-85 позволяет за счет дифференциации стадий процесса изнашивания на ЧШМ и на основе значений параметров k и p_0 производить подбор оптимальной смазочной композиции по противозносным свойствам.

[1] Хрушов М.М. Исследования приработки подшипниковых сплавов и цапф. – М.-Л.: АН СССР, 1946. – 146 с.

[2] Пружанский Л.Ю. Исследование методов испытания на изнашивание. – М.: Наука, 1978. – 112 с.

ТВЁРДОСМАЗОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ

Броновец М.А. *, Буковский П.О.

* brnovets@ipmnet.ru

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

Развитие космической техники и решение новых задач в освоении космического пространства делают крайне необходимыми исследования возможности использования твёрдосмазочных покрытий в подшипниках качения. Настоящая работа посвящена достижению этой цели. Были измерены коэффициенты трения и износостойкость ряда новых твёрдосмазочных покрытий на реальных упорных подшипниках на американском трибометре MF-5000 (Rtec) при скорости 2,25 м/с. Показана возможность их использования в подшипниках качения, в частности, в изделиях робототехнической техники.

Ключевые слова: космическая техника, твёрдосмазочные покрытия, подшипники качения, коэффициенты трения, износостойкость.

Введение

До настоящего времени в машиностроении и приборостроении наибольшее распространение для смазки подшипников качения получили органические смазочные композиции – литиевые пластичные высокотемпературные смазки (ТУ 0254 029-45540231-2006), смазочная композиция ВНИИНП-274Н, смазки «Север» и другие пластичные смазки. Смазка ВНИИНП-274Н, имеющая высокую стойкость к низким температурам, рекомендована к применению на внешней стороне МКС.

Вместе с тем, резкое повышение её вязкости со снижением температур до минус 90 °С ограничивает возможности её использования в диапазоне температур внешней стороны МКС. То же самое касается и других пластичных смазочных композиций.

Поэтому возникает острая необходимость применения для подшипников качения твёрдосмазочных покрытий, которые сохраняют свои трибологические свойства при температурах до минус 125 °С.

В практике создания узлов трения космических изделий для пар скольжения нашли применение твёрдосмазочные композиции ЭПАН [1], ЭОНИТ [2] и другие покрытия. Они хорошо себя показали в парах скольжения. Однако опыта их применения в подшипниках качения пока нет.

SOLID LUBRICANT COATINGS FOR ROLLING BEARINGS

Bronovets M.A., Bukovsky P.O.

The development of space technology and the solution of new problems in space exploration make it extremely necessary to study the possibility of using solid lubricant coatings in rolling bearings. This work is dedicated to achieving this goal. The friction coefficients and wear resistance of a number of new solid lubricant coatings were measured on real thrust bearings using an American tribometer MF-5000 (Rtec, USA). at speeds up to 2.25 m/s. The possibility of their use in rolling bearings, in particular, in robotic technology products, is shown.

Keywords: space technology, solid lubricant coatings, rolling bearings, friction coefficients, wear resistance.

Материалы и методы

В ходе исследований были использованы образцы различной формы, на которые было нанесено твёрдосмазочное покрытие двух марок: Modengy 1071 и Modengy 1006. Для нанесения покрытий использовались следующие составы суспензий: Modengy 1071: полиамид-имидный пленкообразователь, политетрафторэтилен, дисульфид молибдена, смесь органических растворителей и функциональные добавки; Modengy 1006: полиамид-имидный пленкообразователь, дисульфид молибдена, графит, смесь органических растворителей и функциональные добавки. Покрытия были нанесены на стальные подложки, представляющие собой диск из закалённой нержавеющей подшипниковой стали диаметром 55 мм и высотой 10 мм (рис. 1а), а также на кольца упорных подшипников двух различных размеров (рис. 1б).

В качестве контртел использовались стальные диски и ответные части упорных подшипников. Для создания качения применялись наборы стальных шариков в сборе (рис. 2). При испытаниях в паре с малым кольцом использовались шарики диаметром 5,953 мм в количестве 18 штук, а для большего подшипника – шарики диаметром 9,525 мм в количестве 14 штук.

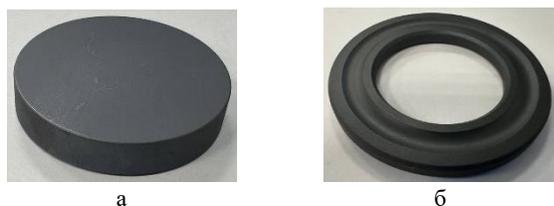


Рис. 1. Фотографии покрытия, нанесённого на стальной диск (а) и стальное кольцо упорного подшипника (б)



Рис. 2. Фотография стальных шариков в сепараторе подшипника

Трибологические исследования проводились на лабораторном трибометре MF-5000 (Rtec, США) (рис. 3) при постоянной скорости вращения $V = 2,25$ м/с (1000 и 800 оборотов в минуту для малого и большого кольца соответственно), а также постоянной нагрузке $F = 1000$ Н. Экспериментальное исследование проводилось в комнатных условиях $T = 23$ °С, относительной влажности 50%. Время испытаний было равно 1ч.



Рис. 3. Фотография лабораторного трибометра MFT-5000

Нижнее кольцо закреплялось на неподвижный предметный столик при помощи трех кулачкового держателя. На нижнее кольцо от подшипника помещались стальные шарики в сепараторе. Верхний образец крепился на специальный самоустанавливающийся держатель, который совершал вращательные движения по часовой

стрелке с заданным количеством оборотов в минуту. Нагрузку на контактную пару передавалось при помощи винтовой передачи через держатель, на котором закреплен верхний образец.

Экспериментальное исследование проводилось в семи возможных вариациях:

1. Между двумя стальными образцами без покрытий – сверху расположен стальной диск, а снизу – малое кольцо упорного подшипника.

2. В присутствии пластичной смазки ВНИИ НП 274Н.

3. При наличии в зоне контакта литиевой пластичной высокотемпературной смазки.

4. Верхний стальной диск с покрытием, а нижнее малое кольцо – нет.

5. Верхний стальной диск не имеет покрытия, а нижнее малое кольцо – с покрытием.

6. Между двумя стальными образцами с покрытием – сверху диск, снизу кольцо подшипника.

7. Между двумя кольцами упорного подшипника, оба с покрытием.

Результаты и обсуждение

На рис. 4 приведен график зависимости радиального момента (сопротивления качению) от времени испытаний, где различными цветами и цифрами обозначены вариации экспериментов.

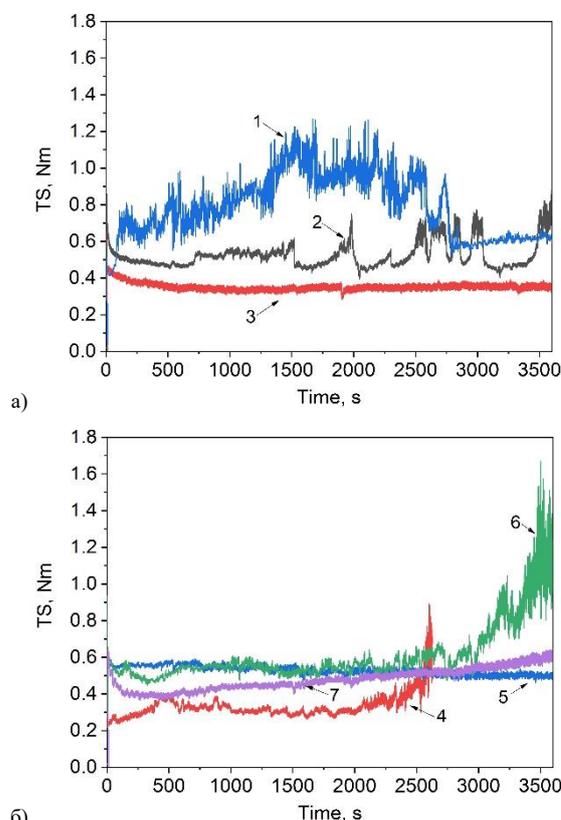


Рис. 4. Зависимость сопротивления качению от времени испытания, где цифрами обозначены соответственно вариации экспериментов

На рис. 5 приведены профили изношенных поверхностей для образцов в виде дисков.

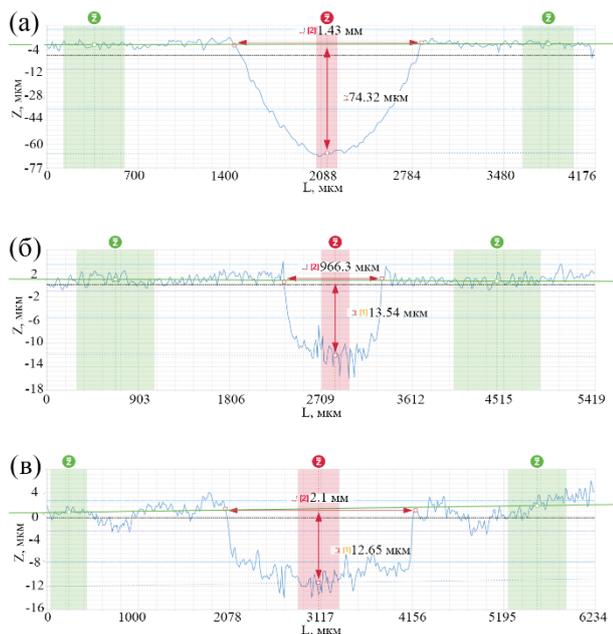


Рис. 5. Профили изношенных поверхностей после испытаний по 1 схеме (а), по 2-й схеме (б) и по 4 схеме (в)

Для данных образцов были посчитаны скорости изнашивания по следующим формулам:

$$I_r (\text{мм}^3 / \text{Н} \cdot \text{м}) = \frac{V}{F \times L}, \quad (1)$$

$$I (\text{мм}^3 / \text{м}) = \frac{V}{L}, \quad (2)$$

где V – объем износа, мм^3 ; F – нагрузка, Н; L – путь трения, м.

Скорость изнашивания для исследуемых образцов рассчитанных по формуле (1) равны: (а) $I_a = 1,17 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/\text{Нм}$; (б) $I_b = 2,3 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/\text{Нм}$; (в) $I_v = 4,68 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/\text{Нм}$, а по формуле (2): (а) $I_a = 1,17 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/\text{м}$; (б) $I_b = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/\text{м}$; (в) $I_v = 4,68 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^3/\text{м}$.

Полученные данные скорости изнашивания сопоставимы со значениями интенсивностей изнашивания, полученные в условиях трения скольжения твердосмазочного покрытия ЭОНИТ и ЭПАН [2].

Заключение

Проведенные испытания твёрдосмазочных покрытий Modengy 1071 и 1006 показали возможность их использования в подшипниках качения в узлах трения машин и приборов, работающих в условиях параметров наземной окружающей среды. Полученные данные сопротивления качению для твердосмазочных покрытий не превышают значения, зафиксированные при трении качения со смазкой ВНИИ НП 274Н.

Интенсивность изнашивания данных покрытий также остается на уровне, характерном для режимов скольжения твердосмазочных покрытий ЭОНИТ, ЭПАН, широко апробированных для узлов трения космических изделий.

Возможность применения покрытий Modengy 1071 и 1006 в подшипниках качения космического применения дополнительно требует испытаний в условиях вакуума.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (номер проекта 22-49-02010).

[1] Бронец М.А. Покрытия триботехнического назначения для открытого космоса // Трение и износ. – 2023. – Т.44. – №6. – С. 544-550.

[2] Бронец М.А. Триботехнические характеристики твёрдых смазочных покрытий // Трение и износ. – 2023. – Т. 44. – №4. – С. 335-342.

СРАВНЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ В ЭЛЕКТРОЛИТАХ РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА

¹Быкова А.Д.*, ¹Марков М.А., ²Кравченко И.Н., ³Кузнецов Ю.А.

* bykova.ad@gmail.com

¹НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург, Россия;

²Институт машиноведения имени А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия;

³Орловский государственный аграрный университет имени Н.В. Парахина, Орёл, Россия.

Проведены исследования структурных и триботехнических свойств керамических покрытий, сформированных методом микродугового оксидирования (МДО) в катодно-анодном режиме в силикатно-щелочных, боратных и фосфатно-щелочных электролитах из экспериментальной выборки составов. Наилучшие прочностные свойства демонстрируют покрытия, сформированные в боратном электролите, что позволяет повысить износостойкость незащищенной алюминиевой поверхности в 2,1–3,2 раза. Полученные результаты показывают перспективность использования керамических МДО-покрытий на предприятиях технического сервиса, осуществляющих ремонт и восстановление изношенных алюминиевых деталей трибологических узлов техники и оборудования.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, керамические покрытия, износостойкость, оксид алюминия, трибосопряжения.

Введение

Известно, что изнашивание рабочих поверхностей узлов трения приводит к нарушению эксплуатационных свойств машин и механизмов, а также является одной из основных причин наступления критического состояния узлов трения [1–4]. В настоящее время для продления срока службы трибосопряжений наряду с разработкой новых материалов широко применяются различные способы модификации поверхностей, например, механическое упрочнение, химико-термическая обработка, закалка лазерным воздействием и токами высокой частоты, а также используются различные методы нанесения покрытий [5–8].

Одним из решений проблемы изнашивания деталей машин является создание износостойких покрытий на поверхности деталей, в частности, с использованием метода микродугового оксидирования (МДО), который позволяет формировать защитные керамические покрытия, обладающие комплексом уникальных свойств –

COMPARISON OF WEAR RESISTANCE OF CERAMIC OXIDE COATINGS OBTAINED IN ELECTROLYTES OF DIFFERENT COMPOSITIONS

Bykova A.D., Markov M.A., Kravchenko I.N., Kuznetsov Yu.A.

The structural and tribological properties of ceramic coatings formed by the microarc oxidation (MAO) method in the cathode-anodic mode in silicate-alkaline, borate and phosphate-alkaline electrolytes from the experimental sample of compositions were studied. The best strength properties are demonstrated by coatings formed in a borate electrolyte, which allows increasing the wear resistance of an unprotected aluminum surface by 2.1–3.1 times. The obtained results show the potential of using ceramic MAO coatings at technical service enterprises that carry out repair and restoration of worn aluminum parts of tribological units of machinery and equipment.

Keywords: microarc oxidation, ceramic coatings, wear resistance, aluminum oxide, tribocoupling.

высокой твердостью, износостойкостью и коррозионной стойкостью [9–14]. Состав электролитов для МДО является одним из важнейших факторов этого процесса, влияющим на состав, структуру и свойства покрытий [15, 16]. Выбор электролита зависит от требуемых свойств покрытия и металла подложки. В настоящее время актуальны исследования, направленные на разработку новых электролитов и совершенствование существующих.

В работе представлены результаты исследований влияния составов электролитов с различным типом и содержанием пассиватора на структуру и трибологические свойства защитных керамических МДО-покрытий.

Материалы и методы

Формирование МДО-покрытий проводилось в следующих электролитах:

– составы 1–3: силикатно-щелочной (КОН – 2 г/л, Na₂SiO₃ – 5 г/л; КОН – 2 г/л, Na₂SiO₃ – 10 г/л; КОН – 2 г/л, Na₂SiO₃ – 15 г/л);

– составы 4–6: боратный (KOH – 5 г/л, H₃BO₃ – 20 г/л; KOH – 5 г/л, H₃BO₃ – 25 г/л; KOH – 5 г/л, H₃BO₃ – 30 г/л);

– составы 7–9: фосфатный (KOH – 2 г/л, Na₃PO₄ – 5 г/л; KOH – 2 г/л, Na₃PO₄ – 10 г/л; без активатора, Na₃PO₄ – 5 г/л).

Технологический режим МДО: продолжительность оксидирования – 180 мин, плотность тока – 10 А/дм², катодный/анодный импульс – 0,5 с.

Сравнительную износостойкость поверхностей образцов с покрытиями определяли на машине трения типа МТУ-01, схема трения «кольцо-палец». В процессе испытания определялось изменение веса испытуемых образцов на аналитических весах с погрешностью ±0,0002 г. Нижний образец – алюминиевое кольцо из сплава АМГ с МДО-покрытием, верхние образцы – сталь марки 18ХГТ. Площадь контакта составила 1,5 см². Эталонном сравнения являлась пара трения: нижний образец из алюминиевого сплава без покрытия и верхние образцы из стали 18ХГТ. Частота вращения при работе трущейся пары составляла 580 мин⁻¹. Продолжительность испытаний – 120 мин, нагрузка – 60 кг. Перед испытаниями образцы с МДО-покрытиями и стальные образцы шлифовались до R_a = 0,35–0,40 мкм.

Для исследования структурных характеристик керамические покрытия методом МДО формировались на пластинах размером 2x10x50 мм из алюминиевого сплава АМГ. Морфологию покрытий исследовали методами сканирующей электронной микроскопии и микрорентгено-спектрального анализа на исследовательском комплексе TTSCAN Vega. Фазовый состав покрытий определяли на рентгеновском дифрактометре D8 Advance фирмы Bruker (Германия) с использованием Cu Kα-излучения в гониометрии Брегга-Брентано, открытую пористость покрытий – на оптическом микроскопе Axio Observer Alm (Carl Zeiss) в сертифицированной программе AxioVision Rel. 4.8.

Результаты и обсуждение

Поскольку физико-механические и трибо-технические свойства покрытий имеют прямую связь с их структурным состоянием, исследован фазовый состав покрытий (табл. 1). При применении силикатно-щелочного электролита в формируемом покрытии основной фазой является муллит. На поверхности образцов наблюдается рыхлый слой аморфной фазы SiO₂. Осаждение аморфного SiO₂ и активное внедрение в покрытие силикат-ионов можно связать с термическим разложением золя метакремниевой кислоты, образующегося на аноде

при микродуговом оксидировании. Наличие α-Al₂O₃ в составе композиционного покрытия является упрочняющим фактором. В фосфатном электролите преобладает процесс фазообразования полифосфатов в составе формируемого покрытия. В боратном электролите формируется переходная фаза γ-Al₂O₃, при прогреве покрытия происходит ее частичное превращение в α-Al₂O₃.

Табл. 1. Фазовый состав МДО-покрытий в различных электролитах

Состав электролита по пассиватору	Характерный фазовый состав поверхности
Силикатно-щелочной электролит, Na ₂ SiO ₃ – 10 г/л	Al ₆ Si ₂ O ₁₃ ; α-Al ₂ O ₃
Боратный электролит, H ₃ BO ₃ – 25 г/л	Al; α-Al ₂ O ₃ ; γ-Al ₂ O ₃
Фосфатный электролит, Na ₃ PO ₄ – 10 г/л	Al; α-Al ₂ O ₃ ; γ-Al ₂ O ₃ ; Na ₂ H ₂ P ₂ O ₇

Исследована структура поверхности МДО покрытий (рис. 1) и установлено, что наименьшая открытая пористость покрытий достигается при использовании боратного электролита (3–5%), тогда как открытая пористость после силикатно-щелочного и фосфатного электролитов составляет 5–7% и 8–10%.

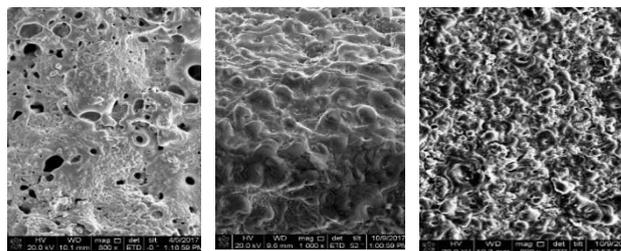


Рис. 1. Характерная структура МДО-покрытий после проведения МДО:

- а – силикатно-щелочной электролит (Na₂SiO₃ – 10 г/л);
- б – боратный электролит (H₃BO₃ – 25 г/л);
- в – фосфатный электролит (Na₃PO₄ – 10 г/л)

Результаты трибологических испытаний покрытий представлены в табл. 2. Для оценки повышения износостойкости аналогичные испытания были проведены на алюминиевых образцах без упрочнения (скорость изнашивания алюминиевого диска без покрытия – 0,032 г/ч).

Наилучшие триботехнические свойства демонстрируют покрытия, сформированные в боратном электролите, что объясняется образованием большого содержания твердой фазы корунда в сочетании с минимальной открытой пористостью. Покрытия, полученные в силикатно-щелочных электролитах, позволяют упрочнить алюминиевую поверхность в 1,5–2,0 раза, при этом наилучшие результаты получены в электролитах с минимальным содержанием пассиватора.

Табл. 2. Трибологические испытания МДО-покрытий

№	Компонент электролита	Концентрация, г/л	Скорость изнашивания диска с МДО-покрытием, г/ч	Скорость изнашивания пары трения (с МДО), г/ч	Увеличение износостойкости упрочненного диска в сравнении с неупрочненным диском, крат
1	Na ₂ SiO ₃	5	0,017	0,039	2,0
2		10	0,020	0,047	1,7
3		15	0,023	0,054	1,5
4	H ₃ BO ₃	20	0,011	0,025	3,1
5		20	0,012	0,028	2,8
6		30	0,016	0,036	2,1
7	Na ₃ PO ₄	5	0,025	0,047	1,4
8		10	0,029	0,061	1,2
9		5 (б/а)	0,031	0,049	1,1

В фосфатных электролитах изменение концентрации пассиватора приводит к нарушению стабильности МДО-процесса, в результате чего покрытия демонстрируют наименьший уровень износостойкости.

Заключение

На основании исследования структурных и триботехнических свойств керамических покрытий, сформированных методом МДО в силикатно-щелочных, боратных и фосфатных электролитах, выявлено следующее:

1. Наилучшие структурные характеристики (основная фаза – корунд, открытая пористость ~3 %) и износостойкость демонстрируют покрытия, сформированные в боратном электролите состава КОН – 5 г/л, H₃BO₃ – 20 г/л, упрочняющие алюминиевую поверхность в 3 раза.

2. В силикатно-щелочных электролитах происходит внедрение компонентов электролита в покрытие, что приводит к формированию покрытий толщиной более 100 мкм с рельефной структурой, при этом увеличение содержания Na₂SiO₃ приводит к ухудшению прочностных свойств покрытий. Установлено, что происходит упрочнение алюминиевой поверхности в 1,3–1,9 раза.

3. В фосфатных электролитах МДО протекает нестабильно, что приводит к получению покрытий с меньшей износостойкостью. Определено упрочнение алюминиевой поверхности в 1,1–1,5 раза.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (номер проекта № 21-73-30019).

- [1] Виноградов В.Н., Сорокин Г.М. Механическое изнашивание сталей и сплавов. – М.: «Недра», 1996. – 364 с.
- [2] Трение и смазка твердых тел / Ф.П. Боуден, Д. Тейбор; Пер. с англ. Н.М. Михина и А.А. Силина; под ред. И.В. Крагельского. – М.: Машиностроение, 1968. – 543 с.
- [3] Сорокин Г.М., Малышев В.Н. Основы механического изнашивания сталей и сплавов. – М.: Логос, 2014. – 308 с.
- [4] Трение и изнашивание узлов машин и механизмов / В.И. Колесников, П.Г. Иваночкин, А.В. Челохьян, Е.А. Луговой; Ростовский государственный университет путей сообщения. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2000. – 24 с.
- [5] Бородавко В.И. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей. – Минск: Беларуская наука, 2013. – 463 с.
- [6] Упрочнение поверхностей деталей машин комбинированными способами / А.Г. Бойцов, В.Н. Машков, В.Н. Смоленцев, Л.А. Хворостухин. – М.: Машиностроение, 1991. – 144 с.
- [7] Основы триботехники и упрочнения поверхностей деталей машин / В.М. Сорокин, А.С. Курников, каф. технологии конструкционных материалов и машиноремонта. – Нижний Новгород: ВГАВТ, 2006. – 120 с.
- [8] Holmberg K., Matthews A. Coatings tribology: properties, mechanisms, techniques and applications in surface engineering, Second Edition, № 56, B. Briscoe, Ed., Elsevier Science: Tribology and Interface Engineering Series, 2009. – 576 с.
- [9] Микродуговое оксидирование / А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин, И.В. Суминов [и др.]. – М.: Московский государственный технологический университет «Станкин», 2020. – 94 с.
- [10] Каракозов Э.С., Чавдаров А.В., Барыкин Н.В. Микродуговое оксидирование – перспективный процесс получения керамических покрытий // Сварочное производство. – 1993. – Т. 6. – С. 4–7.
- [11] Chernyshov N.S., Kuznetsov Yu.A., Markov M.A., Krasikov A.V., Bykova A.D. Corrosion tests of oxide-ceramic coatings formed by microarc oxidation // Refractories and Industrial Ceramics. – 2020. – Т. 61. – № 2. – С. 220-223. DOI: 10.1007/s11148-020-00460-w
- [12] Markov M.A., Kashtanov A.D., Krasikov A.V. et al. Corrosion-resistant ceramic coatings that are promising for use in liquid metal environments // Key Engineering Materials, Switzerland. – 2019. – Т. 822. – С. 752-759. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.822.752
- [13] Kuznetsov Yu.A., Kravchenko I.N., Gerashchenkov D.A. et al. The use of cold spraying and micro-arc oxidation techniques for the repairing and wear resistance improvement of motor electric bearing shields // Energies. – 2022. – Т. 15. – № 3. – С. 912. DOI: 10.3390/en15030912
- [14] Bykova A.D., Markov M.A., Krasikov A.V., Belyakov A.N., Makarov A.M. Study of the formation of functional ceramic coatings on metals // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Т. 1400. – С. 055008. DOI: 10.1088/1742-6596/1400/5/055008
- [15] Микродуговое оксидирование вентильных металлов: лабораторный практикум / М.М. Криштал, П.В. Ивашин, А.В. Полушин [и др.]. – Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2016. – 60 с.
- [16] Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В. и др. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов. Т. 2. – М.: Техносфера, 2011. – 512 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАСТИЧНОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА РАЗЛИЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

Ващишина А.П.*, Шалыгин М.Г., Ващишин С.П.

* vashhi.anya@yandex.ru

ФГБОУ ВО Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия.

В статье рассматриваются реологические свойства пластичного смазочного материала. Описаны экспериментальные установки и методы исследования. Результаты показали зависимости от концентраций загустителя, присадок и базового масла.

Ключевые слова: пластичный смазочный материал, трение, вязкость.

Введение

Механическое поведение смазки на поверхности связано с реологическими характеристиками, а именно, пластическим сдвигом и пределом текучести. Пластичные смазочные материалы могут использоваться в широком диапазоне температур, поскольку они не кристаллизуются при низкой температуре и обладают хорошей несущей способностью при высоких температурах. Физические свойства пластичных смазочных материалов сочетают в себе свойства масел и твердых смазок, что достигается правильного соотношения ингредиентов и от концентрации загустителя и присадок. При определенных условиях эксплуатации смазка будет находиться в твердой форме и не стекать с вертикальной поверхности, однако, при достижении критических значений (за пределами текучести) она будет приобретать свойства масла. Если нагрузку убрать, смазка перестанет течь и вернется в твердое состояние.

Материалы и методы

Для оценки влияния смазочного материала с добавками на эксплуатационные характеристики трибосистемы были применены следующие методы исследования: термостойкость, анализ химического состава, измерение динамической вязкости, рентгено-структурный анализ, инфракрасная спектроскопия, а также определение качественного и количественного состава материала гребня колеса локомотива и его динамических характеристик. В качестве исследуемого объекта использовался смазочный материал "Пума", разработанный для оптимизации работы гребней локомотивов. Испытания

STUDY OF PHYSICOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF PLASTIC LUBRICANT OF VARIOUS CONCENTRATIONS

Vaschishina A.P., Shalygin M.G., Vaschishin S.P.

The article examines the rheological properties of plastic lubricants. Experimental setups and research methods are described. The results showed dependencies on the concentrations of thickener, additives and base oil.

Keywords: plastic lubricant, friction, viscosity.

проводились по единой методике, с варьированием концентрации присадок в пределах от 0,1% до 5%, что выходило за рамки специфицированных норм. Теоретической базой исследования послужили положения теории граничного трения, водородного и механического изнашивания, корреляционных исследований, адгезии и радикалов.

Ключевыми параметрами для анализа были: износ рабочих поверхностей (гребня и общий износ), масса изношенных частиц, интенсивность выделения водорода, графики зависимости износа от пути трения, динамическая вязкость смазочного материала с добавками и ее зависимость от температуры, коэффициент трения, а также площадь контакта поверхностей. Испытания проводились на современном оборудовании, включая спектрометры для анализа материалов, вискозиметры для измерения вязкости, машины трения для анализа износа, а также специализированное программное обеспечение для обработки данных [1].

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведено значение скорости изнашивания образцов с различными присадками. Результаты исследования показали, что добавление сульфосодержащих компонентов к смазочному материалу Пума снижает скорость изнашивания на 7%, использование производных гидрохинона уменьшает износ на 13%, а фосфорорганические присадки – на 2%. Интенсивность изнашивания уменьшилась на 14% при применении гидрохинона и на 13% при использовании сульфосодержащих добавок. Износостойкость материала пары трения с добавленными присадками варьировалась в диапазоне от 0,5 до 0,59.

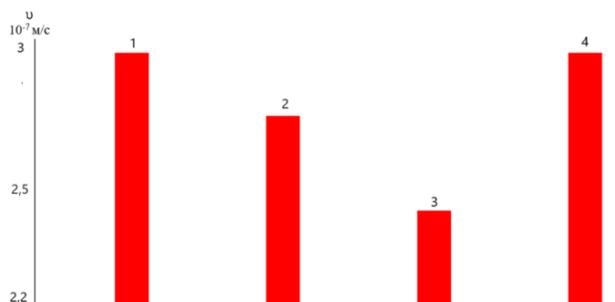


Рис. 1. Значение скорости изнашивания (1 – без присадки; 2 – гидрохинон; 3 – сульфоприсадка; 4 – фосфорорганическая присадка)

Наибольшее количество водорода выделяется при использовании смазочного материала Пума и составляет 67 ppm. При добавлении присадок количество выделяющегося водорода значительно уменьшается, 32, 15 и 8 ppm с использованием сульфоприсадки, производного гидрохинона и фосфорорганического соединения соответственно.

Данные исследования показывают, что перспективной присадкой для уменьшения выделения водорода, а, следовательно, и уменьшения водородного изнашивания, является фосфорорганическое соединение (рис. 2).

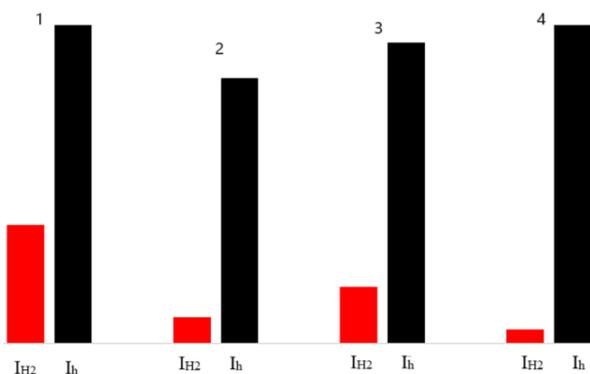


Рис. 2. Сопоставление интенсивности изнашивания материала и интенсивности выделения диффузионно-активного водорода в анализируемой системе:

1 – без присадки; 2 – гидрохинон; 3 – сульфоприсадка; 4 – фосфорорганическая присадка

Так, на рис. 3 показаны значения кинематической вязкости с присадками. Было установлено, что при увеличении концентрации сульфоприсадки (1) значительно увеличивается вязкость, что связано с сильным межмолекулярным взаимодействием (водородные связи, диполь-дипольные взаимодействия, что увеличивает сопротивление движению молекул), сульфоновые группы могут также способствовать образованию структурных сетей или ассоциатов между молекулами. Сульфоновые группы показывают высокую совместимость с полимерами и имеют большое количество реакционноспособных центров, которые позволяют

модифицировать его для создания новых, более устойчивых и функциональных материалов.

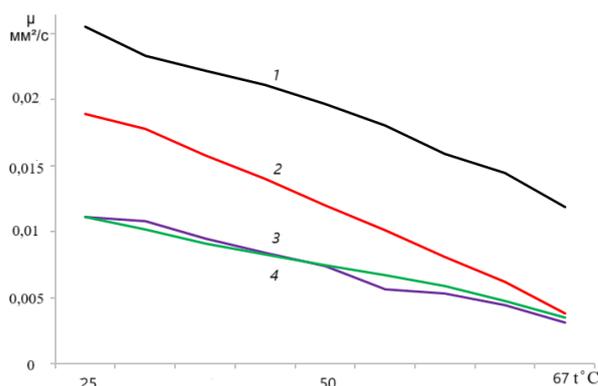


Рис. 3. Значения кинематической вязкости пластичного смазочного материала при нагревании: 1 – сульфоприсадка; 2 – фосфорорганическая присадка; 3 – гидрохинон; 4 – без присадки

Зависимость коэффициента трения от температуры носит неравномерный характер, что может быть обусловлено изменением химических свойств в процессе проведения испытаний. Как видно из рисунка, соединения смазочного материала Пума с фосфорорганической присадкой и гидрохинона колеблются и при температуре плавления смазочного материала. Значение коэффициента трения для сульфо присадки (4) показывает стабильное значение 0,08 в диапазоне рабочей температуры пластичной смазки, что является важным показателем для смазочных систем, работающих в нагруженных узлах трения. Гидрохинон выступает как поглотитель радикалов и препятствует трибодеструкции смазки, сохраняя ее прежний состав базового масла. Необходимо отметить, что смазочные материалы являются высокоструктурированными системами, концентрация загустителя и присадок отвечает за вязкостные характеристики, а поведение вязкого течения смазки при высоких скоростях сдвига контролируется базовым маслом.

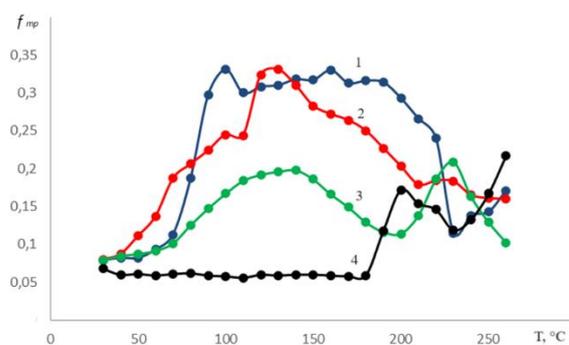


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от температуры проводимых испытаний: 1 – без присадки; 2 – фосфорорганическая присадка; 3 – гидрохинон; 4 – сульфоприсадка

Заклучение

Смазочный материал является неньютоновской жидкостью, которая показывает разжижение при сдвиге и обладает пределом текучести. Данные результаты подтверждаются зависимостью коэффициента трения от вязкости смазочного материала. Значение кинематической вязкости показало наибольшее значение при использовании сульфорганической присадки, что связано с сильным межмолекулярным взаимодействием.

Наиболее предпочтительным соотношением для добавления загустителя и присадок является 5% и 0,1-0,5 % соответственно. При значениях ниже или выше смазочный материал не выполняет свои функции, так как не обеспечивается кристаллизация загустителя не остается в базовом масле.

[1] Shalygin M.G., Buyanovsky I.A., Samusenko V.D., Vashchishina A.P. Tribological properties of a semi-liquid lubricant with surfactant additives. // Journal of Friction and Wear. – 2023. – Т. 44. – № 5. – С. 279-285.

ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Ветрова С.М.*, Барчукова А.С., Бубнова С.О.

* s.vetrova@rgau-msha.ru

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия.

В данной статье рассматриваются основные параметры, оказывающие влияние на износ рабочих органов сельскохозяйственных машин. Также рассмотрены способы повышения износостойкости.

Ключевые слова: почва, сталь, рабочие органы, изнашивание, долговечность, обработка.

WEAR RESISTANCE OF THE WORKING BODIES OF AGRICULTURAL MACHINES UNDER OPERATING CONDITIONS

Vetrova S.M., Barchukova A.S., Bubnova S.O.

This article discusses the main parameters that affect the wear of the working bodies of agricultural machines. Ways to increase wear resistance are also considered.

Keywords: soil, steel, working bodies, wear, durability, processing.

Введение

Износостойкость как общая характеристика сопротивления изнашиванию является одним из основных факторов, определяющих в конечном итоге экономическую эффективность использования машины [1].

Почва является основным средством производства в сельском хозяйстве. Для обеспечения благоприятных условий для роста и развития сельскохозяйственных культур осуществляются различные виды механической обработки, такие как вспашка, глубокое рыхление, культивация, фрезерование, боронование и прикатывание.

Качество обработки почвы, энергетические затраты и общие расходы на её обработку в значительной степени зависят от конструктивных характеристик и состояния рабочих органов почвообрабатывающих машин. Поскольку

почвенная среда обладает абразивными свойствами, рабочие органы подвержены интенсивному износу, что приводит к изменению их формы и размеров. В результате возникает необходимость частой замены или ремонта этих элементов, чтобы обеспечить выполнение агротехнических требований при обработке почвы [2].

Многочисленные испытания серийных деталей отечественных плужных корпусов показывают, что средняя наработка на отказ лемехов П-702 (ПНЧС) в зависимости от видов почв и их физического состояния колеблется от 5 до 20 га, грудей отвалов от 10 до 100 га, крыльев отвалов от 40 до 270 га, полевых грудей отвалов, полевых досок от 20 до 60 га. Ограниченный ресурс имеют рабочие органы и других почвообрабатывающих машин: диски луцильников и дисковых борон 8...20 га, лапы культиваторов 7...18 га.

Интенсивность износа наиболее заметно проявляется на лемехе плужного корпуса. На песчаных почвах с высоким содержанием каменных включений износ лемеха по массе составляет 260...450 г/га. При обработке песчаных и супесчаных почв, без каменных включений интенсивность изнашивания лемехов варьируется 100...260 г/га. Скорость износа лемехов на глинистых почвах в 6-7 раз ниже по сравнению с песчаными и супесчаными [3].

Характер и интенсивность износа деталей рабочих органов плуга зависит не только от износостойкости материала, но и от физико-механических свойств почвы и нагрузки, действующей на рабочую поверхность.

В работе [4] изучается зависимость интенсивности износа образца от содержания песка в почве и давления абразива, что иллюстрировано на рис. 1.

Изнашивающая способность песка (при отсутствии песка) превышает изнашивающую способность смеси, состоящую из: 80 % песка и 20 % глины – примерно в 2,0 раза; 70 % песка и 30 % глины – примерно в 2,5 раза; 50 % песка и 50 % глины – примерно в 5,0 раз.

Интенсивность изнашивания образцов в одной и той же смеси, но при различных давлениях абразива будет различной. Это свидетельствует о том, что изнашивающая способность абразива изменяется пропорционально изменению давления.

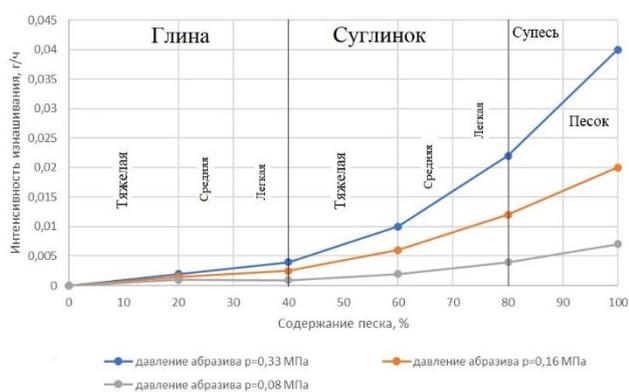


Рис. 1. Зависимость интенсивности износа образца из стали 45 от содержания песка в почве [3]

Если принять изнашивающую способность за 1, то относительная изнашивающая способность натуральных почв с различным фракционным составом будет соответствовать изнашивающей способности смесей.

Значения относительной изнашивающей способности смесей песка и глины по фракционному составу приведен на рис. 2.

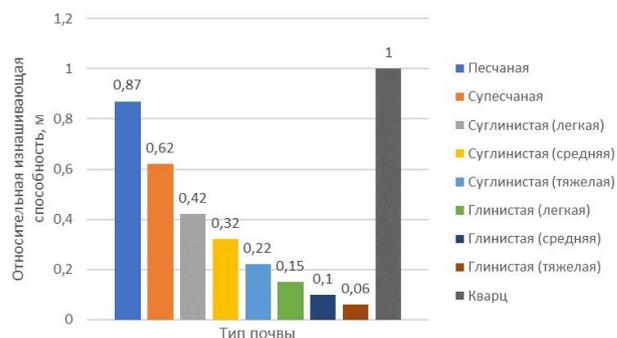


Рис. 2. Относительная изнашивающая способность по фракционному составу (эталон-кварц, давление – 0,1 МПа) [3]

Повышение износостойкости достигается различными способами, направленными либо на снижение скорости изнашивания, либо на снижение вредных последствий износа деталей.

Одним из основных методов, позволяющих повысить износостойкость, является термомеханическая обработка. Термомеханическая обработка включает термическую и механическую обработку стали, что приводит к изменению ее микроструктуры, увеличению прочностных характеристик и, как следствие, улучшению износостойкости металлов [5,6].

Другим подходом является легирование сталей с использованием элементов, таких как хром, никель или бор. Добавление этих легирующих элементов позволяет существенно повысить твердость и стойкость к абразивному износу, что особенно важно в условиях, когда материалы подвергаются агрессивному воздействию абразивных частиц. Например, хромосодержащие стали находят широкое применение благодаря своей способности сохранять прочность и твердость при высоких температурах.

Также стоит отметить методы поверхностной обработки, такие как закалка и нанесение защитных покрытий. Процесс закалки значительно увеличивает твердость поверхности, а специальные порошковые или термодиффузионные покрытия создают дополнительную твердость, обеспечивающую высокую износостойкость [7].

Таким образом, рассмотренные способы позволяют не только улучшить эксплуатационные характеристики, но и продлить срок службы.

[1] Крупин А.Е. Особенности эксплуатационного изнашивания рабочих органов почвообрабатывающих машин и орудий // Вестник НГИЭИ. – 2010. – Т. 2. – №. 1. – С. 53-60.

[2] Ерохин М.Н., Новиков В.С., Петровский Д.И. К вопросу об импортозамещении рабочих органов зарубежных почвообрабатывающих машин // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т. 121. – С. 206-212.

[3] Ожегов Н.М., Добринов А.В., Ружьев В.А. Исследования методов упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих

машин и разработка автоматической установки для нанесения на них упрочняющих покрытий // Современные наукоемкие технологии. – 2017. – № 3. – С. 28-31

[4] Новиков В.С. Упрочнение рабочих органов почвообрабатывающих машин: учебное пособие / В. С. Новиков, Д.И. Петровский, И.Н. Кравченко; Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева. – Москва: Изд-во РГАУ-МСХА, 2018. – 131 с.

[5] Ерохин М.Н., Гайдар С.М., Скороходов Д.М. и др. Износостойкость низколегированных сталей в абразивной среде // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 72-78.

[6] Гайдар С.М., Ветрова С.М., Барчукова А.С. Влияние легирующих элементов и термической обработки на механические свойства низколегированных сталей // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2023. – № 9. – С. 11-15.

[7] Константинов В.М., Ковальчук А.В. Износостойкие металлоидсодержащие покрытия на сталях, полученные термодиффузионным насыщением и вакуумным осаждением // Наука и техника. – 2020. – № 6. – С. 480-491.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СТАЛЕЙ В АБРАЗИВНОЙ СРЕДЕ

¹Ветрова С.М.*, ¹Барчукова А.С., ^{1,2}Бубнова С.О.

* s.vetrova@rgau-msha.ru

¹Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия;

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», Москва, Россия.

Разработка перспективных высокопрочных сталей, с улучшенными механическими свойствами для сельскохозяйственной техники является актуальной задачей. При проведении исследований применялись методы анализа и обобщения результатов теоретических и экспериментальных исследований. Из исследуемых сталей были изготовлены опытные образцы лезвийных почворежущих рабочих органов для исследования линейного износа. Предложена сталь 0,43C-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti для изготовления рабочих органов почвообрабатывающих орудий, которая позволит в значительной степени решить актуальную проблему повышения износостойкости тяжело нагруженных деталей, а вместе с тем и сократить затраты на обслуживание и ремонт сельскохозяйственной техники.

Ключевые слова: износостойкость, сталь, рабочие органы, изнашивание, механические свойства, долговечность, термическая обработка.

Введение

Почвообрабатывающие органы являются одним из ключевых компонентов сельскохозяйственной техники. Качество и прочность материала, из которого изготовлены рабочие органы, играют важную роль в эффективности и долговечности деталей. При работе с почвой рабочие органы подвергаются интенсивному абразивному изнашиванию [1-3], поэтому материал

COMPARATIVE TESTS OF STEELS IN AN ABRASIVE ENVIRONMENT

Vetrova S.M., Barchukova A.S., Bubnova S.O.

The development of promising high-strength steels with improved mechanical properties for agricultural machinery is an urgent task. During the research, methods of analysis and generalization of the results of theoretical and experimental studies were used. Prototypes of blade-type soil-cutting working bodies were made from the studied steels to study linear wear. Steel 0.43C-1.60Si-0.01Mn-1.1Cr-0.95Mo-0.08V-0.05Nb-0.04Ti is proposed for the manufacture of working bodies of tillage implements, which will significantly solve the urgent problem of increasing the wear resistance of heavily loaded parts, and at the same time reduce the cost of maintenance and repair of agricultural machinery.

Keywords: wear resistance, steel, working parts, wear, mechanical properties, durability, heat treatment.

должен быть достаточно прочным, чтобы выдерживать нагрузки без деформации или поломки. Кроме того, сталь должна быть износостойкой и иметь длительный срок службы.

Производимые в настоящее время отечественными производителями стали 35, 40, 45, 30ХГСА, 65Г и другие не удовлетворяют требованиям изделий нового поколения из-за низкого уровня механических свойств. Например,

лапы культиватора изготавливают в основном из качественной марганцовистой стали 65Г и имеют недостаточную твердость и низкий срок службы [4]. Небольшой срок службы этих деталей не позволяет конкурировать с импортными изделиями.

За рубежом для деталей рабочих органов преимущественно используются низкоуглеродистые, низколегированные стали с микролегированием бором, молибденом, титаном, ванадием и др. [5-8]. Такие изделия обладают повышенной прочностью и ударной вязкостью. Срок службы таких деталей, как правило выше, отечественных сталей.

Главной задачей импортозамещения является разработка отечественных сталей [9-10] и технологий их упрочнения. Важно учесть требования к механическим свойствам и износостойкости материалов, а также обеспечить их доступность и конкурентоспособность на рынке. Поэтому исследования, направленные на разработку новых химических составов сталей и режимов термической обработки, являются актуальными для сельскохозяйственного машиностроения.

Материалы и методы

При проведении исследований использовалась экспериментальная низколегированная сталь 0,43C-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti-0,05Nb-0,04Ti с термической обработкой, включающей нагрев до температуры 900 °С, выдержке образца в печи исходя из допущения, что скорость прогрева равна 1 мм/мин и последующим быстрым охлаждением в воду. Окончательной операцией был выбран отпуск при температуре 280 °С, в течение 1 часа с последующим охлаждением на воздухе [11]. Сталь 65Г с термической обработкой закалка при температуре 830 °С в масле и последующем отпуске 400 °С при температуре в течение 1 часа с последующим охлаждением на воздухе

Для исследования процесса износа в почвенной среде использовали круговой почвенный стенд (рис. 1) конструкции ФГБНУ ФНАЦ ВИМ [12]. Скорость вращения установки равна 50 об/мин. Почвенная масса в процессе испытания уплотняется четырьмя катками, которые приводятся в движение передачей, состоящей из мотор-редуктора и приводного вала обеспечивая движение испытуемых образцов сталей (рис. 2) и рыхлителей для устранения возникающей почвенной подошвы на дне борозды. Угол резания образцов устанавливали под углом 30 градусов. Нарработку линейного и массового образцов фиксировали через равные промежутки равные 40 часам работы.

На стенде испытывают одновременно два образца: опытный и эталон. В ходе эксперимента частичная замена абразива происходит каждые 4 часа, а полная - каждые 8 часов.



Рис. 1. Круговой почвенный стенд конструкции ФНАЦ ВИМ

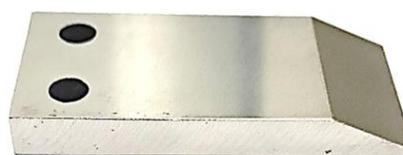


Рис. 2. Фото опытного образца лезвийного почворезущего рабочего органа

Результаты и обсуждение

Испытания сталей на абразивное изнашивание позволили определить изменение геометрических параметров поверхности под воздействием истирания твердыми частицами. Полученные данные представлены на рисунке 3.

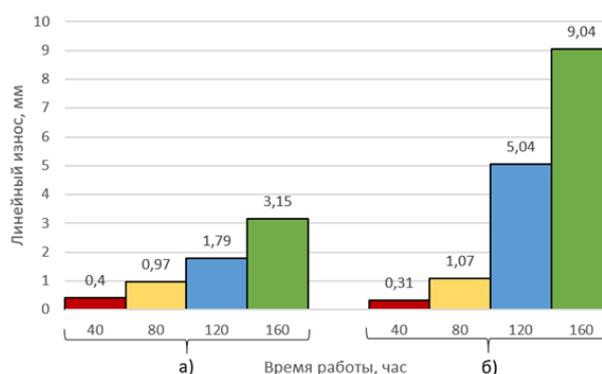


Рис. 3. Линейный износ стали Линейный износ стали: а) 0,43C-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti; б) 65Г

Характер износа стали 0,43C-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti обеспечивается небольшой и постоянной скоростью изнашивания, которую обеспечивает структура мартенсита и остаточного аустенита, удерживающего от выкрашивания залегающие в нем карбиды. Характер износа стали 65Г скачкообразный и характеризуется отсутствием карбидной фазы.

Заключение

Изготовление рабочих органов почвообрабатывающих машин из стали 0,43C-1,60Si-0,01Mn-1,1Cr-0,95Mo-0,08V-0,05Nb-0,04Ti обеспечит повышение износостойкости в 1,3 раза по сравнению со сталью 65Г.

[1] Кузнецова В.Н. Исследование процесса абразивного изнашивания материалов рабочих органов рыхлительного оборудования // Вестник Омского государственного аграрного университета. – 2017 – № 3(27). – С. 157-163.

[2] Грядун С.С., Сиваков В.В. Применение наплавочных материалов для повышения долговечности рабочих органов дисковых борон // Инженерные технологии и системы. – 2021 – Т. 31. – № 4 – С. 544-558.

[3] Кривочуров Н.Т., Иванайский В.В., Ишков А.В. и др. Сравнительные исследования износа стрельчатых лап производства АО "АНИТИМ", выполненных из конструкционных материалов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2018 – № 11(169). – С. 99-108.

[4] Бартнев И.М., Поздняков Е.В. Изнашивающая способность почв и ее влияние на долговечность рабочих органов почвообрабатывающих машин // Лесотехнический журнал. – 2013. – № 3(11). – С. 114-123.

[5] Ren J. et al. Effect of initial martensite and tempered carbide on mechanical properties of 3Cr2MnNiMo mold steel // Materials Science and Engineering: A. – 2021. – Т. 812. – С. 141080.

[6] Krauss G. Tempering of Lath Martensite in Low and Medium Carbon Steels: Assessment and Challenges // Steel Research International. – 2017. – Т. 88. – №. 10. – С. 1700038.

[7] Huang J. et al. Improving the ductility of ultrahigh strength lath martensite through heterogeneous carbon distribution // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Т. 27. – С. 8209-8215.

[8] Seo E. J. et al. Microstructure-mechanical properties relationships for quenching and partitioning (Q&P) processed steel // Acta Materialia. – 2016. – Т. 113. – С. 124-139.

[9] Ерохин М.Н., Гайдар С.М., Скороходов Д.М. и др. Износостойкость низколегированных сталей в абразивной среде // Агроинженерия. – 2023. – Т. 25, № 3. – С. 72-78.

[10] Гайдар С.М., Ветрова С.М., Барчукова А.С. Влияние легирующих элементов и термической обработки на механические свойства низколегированных сталей // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2023. – № 9. – С. 11-15.

[11] Dudko V. et al. Tempering behavior of novel low-alloy high-strength steel // Metals. – 2022. – Т. 12. – №. 12. – С. 2177.

[12] Патент № 2613292 С Российская Федерация, МПК G01N 3/56. Круговой почвенный стенд: № 2015154117: заявл. 17.12.2015: опубл. 15.03.2017 / С.А. Сидоров, Д.А. Миронов, И. В. Лискин; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ" (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ).

К АНАЛИЗУ ДОВЕРИТЕЛЬНОЙ ВЕРОЯТНОСТИ

¹Войнов К.Н.*, ²Буяновский И.А.

* forstar@mail.ru

¹Санкт-Петербург, Россия;

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия.

Тематика статьи связана с обработкой статистических данных при их малом количестве в сделанной случайным образом выборке. Научная новизна состоит в том, что в основе метода лежит геометрическая интерпретация по типу русского сувенира «Матрёшка» в виде различных геометрических фигур (окружность, квадрат или прямоугольник), границы которых связаны с допусками на изготовление или на качество продукции. Прикладное значение весьма обширно, например в трибодиагностике, так как связано с обработкой статистических данных, с которыми исследователи работают постоянно. Причём доверительная вероятность оценки близка к 100 %, хотя наблюдается очень малое количество информации, включая нейронные сети.

Ключевые слова: статистические данные, обработка, доверительная вероятность, малые данные, высокая точность.

Введение

Практически во всех научных исследованиях приходится иметь дело со статистическим материалом, который подвергается различной математической обработке. Например, для этого исследуется возможность принятия конкретного закона распределения (которых более 30); применяют уточняющие критерии (Мизеса, Колмогорова, Пирсона, Войнова, вероятностные бумаги законов распределения и др. [1-4]). В большинстве случаев затруднительно проводить долговременные и многочисленные эксперименты, что связано с большими временными и финансовыми затратами. Поэтому, как правило, стремятся ограничивать количество испытаний (как натуральных, так и лабораторных) в объёме от пяти до 15. При этом при малом числе испытаний, как правило, резко снижается точность оценок и уровень доверительной вероятности. Поэтому в этой работе показан новый оригинальный приём, который имеет цель даже при малом числе выборочных наблюдений получать доверительную вероятность результатов наблюдений/опытов,

TO ANALYSIS OF THE CONFIDING PROBABILITY

Voinov K.N., Buyanovskii I.A.

The gist of this article is connected with the small amount in statistical data which were chosen by chance. The scientific novelty consists is that in the base of new method is the geometry interpretation of the Russian souvenir "Matryoshka" in the figures (as, for example, circumference, square or rectangle) and their borders connected with the tolerances both for the manufacture and for the quality of the production. Applied significance is very extensive, for example, in tribo-diagnostics and with the processing of the statistical data which researchers are working constantly. And the confiding probability for estimation will be about 100% although the very small amount of the statistical data of information is being watching including the neuron's nets.

Keywords: statistical data, processing, confiding probability, small data, high accuracy.

которая близка к 100%. Естественно, что решение описанной проблемы является безусловно актуальной и относится к самым различным областям науки, техники и производства.

Материалы и методы

Для решения важной проблемы была предложена и успешно апробирована следующая геометрико-теоретическая модель, напоминающая уважаемому читателю русский классический сувенир «Матрёшка», в которой меньшие по размеру фигурки вставлены в максимально большой размер. В нашем случае такими геометрическими фигурами могут быть, например, окружности, прямоугольники или квадраты. В качестве вспомогательного оборудования использовался персональный компьютер и стандартная математическая оболочка в виде "MathCad" [4], одна из программ которой приведена с рисунком ниже. Следует также отметить, что геометрические фигуры с разными предельными размерами соответствуют, например, предельным допускам на изготовление деталей или предельным границам по качеству продукции. Одновременно можно внутри

предельных размеров легко осуществлять дробление поля допуска на более меньшие части. Это напоминает мишень в тире с несколькими окружностями от большого диаметра и до самого нуля, как говорят попадает в «яблочко». В этом случае делается объективный вывод, что стрелок – меткий, ружьё – отличное, пуля – хорошая. Следовательно, подобное для производства свидетельствует о том, что технология и оборудование отличные, а также обслуживающий персонал высокой квалификации. Выборочные малочисленные проверки качества продукции из генеральной совокупности с большой долей вероятности хорошо подтверждают общий высокий уровень всего производства в целом. Для примера используем геометрические фигуры (рис. 1, рис. 2 и рис. 3). На первой изображён объект сложной формы с прямыми и кривыми линиями, которые реально имеют конкретный смысл, например, прочность, шероховатость, упругость, стойкость к коррозии или др. Пунктирные линии отражают нижние границы поля допуска по каждой характеристике. Если наблюдаемые и взятые случайным образом числовые значения выпадают из назначенных границ, то это свидетельствует о низком качестве количественного показателя как на этапе тестирования, так и в период будущей эксплуатации.

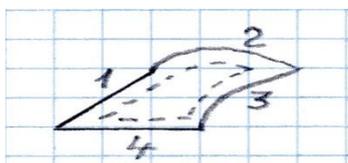


Рис. 1. Вариант объекта с четырьмя поверхностями

Итак, если результаты случайным образом сделанных тестов/измерений выпадают из границ поля допуска, то это свидетельствует о том, что выводы о высокой надёжности или точности системы не могут быть достоверными и объективными. При этом сделаем подсказку, что вместо практически невидимых на рисунке опытных значений в виде точек удобно использовать построение с нанесением вместо точек коротких вертикальных чёрточек.

Для построения трёх окружностей используем такую программу: $i:=1..37$; $j:=1..37$; $f:=1..37$; $h:=0.017453$ (что переводит градусы в радианы); $n_j:=20\cos(10jh)$; $m_j:=20\sin(10jh)$; $t_i:=(30\cos(20ih))/5$; $z_i:=(30\sin(20ih))/5$; $w_f:=30\cos(15fh)$; $v_f:=30\sin(15fh)$.

Использование трёх окружностей показывает, что, если требуется, то можно подробить всё поле допуска на более мелкие составные части (рис. 2). Для удобства рассмотрения мест расположения

измеренных опытных наблюдаемых значений величин изучаемых характеристик изделия можно эти данные соединить на рисунке линиями, как это представлено на рис. 3.

Иные возможные варианты из-за ограниченности положенного объёма публикации здесь не приводятся, но их можно с разными геометрическими фигурами и результатами измерений прочитать и посмотреть в работе [1].

Таким образом, ранее сформулированная задача полностью решена в новом удобном для работы варианте.

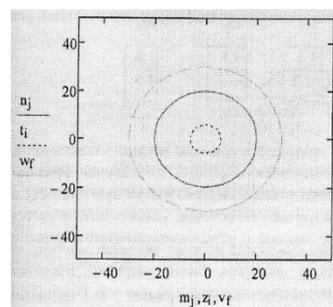


Рис. 2. Пример дробления целого допуска

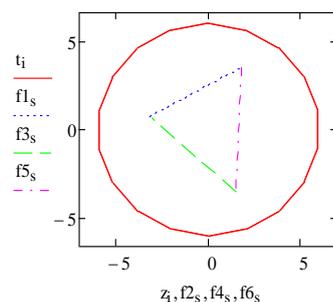


Рис. 3. Попадание трёх измерений в максимальные границы допуска

Практическое применение изложенного алгоритма полностью подтвердило, что итоговые выводы могут достигать по своей точности в пределе до 100%. Значение доверительной вероятности оказалось верным и при решаемой медицинской проблеме, когда повреждённый нерв можно заменить путём либо искусственной нити, эквивалентной по характеристикам натуральному нерву. Либо использовать подсоединение здорового нерва к оставшейся части перебитого нерва. Здесь проявляется новая форма резервирования – скрытое косвенное резервирование.

[1] Войнов К.Н. Обобщения в трибологии. Монография. – СПб.: ИПА ВУЗОВ, 2024. – 250 с.
 [2] Вальд А. Последовательный анализ. – М.: ФИЗМАТГИЗ, 1960. – 328 с.
 [3] Дьяконов В. MathCad 8/2000 Справочник. –СПб.: ПИТЕР, 2001. – 592 с.
 [4] Очков В.Ф. Mathcad 7 Pro для студентов и инженеров. –М.: Компьютер пресс, 1998. – 384 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ СУЩЕСТВОВАНИЯ И ПРИНЦИПОВ УПРАВЛЕНИЯ КАВИТАЦИОННЫМИ ПОТОКАМИ ЖИДКОЙ СМАЗКИ В ЗАТОПЛЕННОМ ЩЕЛЕВОВОМ КАНАЛЕ

Воронин Н.А.*, Пухальский В.А

* voroninn@inbox.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук, Москва, Россия.

Проведено параметрическое и визуальное исследование распространения потока воды в режиме искусственной кавитации в стесненных условиях. Установлены закономерности изменения вида и величины статического давления (разряжения) газожидкостных потоков вдоль канала при введении в него балластной жидкости и воздуха. Полученные результаты обосновывают перспективность применения кавитационно-волновой технологии в трибологии.

Ключевые слова: кавитация, гидродинамические подшипники скольжения, многофазная смазка.

Введение

Жидкостные радиальные и упорные подшипники широко распространены в турбомашинах – от небольших компрессоров до больших турбоагрегатов. Потери мощности на трение в подшипниках скольжения возрастают с увеличением размера, числа оборотов узла трения и тепловой нагрузки. Поиск более эффективных решений для повышения грузоподъемности в смазываемых водой подшипниках скольжения приводит к использованию текстуры функциональных поверхностей и многофазным смазочным средам: вода-масло, вода-газ, вода-кавитация – газ [1, 2].

Для естественной кавитации характерно наличие эффектов локальности ее размещения в узле трения и эрозии твердых поверхностей. Эти эффекты, а также невозможность или очень слабая способность внешними воздействиями управлять кавитирующими жидкими средами, ограничивают применение кавитации в трибологии.

Применение независимого, внешнего источника кавитации, а также введение газа в кавитирующую область являются известными способами создания искусственной кавитации, для которой характерно снижение её отрицательных свойств [3].

STUDY OF THE CONDITIONS OF EXISTENCE AND PRINCIPLES OF CONTROL OF CAVITATION FLOWS OF LIQUID LUBRICANT IN A OVERFLOW SLOT CHANNEL

Voronin N.A., Pukhal'skii V.A.

A parametric and visual study of water flow propagation in artificial cavitation mode in cramped conditions was conducted. Regularities of changes in the type and values of static pressure (vacuum) of gas-liquid flows along the channel when ballast liquid and air are introduced into it were established. The obtained results substantiate the prospects of using cavitation-wave technology in tribology.

Keywords: cavitation, hydrodynamic friction bearings, multiphase lubrication.

Теоретическая оптимизация гидродинамики потока жидкой среды с искусственной кавитацией, малоэффективна в силу многофакторности взаимовлияющих друг на друга существенных параметров. Экспериментальная же оптимизация весьма затруднительна в связи с невозможностью визуального наблюдения за локализацией и распространением кавитационных областей в силу непрозрачности деталей узла трения.

Целью данной работы является проведение исследований по определению условий создания и принципам управления искусственной кавитацией для последующего применения полученных знаний в упорных жидкостных подшипниках скольжения, работающих на воде.

Материалы и методы

В данной работе для гидродинамического моделирования условий работы подшипников со смешанным режимом жидкостной смазки разработано модельное устройство, реализующее высокоскоростное многофазное течение жидкой среды, позволяющее осуществить параметрическое и визуальное исследование возникновения, существования и распространения потока воды в режиме искусственной кавитации в стесненных условиях. Кавитация создается с помощью кавитатора (трубки Вентури), через которую

подается вода под давлением в колбу модельного устройства. Стесненные условия для потока кавитирующей жидкости создаются за счет применения в колбе прозрачного модельного устройства узкого (щелевого) протяженного канала.

Программа исследования предусматривает измерение пьезометрами статического давления гидро-газодинамической струи в семи сечениях канала, измерение расхода жидкости и фотографирование вида кавитирующего потока в зависимости от давления воды на входе в устройство. Испытания были проведены в диапазоне входного давления воды в кавитатор 0 - 10 атм., в присутствии и без присутствия балластной воды, а также в присутствии балластной воды и воздуха, поступающих в канал модельного устройства через входы для пьезометров. Под балластной понимается жидкость эмитирующая смазку, в которой находится подшипник.

Результаты и обсуждение

В экспериментах без применения балластной жидкости для всего диапазона исследуемых значений входного давления отмечается характерная фигура эпюры статического давления потока жидкости вдоль канала. За кавитатором в области измерения давления первый пьезометр показывает максимальное значение разрежения (минимальное значение статического давления), которое потом увеличивается и выравнивается по величине. По мере изменения давления на входе в кавитатор на выходе из отверстия кавитатора вначале появляются газовые пузырьки и возникает шум от кавитации. При достижении давления 1 атм. и выше пузырьки сливаются в облако, которое с повышением давления принимает форму «веретена», вытянутого вдоль канала. Шум кавитации усиливается. При входном давлении в районе 7 атм. пузырьковое облако заполняет все сечение канала и достигает 1/3 длины канала. При дальнейшем повышении входного давления воды пузырьковое облако ускоренно распространяется по длине канала и при давлении на входе порядка 9 атм. занимает весь объем канала. При этом громкость кавитационного шума снижается, что может говорить о снижении эффекта эрозии. При входном давлении порядка 10 атм. весь канал заполняется однородным по цвету и яркости потоком пузырьков. Это на графике (см. рис. 1) сопровождается выравниванием значений разрежения (давления) вдоль канала. Низкие значения статического давления газожидкостного потока практически одного уровня по всей длине канала при высоких значениях входного давления

воды позволяют наблюдаемый режим газожидкостного потока считать вариантом близким к суперкавитации [3].

Особое внимание заслуживает эффект выравнивания давления (разрежения) вдоль канала колбы с повышением входного давления. Эпюры давления газо-парожидкостной струи в канале колбы с повышением давления выполаживаются. Локальность максимальных значений разрежения с повышением входного давления снижается, равномерность давления в канале возрастает и при максимальных в данном исследовании значениях входного давления эпюра статического давления практически равномерна на всей длине канала. Если учесть, что статическое давление газожидкостного потока в канале, измеряемое пьезометрами, говорит о взаимодействии жидкостного потока с твердой поверхностью, то значение давления (разрежения), отмечаемое в данном исследовании, может косвенно говорить и быть прямо пропорционально силе трения газожидкостного потока в контакте с твердой поверхностью. Низкие и равномерно распределенные по поверхности стенок канала значения статического давления могут обеспечивать низкое трение в реальных конструкциях гидродинамических подшипников скольжения.

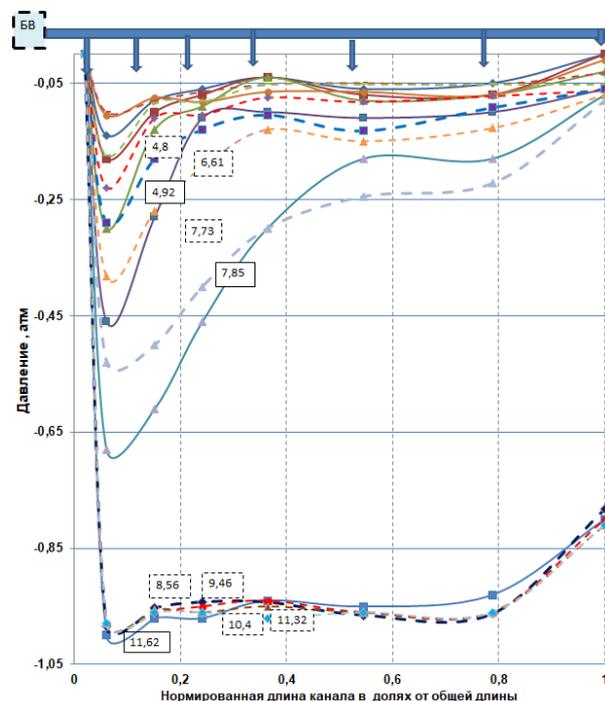


Рис. 1. Зависимости изменения статического давления по длине канала от величины входного давления.

Обозначение кривых на рисунке: сплошные линии – без балластной воды, штриховые линии – с балластной водой

Исследования влияния присутствия балластной воды в канале модельного устройства показали, что, во-первых, моды (минимумы) давления существенно уменьшаются и слегка смещаются вперед по направлению от выходного канала кавитатора, и, во-вторых, эпюры выносятся аналогичным образом, как при отсутствии балластной жидкости, но при существенно более высоких значениях входного статического давления.

Установлен факт «насыщения» канала колбы балластной жидкостью, что следует учитывать при проектировании конкретных узлов трения. Насыщение проявляется в том, что при высоких входных давлениях эпюры статического давления газожидкостного потока при давлениях 9,5 атм. (без балластной жидкости) и при давлениях в районе 11 атм., как при наличии, так и при отсутствии балластной жидкости практически совпадают.

В случае применения балластной жидкости свечение канала более яркое и однородное по длине канала, чем в отсутствие балластной жидкости.

Следующий этап исследований был направлен на изучение поведения и результаты управления кавитационной струей воды в стесненных условиях ее распространения при введении в канал воздуха.

Подача воздуха проводилась в канал колбы при входном давлении 4,9 атм. через ввод №1 (рядом с кавитатором) при ступенчатом изменении расхода воздуха 1, 2, 4 и 6 л/мин.

При отсутствии подачи воздуха отмечается такой же как в отсутствие балластной жидкости режим существования потока с кавитационным облаком (факелом) размером 30-35 мм. Подключение воздуха приводит к размыванию по ширине канала и увеличению протяженности газожидкостного потока.

При установлении расхода воздуха в 4 и 6 л/мин кавитационное облако занимает весь канал и возникает сильная вибрация модельного устройства. Вероятной причиной такого поведения является переход течения потока жидкости из ламинарного в турбулентный режим.

Наблюдаемое существенное выравнивание по длине канала эпюры статического давления при малых значениях входного давления, и вид газопарожидкостного потока позволяет предполагать перспективность использования газонасыщенного кавитационного потока с целью получения однородного газожидкостного потока на протяжении всего канала.

Программа исследования предусматривала кроме измерения статического давления газожидкостной струи и визуального анализа ее вида также измерение расхода жидкости. Предполагалось, что введение балластной жидкости и воздуха должны создавать дополнительное сопротивление кавитационной струе и как следствие приводить к снижению величины расхода жидкости.

Испытания, проведенные в данной работе, показали, что введение балластной жидкости, изменение величины статического давления в колбе, распределение статического давления по длине канала и изменение вида газожидкостного потока не влияют на расход протекающей через модельное устройство жидкости.

Заключение

Проведенные исследования позволили определить условия существования потока жидкости, создаваемого с помощью генератора кавитации в затопленных средах, располагаемых в узких (щелевых) каналах. Установлены закономерности изменения вида газожидкостных потоков, величин статического давления (разряжения) газожидкостных потоков вдоль канала и расхода жидкости от величины входного давления, присутствия балластной жидкости и воздуха. Неизменность расхода жидкости через щелевой канал в модельном устройстве и низкие значения статического давления газопарожидкостной смазки, создаваемой при использовании искусственной кавитации, позволяют полагать, что применение кавитации и воды в качестве смазки может обеспечить более высокую работоспособность как низкоскоростных, так и высокоскоростных подшипников скольжения. Полученные результаты актуализируют работы в области применения кавитационно-волновой технологии в трибологии.

[1] Henry Y., Bouyer J., Fillon M. Experimental analysis of the hydrodynamic effect during start-up of fixed geometry thrust bearings // Tribology International. – 2018. – Т. 120. – С. 299–308.

[2] Ma X., Meng X., Wang Y., Peng X. Suction effect of cavitation in the reverse-spiral-grooved mechanical face seals // Tribology International. – 2019. – Т.132. – С.142-153.

[3] Byoung-Kwon Ahn. et al. Experimental study on artificial supercavitation of the high speed torpedo // Journal of the KIMST. – 2015. – Т. 18. – №. 3. – С. 300-308.

СОЗДАНИЕ ОБОБЩЕННОГО БЛОКА РЕЖИМОВ РАБОТЫ МАШИН С УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ, ПРИВОДЯЩИХ К ДЕГРАДАЦИИ ИЗДЕЛИЯ

¹Гадолина И.В.*, ²Побегайло П.А.

* gadolina@mail.ru

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия;

²Независимый исследователь, Москва, Россия.

Деградационные режимы, а именно, износ и усталость, приводят к постепенному истощению ресурса машин. На примере мобильного экскаватора фирмы VOLVO и автомобилей показано, как производится замер параметров по режимам и как составляется обобщенный блок нагружения.

Ключевые слова: экскаватор, трейлер, износ, усталость, режимы работы.

CREATION OF A GENERALIZED BLOCK OF MACHINES OPERATING MODES LEADING TO PRODUCT DEGRADATION

Gadolina I.V., Petrova I.M., Pobegailo P.A.

Degradation modes, namely wear and fatigue, lead to gradual exhaustion of the excavator resource. The example of the VOLVO and cars mobile excavator shows how the parameters are measured by modes and how a generalized loading block is compiled.

Key words: excavator, trailer, wear, fatigue, operating modes.

Введение

Ресурс экскаваторов в значительной степени зависит от скорости протекающих в процессе эксплуатации деградационных процессов. Деградация – физическое явление, наблюдающееся в материалах с течением длительного времени и выражающееся в соответствующем снижении способности конструкции сопротивляться воздействию на нее различных нагрузок и, соответственно, истощающее остаточный ресурс оборудования, уменьшает надежность и долговечность. Важные деградационные процессы в экскаваторостроении связаны с накоплением повреждений от усталости и износа. В работе [1] показано, как может быть осуществлен расчет по критерию износа в случае работы горнодобывающего экскаватора.

Цели и задачи исследования

Если есть некий стандартный экскаватор со стандартным рабочим органом, у него может быть прописан спектр внешних условия работы и внешних воздействий разного рода. Задача состоит в структуризации этих спектров и их стыковке, что позволит ввести понятие эксплуатационного профиля машины, который в идеале, должен быть привязан к типоразмерному ряду машин и так называемому районированию грунтов по степени сложности их экскавации. Поскольку математические модели, описывающие процессы накопления повреждений в процессе эксплуатации не всегда верно и точно отражают реальные

процессы, важно разрабатывать лабораторные, эксплуатационные и цифровые методы исследований. Накопление усталостных повреждений происходит неравномерно, возрастая со временем. В работе [2] показано, что износ концевых фрез с многослойными композиционными покрытиями при лезвийной обработке резанием растет с увеличением длины резания. В [2] приводится формула

$$T=L/v,$$

где T – это период стойкости, L – длина пути резания и v – скорость изнашивания фрезы с соответствующими размерностями.

Повреждения деталей и несущих конструкций оборудования от усталости нелинейно возрастают с течением времени эксплуатации. В [3] показано, что связь между напряжением и числом циклов до разрушения при трении аналогична той, что фиксируется при динамическом нагружении, с проявлением областей много- и малоциклового усталости.

Задача данного исследования заключается в построении блока режимов нагружения для испытаний и расчетов элементов работающих машин, а также в разработке цифровых методов исследования. Также важно развивать методы для обоснования продления срока эксплуатации для машин с истекшим сроком эксплуатации.

Материалы и методы исследований

Мы использовали материалы по измерениям нагрузок из [4]. Был рассмотрен мобильный

экскаватор фирмы VOLVO. Исследовались вопросы применения статистических методов для получения профилей использования мобильного экскаватора. Возможности использования экскаватора весьма разнообразны, не в последнюю очередь благодаря большому количеству различных насадок. Области применения варьируются от выемки грунта экскаватором до использования гидромолота. Экскаватор также может двигаться по дороге развивая скорость до 35 км/ч.

Были выделены и рассмотрены основные типовые эксплуатационные режимы, связанные как с перемещением, так и экскавацией грунта, например, «Рытье траншеи», «Погрузка грузовика», «Перемещение по дороге» и некоторые другие. С помощью экспертов были оценены продолжительности в долях от общего времени для отдельных режимов, например, 25% выравнивание, 13% копание, 10% вождение и т. д. Измерения осуществлялись на дорогах разного вида и профиля и даже в разных странах, чтобы получить более подробную информацию. Данные снабжались маркерами, такими как страна регистрации, регион, информация о водителе или машинисте (опытный / неопытный / состояние здоровья) и климатические зоны. Указанные факторы могут влиять на интенсивность накопления усталостных и износных повреждений.

На основе данных [4] произведена оценка статистического расхождения записей по повреждающему воздействию по критериям износа и динамического нагружения. Для выбора оптимального числа режимов для записей в дальнейшем предполагается произвести дисперсионный анализ по важнейшим эксплуатационным характеристикам с целью сокращения их числа с сохранением существенных особенностей эксплуатации в конкретном режиме.

Отдельные режимы различаются как возникающими рабочими нагрузками, так и распределению частот использования в общем времени работы машины.

Результаты и их обсуждение

В базе данных режимы экскаватора были сохранены в сопровождении видео съемки (рис. 1).



Рис. 1. Примеры кадров видеосъемки для идентификации режимов [4]

На рис. 2 показано возможное распределение режимов по времени использования экскаватора:

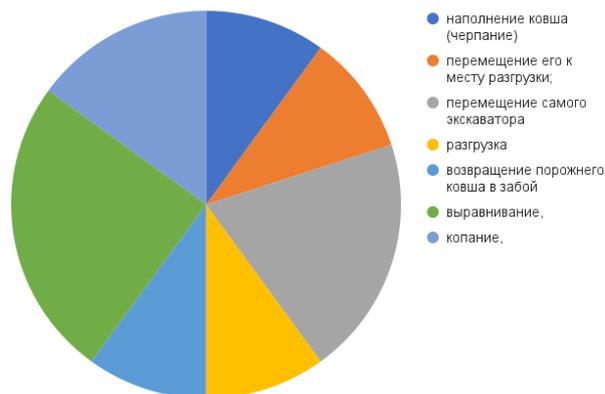


Рис. 2. Распределение времени работы экскаватора по режимам (ориентировочное)

Для автомобилей примерный перечень режимов для измерений может быть представлен как сочетание следующих факторов [5]:

- **Тип дороги** (город, шоссе, ...)
- **Топография** (ровная, холмистая, ...)
- **Грузоподъемность** (пустой, полный, ...)
- **Прицеп** (фургон, платформа, ...)
- **Поведение вождения** (агрессивное, бережное, ...)
- **Условия окружающей среды** (лед, мокро, жарко, ...)
- **Региональные ограничения** (ограничение скорости)

Упрощенный вариант распределения времени эксплуатации по режимам эксплуатации трейлеров [5] с учетом загруженности машины приведен в таблице 1.

Табл. 1. Режимы эксплуатации трейлеров

Вклад режима в %		Тип трейлера			
		плоский		коробка	
		Загрузка		Загрузка	
		60%	90%	60%	90%
Тип дороги	скоростная	6	14	8	18
	сельская	3	7	5	12
	город	3	7	5	12

Мерой повреждающего воздействия при усталости для режима j служит сумма повреждений за километр [5]:

$$D = \sum (S_i^m), i=1 \dots N, \quad (1)$$

где S – амплитуды N напряжений, выделенные по методу дождя; m – коэффициент угла наклона кривой усталости металлических образцов или детали для режима j .

Поскольку процессы усталости и износа относятся к деградиционным процессам, согласно работе [3], формула для износа W , аналогичная формуле (1), может быть предложена и для процессов трения в виде неубывающей функции

$$W=f(t), \quad (2)$$

где t – время наработки, линейно связанное с числом циклов нагружения N .

Заключение

Получены надежные и статистически обоснованные профили режимов нагрузки для компьютерного расчета срока службы по критериям износа и многоциклового усталости. Предложен подход, позволяющий создавать обобщенные блоки режимов для расчетов и испытаний деталей машин, подвергающихся в процессе эксплуатации циклическим нагрузкам и трению. Результаты могут быть использованы для обоснованного продления срока эксплуатации для машин с истекшим расчетным сроком использования.

[1] Pobegailo P.A., Gadolina I.V. Reliability of Mining Machines and Development of the Express-Diagnostic System: State and Prospects //Journal of Graphic Era University. – 2022. – С. 1–12.

[2] Григорьев С.Н., Волосова М.А., Мигранов М.Ш., Гусев А.С. Исследование триботехнических свойств режущего инструмента с композиционными многослойными покрытиями// Трибология – машиностроению: Труды XIV Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения А.П. Семёнова – М.: ИМАШ РАН, 2022. – С. 107-110.

[3] Марченко Е.А., Петрова И.М. некоторые закономерности разрушения металлов при различных видах циклического нагружения// Трибология – машиностроению: Труды XIV Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения А.П. Семёнова – М.: ИМАШ РАН, 2022. – С. 202-204.

[4] Streit A. et al. Anwendung statistischer Methoden zur Erstellung von Nutzungsprofilen für die Auslegung von Mobilbaggern // Bereits erschienen in: VDI-Berichte Nr. 2065 VDI-Verlag GmbH Düsseldorf, 2009. – С. 65-77.

[5] Dreßler K. et al. Customer loads correlation in truck engineering. / Berichte des Fraunhofer ITWM, Nr. 151 (2009).

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ И КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ НИТРИДА ТИТАНА

¹Газизова М.Ю.*, ²Смирнов Н.А., ³Ахмадеев Ю.Х., ¹Газизов М.Р., ²Кудряшов С.И.

* SmolyakovaMarina@mail.ru

¹Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Белгород, Россия;

²Физический институт имени П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия;

³Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия.

Исследовано влияние среды обработки (воздух, вода, спирт) при структурировании поверхности покрытия TiN фемтосекундным лазером на трибологические свойства и коррозионную стойкость. Показано, что фемтосекундная лазерная обработка (ФЛО) на воздухе приводит к формированию тонкого слоя оксида титана, который способствует снижению коэффициента трения и повышению коррозионной стойкости в растворе 0,9% NaCl.

Ключевые слова: износ, коэффициент трения, коррозионная стойкость, нитрид титана, структурирование поверхности, покрытия.

Введение

Структурирование поверхности с целью получения низких/сверхнизких коэффициентов трения является перспективным и быстроразвивающимся подходом в трибологии. После успешной реализации такого подхода на объемных материалах (сталь, титан, титановые сплавы и др.) [1-3], вторым этапом в его развитии стало структурирование поверхности покрытий. Как правило нанесение покрытий является финишной обработкой, и дальнейшая модификация осложнена в том числе из-за их высокой твердости, износостойкости и возможного снижения адгезионной прочности после обработки. Главной задачей при структурировании поверхности с точки зрения трибологии является сократить реальную площадь контакта. Формирование многоуровневого периодического рельефа позволяет не только уменьшить площадь контакта, но также направлять потоки смазки и удалять продукты износа из области трения [4, 5]. В зависимости от выбранных режимов структурирования поверхности при помощи лазера фемтосекундной длительности можно варьировать получаемые структуры. Особым параметром при фемтосекундной лазерной обработке является среда, которая может оказывать

EFFECT OF ULTRASHORT LASER PULSES ON WEAR AND CORROSION RESISTANCE OF TITANIUM NITRIDE

Gazizova M.Yu., Smirnov N.A, Akhmadeev Yu.H., Gazizov M.R., Kudryashov S.I.

The effect of the processing environment (air, water, alcohol) during structuring the surface of the TiN coating with a femtosecond laser on the tribological properties and corrosion resistance was studied. Femtosecond laser treatment in air was shown to lead to the formation of a thin layer of titanium oxide, which reduces the friction coefficient and increase corrosion resistance in 0.9% NaCl solution.

Keywords: wear, friction coefficient, corrosion resistance, titanium nitride, surface structuring, coatings.

влияние не только на формируемый рельеф поверхности, но и на фазовый состав [6, 7]. В рамках представляемой работы были проведены исследования влияния фемтосекундной лазерной обработки покрытия TiN на структурно-фазовое состояние, износостойкость и коррозионную стойкость при модификации покрытия на воздухе, в воде и спирте.

Материалы и методы

Методом вакуумно-дугового осаждения на поверхность технически чистого титана наносилось покрытие TiN [8]. Последующее структурирование поверхности покрытия TiN проводилось при помощи лазера фемтосекундной длительности в трех различных средах: на воздухе, в дистиллированной воде и спирте.

Трибологические испытания проводились при помощи высокотемпературного трибометра TRIBOMETR (CSM Instruments) в режиме трения со смазкой, где в качестве смазки выступала СОЖ для режущих инструментов. Схема испытаний была выбрана «пин-диск», где диаметр пина из стали 100Cr6 составлял 6 мм. Нагрузка на контртело и путь трения составляли 1 Н и 1000 м, соответственно при скорости вращения 15 см/с.

Исследование коррозионной стойкости проводилось потенциодинамическим методом при помощи потенциостата IPC-Pro и стандартной трехэлектродной ячейки. В качестве электрода сравнения выступал хлорсеребряный электрод Ag/AgCl, в роли вспомогательного выступал углеродный электрод, рабочим электродом являлся исследуемый образец. Все испытания были выполнены в растворе 0,9% NaCl при комнатной температуре. Площадь поверхности образца была более 1,0 см². Перед потенциодинамическими испытаниями каждый образец выдерживался в растворе не менее 90 мин до достижения стабильного стационарного потенциала $E_{ст}$. Далее на образец подавалось напряжение 10 мВ и со скоростью 2 мВ/с осуществлялось увеличение потенциала до 5000 мВ. Анализ коррозионной стойки проводился по значениям стационарного потенциала, потенциала коррозии и величине плотности тока.

Исследования микроструктуры поверхности после фемтосекундной лазерной обработки (ФЛО), а также после испытаний на износостойкость и коррозионную стойкость выполнялись с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) Quanta 600 FEG.

Результаты и обсуждение

Ранее было показано, что формирование на поверхности TiN лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (LIPSS) позволяет существенно снизить коэффициент трения при трении в масле и СОЖ в сравнении с необработанным нитридом титана [9]. Однако, как правило обработку проводят на воздухе и не учитывают его влияние. В рамках данных исследований была проведена модификация поверхности нитрида титана в трех средах: на воздухе, в воде и в спирте. Многоуровневый периодический рельеф на поверхности TiN формируется независимо от среды обработки. При этом в случае ФЛО на воздухе на поверхности формируется тонкий слой оксидов. Данные рамановской спектроскопии подтверждают формирование на поверхности TiN оксида титана – рутила. При смене среды обработки на спирт окисление поверхности не происходит.

Исследование коррозионной стойкости показали, что состояние полученное в результате ФЛО на воздухе является более коррозионно-стойким. Так, потенциал коррозии после структурирования на воздухе составляет $E_{кор} = 4285$ мВ, а для необработанного TiN и для образцов после ФЛО в спирте и в воде потенциал коррозии

варьируется в диапазоне от 3120 – 3165 мВ (табл.1). Минимальный потенциал коррозии соответствует необработанному покрытию TiN $E_{кор} = 3120$ мВ (рис. 1). Покрытие TiN без обработки и образцы после ФЛО в воде имеют схожую динамику изменения плотности тока с увеличением потенциала. Так, после резкого роста тока, соответствующего активному процессу растворения образца, на потенциале ~3500 мВ происходит его снижение с последующим поэтапным переходом в области пассивации и репассивации (рис. 1б). Такое поведение характерно для материала подложки – технически чистого титана VT1-0. В случае необработанного покрытия TiN активное растворение с последующей пассивацией возможно связано с присутствием дефектов в покрытие и формированием локальных форм коррозии. Область пассивации не была выявлена для образца с покрытием TiN после структурирования на воздухе в исследуемом диапазоне потенциалов. Также данный образец имеет минимальные значения плотности тока, что говорит о менее интенсивном процессе растворения (табл. 2). Повышение коррозионной стойкости связано с формированием на поверхности покрытия TiN тонкого слоя оксида титана (рутила) [10].

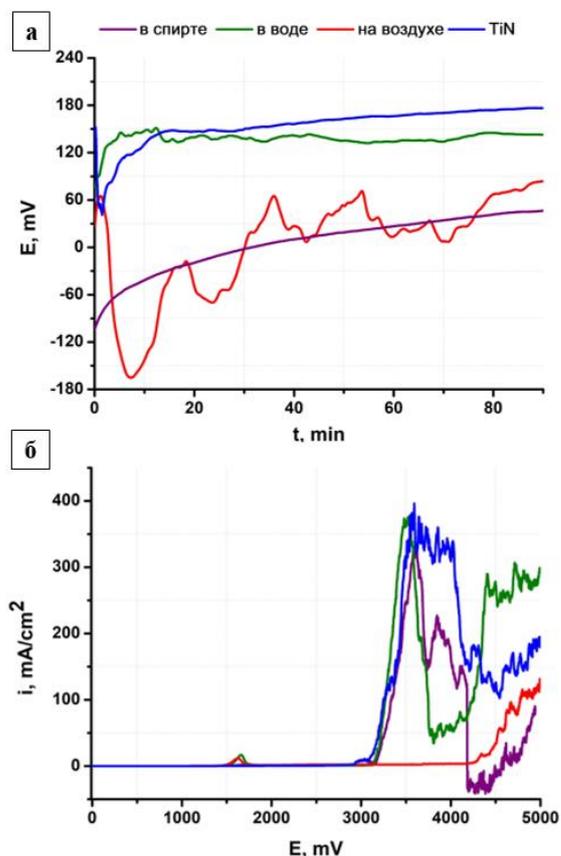


Рис.1. Зависимость изменения стационарного потенциала от среды ФЛО (а) и поляризационные кривые, полученные в растворе 0,9% NaCl (б)

Табл. 1. Значение стационарного потенциала $E_{ст}$, потенциала коррозии $E_{кор}$ и плотности тока коррозии j при испытании в 0,9% NaCl растворе до и после ФЛО покрытия TiN в различных средах

Среда обработки	$E_{ст}$, мВ	$E_{кор}$, мВ	j , мА/см ²	j_{max} , мА/см ²
Спирт	46	3165	4,6	332
Вода	141	3160	11,9	375
Воздух	84	4285	6,3	129
Без обработки	177	3120	16,4	390

Табл. 2. Коэффициент трения покрытия TiN до и после ФЛО в различных средах

	TiN (исходный)	Спирт	Вода	Воздух
$\mu_{ср}$	0,18	0,16	0,16	0,10
μ_p	0,18	0,17	0,16	0,09

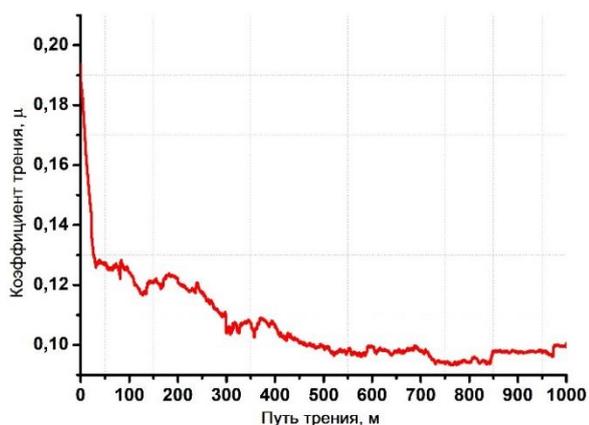


Рис.2. Зависимость изменения коэффициента трения от пути трения для TiN до и после ФЛО в различных средах

Исследование трибологических характеристик показало, что минимальный коэффициент трения наблюдается для состояния, полученного при ФЛО на воздухе (табл. 2). Стоит отметить, что не для всех состояний рабочий и средний коэффициент трения совпали. Так, после структурирования покрытия TiN на воздухе этап приработки при трении длится значительно дольше, чем для других состояний (рис. 2). Максимальный коэффициент трения $\mu = 0,18$ в исследуемых условиях соответствует необработанному покрытию TiN. Структурирование поверхности при помощи лазера фемтосекундной длительности позволяет уменьшить коэффициент трения независимо от среды обработки (табл. 2). Формирование на поверхности оксида титана позволяет дополнительно снизить коэффициент трения. Причем, согласно литературным данным [7], минимальный коэффициент трения имеет оксид титана TiO_2 , затем повышение коэффициента трения идет по следующей схеме: $\mu(TiO_2) < \mu(Ti_2N) < \mu(TiN) < \mu(Ti)$. Стоит отметить, что используемая методика оценки износостойкости не позволяет провести количественную оценку износа в связи с его малой величиной.

Заключение

Формирование многоуровневого периодического рельефа на поверхности образцов с покрытием TiN происходит независимо от среды обработки и приводит к повышению трибологических характеристик. В случае структурирования поверхности покрытия TiN на воздухе происходит формирование тонкого слоя оксида титана – рутила, который позволяет повысить коррозионную стойкость в исследуемых условиях и уменьшить коэффициент трения.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-79-00295).

- [1] Bonse J. et al. Tribological performance of femtosecond laser-induced periodic surface structures on titanium and a high toughness bearing steel // *Applied Surface Science*. – 2015. – Т. 336. – С. 21-27.
- [2] Wang Z., Zhao Q., Wang C. Reduction of friction of metals using laser-induced periodic surface nanostructures // *Micromachines*. – 2015. – Т. 6. – №. 11. – С. 1606-1616.
- [3] Handbook of lasermicro- and nano-engineering. Laser-induced periodic surface structures (LIPSS) // J. Bonse, S.V. Kimer, J. Krüger; Editors K. Sugioka. – Springer Cham, 2021.
- [4] Stark T. et al. Positive effect of laser structured surfaces on tribological performance // *JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering*. – 2019. – Т. 14. – С. 13-18.
- [5] Gaudiuso C. et al. Tailoring the Coefficient of Friction by Direct Laser Writing Surface Texturing // *Micromachines*. – 2023. – Т. 15. – №. 1. – С. 7.
- [6] Газизова М.Ю. и др. Влияние фемтосекундной лазерной обработки в различных средах на структуру и трибологические свойства покрытия TiN // *Материалы 15-й Международной конференции ВИТТ*. – 2023. – Т. 15(1). – С. 363-365.
- [7] Bonse J. et al. Chemical, morphological and accumulation phenomena in ultrashort laser ablation of TiN in air // *Applied Physics A*. – 2000. – Т. 71. – С. 657-665.
- [8] Shugurov V.V. et al. QUINTA equipment for ion-plasma modification of materials and products surface and vacuum arc plasma-assisted deposition of coatings // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Т. 1393. – С. 012131.
- [9] Gazizova M.Yu. et al. The effect of femtosecond laser treatment on the tribological properties of titanium nitride // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Т. 862. – С. 022054.
- [10] Wang H. et al. A comparative study of the corrosion performance of titanium (Ti), titanium nitride (TiN), titanium dioxide (TiO₂) and nitrogen-doped titanium oxides (N-TiO₂), as coatings for biomedical applications // *Ceramics International*. – 2015. – Т. 41. – №. 9. – С. 11844-11851.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ СУХИХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

¹Гайдар С.М.*, ¹Пикина А.М., ²Узлов А.А.

* techmash@rgau-msha.ru

¹Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия;

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», Москва, Россия.

На сегодняшний день стоит проблема дефицита отечественных смазочных материалов с высокими эксплуатационными свойствами в кабельной промышленности. В связи с этим невозможно качественно производить кабельную продукцию на основе стали плакированной алюминием. Основная проблема – снижение скорости волочения и, как следствие, снижение производительности, а также образование задиров и обрывов. Фильтры используемые для волочения проволоки эксплуатируются в жестких условиях, которые характеризуются высокими нагрузками в результате чего происходит их быстрое изнашивание. Одним из способов повышения ресурса тяжело нагруженных сопряжений и качества кабельной продукции является разработка и применение высокоэффективных сухих смазочных материалов на основе нанотехнологий.

Ключевые слова: абразивное изнашивание, сухие смазочные материалы, скорость волочения, тяжелонагруженные подвижные сопряжения, нанотехнологии.

Введение

Проблема дефицита новых отечественных смазочных материалов с высокими эксплуатационными свойствами, встала особенно остро в связи с введением санкций против Российской Федерации. Многие высоко технологические смазки перестали поступать в РФ из стран ЕС, в связи с чем встал под угрозу возможность выпуска ряда продукции.

В частности, это коснулось и кабельной промышленности. Прекращение поставок итальянской смазки Panlube не даёт возможность качественно производить кабельную продукцию на основе стали, плакированной алюминием. Предприятия ищут альтернативные Российские и Китайские аналоги. Но добиться полной замены качественных характеристик пока не удалось. Основная проблема – снижение скорости волочения, тем самым снижение производительности оборудования, образование задиров и обрывов.

TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION OF HIGH-PERFORMANCE DRY LUBRICANTS

Gaidar S.M., Pikina A.M., Uzlov A.A.

Today, there is a problem of shortage of domestic lubricants with high performance properties in the cable industry. In this regard, it is impossible to produce high-quality cable products based on aluminum-clad steel. The main problem is a decrease in the drawing speed and, as a result, a decrease in productivity, as well as the formation of bullies and breaks. The dies used for wire drawing are operated in harsh conditions, which are characterized by high loads, as a result of which their rapid wear occurs. One of the ways to increase the life of heavily loaded interfaces and the quality of cable products is the development and use of highly efficient dry lubricants based on nanotechnology.

Keywords: abrasive wear, dry lubricants, drawing speed, heavily loaded movable joints, nanotechnology.

Кроме трибологических показателей сухие смазочные материалы (далее по тексту смазка) должны обладать низкой стоимостью. Таким условиям удовлетворяют только смазки, основой которых являются мыла. Поэтому литературно-патентный поиск был проведен в этом направлении. Изучены используемые рецептуры смазок и факторы влияющие на процесс волочения. Данные получены на основании информации размещенной на сайтах ФИПС <https://fips.ru/> и Роспатент <https://rospatent.gov.ru>.

Одним из основных факторов, влияющих на качество волочения и технологичность его свивки, является качество предельной заготовки, проволоченной на участке грубосреднего волочения. При этом важным параметром, определяющим качество предельной заготовки на участке грубосреднего волочения, является применяемая для волочения смазка.

Смазка должна хорошо и непрерывно разделять трущиеся поверхности и прочно к ним прилипать, выдерживать большие давления. Она не должна спекаться, разлагаться или расслаиваться. Необходимо, чтобы смазка обеспечивала минимальный износ канала волок, не оказывала вредного воздействия на обслуживающий персонал и была дешевой.

В смазках для сухого волочения применяются кальциевые или натриевые мыла, т.е. соли жирных кислот этих металлов. В зависимости от используемого сырья – это стеараты или смеси солей жирных кислот, но с преобладанием стеаратов.

Жирные кислоты, используемые при изготовлении смазок для волочения, должны иметь возможно большую молекулярную массу, так как это повышает смазочные свойства.

В дальнейшем в соли жирных кислот стали вводить различные присадки и добавки, повышающие антифрикционные, противозадирные, противоизносные и антикоррозионные свойства смазок. Наиболее эффективными показали себя слоистые материалы, такие как дисульфид молибдена и графит.

Кроме того, в смазки добавляются наполнители (известь, различные соли, мел и другие вещества), которые улучшают разделение поверхностей волоки и обрабатываемого металла. Обычно содержание солей жирных кислот в смазках находится в пределах 70-85%. Смазки на основе солей жирных кислот выполняют функцию основного смазывающего компонента ввиду высокой их поверхностной активности к металлической поверхности, обусловленной наличием функциональной группы $-C=O$.

Цель выполнения исследований является разработка технологии производства смазки для волочения, обладающей следующими характеристиками:

- Смазка должна хорошо и непрерывно разделять трущиеся поверхности и обладать высокими адгезионными свойствами.
- Смазка не должна спекаться, разлагаться или расслаиваться.
- Необходимо, чтобы смазка обеспечивала минимальный износ канала волок
- При использовании сухой смазки при волочении не допускается, чтобы металл становится блестящим, образовал задиры поверхности, риски и обрыв проволоки.
- Стоимость смазки с учетом сырья и затрат на производство должна быть конкурентоспособной на рынке.
- Скорость волочения должна быть не менее 5 м/с.

Материалы и методы

На основе литературно-патентного анализа произведен выбор материалов, которые были включены в состав рецептуры смазки для волочения: кальциевое мыло, модифицированный графит ГС-1, гидроксид кальция. Количество компонентов в составе при проведении научно-исследовательской работы подвергались корректировке в зависимости от результатов трибологических исследований.

Для выполнения технологической операции по приготовлению смазки были использованы: сушильный шкаф, пропиточный автоклав, весы, смеситель, шаровая мельница, машина трения ЧМТ-1 и микроскоп оптический ADF1350.

Экспериментальные исследования проводились в два этапа.

На первом этапе на машине трения была определена нагрузка сваривания для зарубежного прототипа, произведенного в Италии с торговым названием Panlube. Значение нагрузки сваривания смазки Panlube явилось критерием для оптимизации состава опытного образца смазки.

На втором этапе были проведены промышленные испытания на проволоке ZOSA с диаметром 6,3 на рабочей скорости 5 м/с.

Результаты и обсуждение.

Для приготовления смазки в результате анализа литературных источников были выбраны следующие материалы:

- сульфат натрия ГОСТ 21458-75;
- стеарат кальция ТУ 2432-005-10269039-05;
- графит смазочный ГС-1 ГОСТ 8295-73.

Улучшение трибологических характеристик графита ГС-1 осуществляли за счет его модификации фторсодержащими ПАВ (эпилам «Автокон-0,5» ТУ 2229-008-27991970-95). Количество эпилама используемого для модификации графита ГС-1, определяли из уравнения:

$$\frac{(\rho_{ПЭ} - \rho_{П})}{\rho_{П}} \cdot 100\% \sim N \cdot S \cdot \delta \cdot \rho_{Э} \cdot 100\%$$

где S – удельная площадь поверхности пористого материала, включая поры, м²/кг;

δ – толщина пленки эпилама после высыхания и термообработки, м;

$\rho_{Э}$ – плотность эпилама, кг/м³;

$\rho_{П}$ – плотность пористого материала (порошка) до эпиламирания, кг/м³;

$\rho_{ПЭ}$ – плотность эпиламиррованного пористого материала (порошка), кг/м³;

N – число пропиток эпиламом.

Способ получения негигроскопичного, пористого материала включает: обработку пористого материала импрегнатом, высушивание и последующую термофиксацию.

Следующим этапом создания смазки была создана рецептура, подлежащая оптимизации по компоненту, влияющему на трибологические свойства – модифицированный графит. Для решения этой задачи в рецептуру поэтапно добавляли модифицированный графит, начиная с 1,2% и на машине трения ЧМТ-1 увеличивая нагрузку определяли нагрузку сваривания. Результаты испытаний (рис. 1) показали, что до количества 3,6% модифицированного графита в составе смазки нагрузка сваривания равна 400 кгс как для зарубежного аналога. Увеличение концентрации до 4,8% позволило получить результат превышающий зарубежный аналог. Нагрузка сваривания составила 700 кгс.

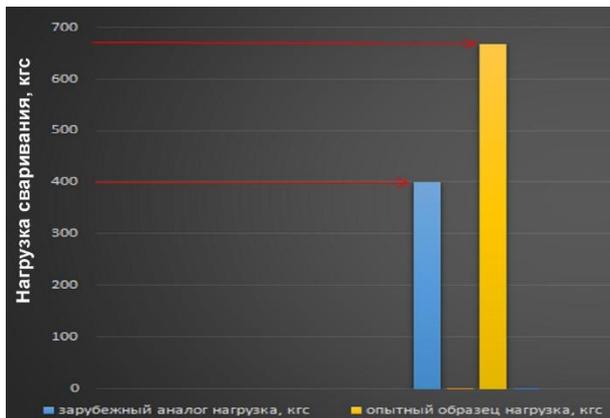


Рис. 1. Трибологические характеристики зарубежного аналога и опытного образца

Технология изготовления смазки представляла следующие операции:

- Взвешивание компонентов;
- Загрузка в смеситель всех компонентов смазочного состава;
- Перемешивание компонентов (в течение 2 ч);
- Термическая обработка состава смеси (при $t = 175\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 2,0 ч);
- Измельчение полученного состава в шаровой мельнице (перемешивание в течение 2 ч);
- Фасовка.

Для подтверждения эксплуатационных параметров смазки были проведены промышленные испытания на волочильном стане (рис. 2).

Для эксперимента применялась плакировальная проволока – заготовка диаметров 6,35 мм. Сердечник – стальная проволока марки 70 КК диаметром 5,5 мм производства ОАО «Северсталь МЕТИЗ» г. Череповец. Волочение проводилось до

диаметра 2,7 мм. На запуске скорость линии составила 2 м/с, смазка ложилась ровным слоем, сдиров и обрывов не наблюдалось. На рабочей скорости 5 м/с наработано 10600 м проволоки диаметром 2,7 мм.



Рис. 2. Волочильный стан

Заключение

1. Проведенные трибологические испытания на машине трения ЧМТ-1 позволили оптимизировать состав смазки для волочения. Сравнение трибологических характеристик у полученной смазки выше, чем у зарубежного аналога. При почти одинаковых пятнах износа, нагрузка сваривания для нового образца составила 700 кгс, а для зарубежного – 400 кгс.

2. Промышленные испытания на волочильном стане подтвердили требования к смазке, заданные техническим заданием – при скорости волочения более 5 м/с получена качественная продукция при минимальном износе канала волока.

- [1] Карелина М. Ю., Гайдар С. М. Исследование эффективности триботехнических препаратов на основе наноматериалов // Грузовик. – 2015. – № 4. – С. 17-29.
- [2] Гайдар С.М., Волков А.А., Карелина М.Ю. Адсорбция ФТОР-ПАВ и ее влияние на смазку трибосопряжений в условиях граничного и гидродинамического трения // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т. 118. – С. 113-124.
- [3] Эпиламированный пористый материал и способ его получения/ Гайдар С.М., Серяков А.В., Захаров Л.П., Васильев Д.Е.// Патент на изобретение RU 2283322 С1, 10.09.2006. Заявка № 2005120618/04 от 04.07.2005.
- [4] Бугакова Н.Ю., Гайдар С.М., Карелина М.Ю., Приходько В.М. Увеличение эксплуатационного ресурса сельхозтехники путем поверхностно-энергетической модификации поверхностей трибосопряжений фторуглеродными поверхностно-активными веществами // Технология металлов. – 2019. – № 4. – С. 24-31.
- [5] Противозносная 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 С1, 20.12.2005. Заявка № 2004115714/04 от 25.05.2004.
- [6] Эпиламированный графит и способ его получения/ Гайдар С.М. Патент на изобретение RU 2329946 С1, 27.07.2008. // Заявка № 2006146311/15 от 26.12.2006.
- [7] Гайдар С.М. Перспективы применения нанотехнологических добавок в смазочные материалы машин и оборудования лесного комплекса // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2012. – № 7. – С. 138-139.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНЦЕНТРАТА СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ

¹Гайдар С.М., ¹Пикина А.М.*, ²Черемушкин М.А.

* techmash@rgau-msha.ru

¹Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия;

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)» Москва, Россия.

Основным исходным сырьем для синтеза поверхностно-активных веществ являются жирные кислоты, получаемые из растительных и животных жиров (триглицеридов). Как известно поверхностно-активные вещества применяются в различных областях промышленности: моющие средства, ингибиторы коррозии, эмульгаторы, диспергаторы минералов, присадки к смазочным маслам и т.д. Универсальность этаноламидов позволяет широко использовать их также при получении смазочно-охлаждающих жидкостей, гидравлических, закалочных и других технологических жидкостей.

Ключевые слова: изнашивание, смазочные материалы, смазочно-охлаждающая жидкость, нанотехнологии.

Введение

В современном машиностроении применяется большое количество различных СОЖ. Чаще всего СОЖ применяется с целью уменьшения износа режущего инструмента, снижения температуры в зоне резания, и, в результате, применение СОЖ позволяет повысить производительность труда путем интенсификации режимов резания.

Использование в процессе механической обработки СОЖ значительно влияет на качество обработанной поверхности, в частности на шероховатость, глубину наклепанного слоя, степень его деформации, и, следственно, его механические свойства.

Шероховатость обработанной поверхности главным образом зависит от типа обработки, т.к. шероховатость формируется режущим инструментом и является следом режущего клина на поверхности детали. При механической обработке форма, направление и величина микронеровностей зависит от многих факторов, например, режимов резания, жесткости технологической системы, схемы обработки, применяемой технологической среды. Известно, например, что при точении низкоуглеродистых сталей на низких скоростях резания (менее 50 м/мин), при прочих равных условиях, шероховатость достигает максимального

INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF COOLANT CONCENTRATE

Gaidar S.M., Pikina A.M., Cheremushkin M.A.

The main raw materials for the synthesis of surfactants are fatty acids obtained from vegetable and animal fats (triglycerides). As is known, surfactants are used in various fields of industry: detergents, corrosion inhibitors, emulsifiers, mineral dispersants, additives to lubricating oils, etc. The versatility of ethanolamides makes it possible to widely use them also in the production of lubricants, hydraulic, quenching and other process fluids.

Keywords: wear, lubricants, coolant, nanotechnology.

значения ввиду сильного наростообразования на режущей кромке резца.

Таким образом, можно утверждать, что применяемые СОЖ должны влиять на широкий спектр параметров в процессе механической обработки. Помимо указанных выше параметров, СОЖ должна препятствовать наростообразованию на кромке режущего инструмента, а также повышать коррозионную стойкость деталей, т.е. СОЖ должны содержать ингибиторы коррозии и оказывать комплексное действие на обрабатываемую поверхность, что особенно актуально при межоперационной защите изделий.

Материалы и методы

В качестве исследуемых характеристик были выбраны момент и коэффициент трения. Определялись данные характеристики не только в зависимости от силы взаимного прижима деталей пары трения, параметром также являлась и концентрация действующего вещества в водном растворе.

На основе образцов СОЖ были получены эмульсии в различной пропорции: 3%, 6,5% и 10% концентрата в водном растворе. Стоит уточнить, что для всех выбранных СОЖ концентрация 10% является рекомендованной к применению для обработки большинства конструкционных материалов.

Результаты и обсуждение

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. Микроструктуры ролика и колодки представлены на рис. 1. На рис. 1а видна перлитно-ферритная структура колодки, на рис. 1б четко видна пластинчатая форма графита.

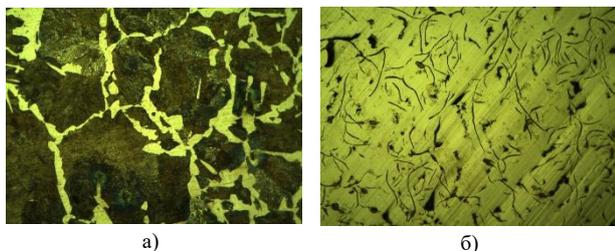


Рис. 1. Микроструктура элементов пары трения (а – колодка, б – ролик)

Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 23216-84. В процессе испытаний составы испытывались при различных значениях силы прижатия колодки к ролику. Сила прижатия изменялась от 200 Н до 1000 Н с шагом 200 Н. В процессе испытаний измерялся установившийся момент трения и в дальнейшем на его основе производился расчет коэффициента трения. Частота вращения ролика во всех испытаниях составляла 300 об/мин.

Полученные результаты представлены в таблицах 1-3. В табл. 1 представлена зависимость коэффициента трения от силы прижима образцов с концентрацией 3%. Аналогичные результаты для составов с концентрацией 6,5% представлены в табл. 2, для концентрации 10% представлены в табл. 3.

Заключение

На основании исследований можно утверждать, что СОЖ, состоящие преимущественно из минерального масла, не обеспечивают эффективного снижения трения, что может привести к ускоренному износу режущего инструмента. Также для подобных СОЖ концентрация 10% не является оптимальной с точки зрения снижения затрат на трение. Для снижения трения в процессе обработки с целью образования граничной пленки в зоне трения в состав СОЖ необходимо вводить ПАВ. Также из приведенных данных видно, что Образец-2 и Образец-3 показали очень близкие результаты практически на всех режимах испытания.

[1] Shlykov A.E. et al. Methodology and results of comparative atmospheric tests of experimental conservation composition //BIO Web of Conferences. – EDP Sciences, 2020. – Т. 17. – С. 00258.

Табл. 1. Зависимость коэффициента трения от силы прижима образцов. Концентрация составов 3%.

Сила прижима образцов Р, Н	Образец-1	Образец-2	Образец-3
	Коэф. трения	Коэф. трения	Коэф. трения
200	0,21	0,18	0,21
400	0,27	0,17	0,17
600	0,19	0,15	0,15
800	0,17	0,13	0,14
1000	0,14	0,11	0,12

Табл. 2. Зависимость коэффициента трения от силы прижима образцов. Концентрация составов 6,5%

Сила прижима образцов Р, Н	Образец-1	Образец-2	Образец-3
	Коэф. трения	Коэф. трения	Коэф. трения
200	0,3	0,18	0,21
400	0,27	0,15	0,165
600	0,2	0,165	0,15
800	0,19	0,12	0,135
1000	0,16	0,114	0,108

Табл. 3. Зависимость коэффициента трения от силы прижима образцов. Концентрация составов 10%

Сила прижима образцов Р, Н	Образец-1	Образец-2	Образец-3
	Коэф. трения	Коэф. трения	Коэф. трения
200	0,48	0,195	0,18
400	0,33	0,135	0,15
600	0,28	0,13	0,14
800	0,25	0,128	0,135
1000	Испытания остановлены, момент трения очень высок и нестабилен.	0,114	0,12

[2] Gaidar S. et al. Impact of operational factors on environmental safety of internal combustion engines //Transportation Research Procedia. – 2020. – Т. 50. – С. 136-144.

[3] Гайдар С.М., Свечников В.Н., Усманов А.Ю., Иванов М.И. Использование наноматериалов в качестве присадок к маслам для уменьшения трения в трибосопряжениях // Техника и оборудование для села. – 2013. – № 1. – С. 35-37.

[4] Tkachev E. et al. Effect of quenching and tempering on structure and mechanical properties of a low-alloy 0.25 C steel //Materials Science and Engineering: A. – 2023. – Т. 868. – С. 144757.

[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.

[6] Гайдар С.М., Чумаков А.Г. Перспективы применения нанотехнологий в двигателестроении // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 10(67). – С. 12-16.

[7] Гайдар С.М., Карелина М.Ю. Инновационное техническое средство для нанесения защитной молекулярной пленки на поверхность машин // Техника и оборудование для села. – 2015. – № 3. – С. 26-28.

[8] Посунько И.А., Пикина А.М. Влияние внутренних и внешних факторов на коррозионно-механическое изнашивание деталей топливной системы // Материалы международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 160-летию В.А. Михельсона, Москва, 09-11 июня 2020 года. Том 2. – М.: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2020. – С. 339-344.

ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАНАТНОЙ СМАЗКИ РОСОЙЛ-ТОРСИОЛ-35

¹Гильманов Т.И., ²Головин В.П., ²Абрамов А.Н.*, ²Тюленев Д.Г.

* rosoil@rosoil.ru

¹«Уфимский университет науки и технологий», Уфа, Россия;

²«Хозрасчетный творческий центр Уфимского авиационного института», Уфа, Россия.

В работе представлены результаты влияния противозадирной присадки на триботехнические характеристики канатной смазки Росойл-Торсиол-35. Определены трибологические свойства канатной смазки Росойл-Торсиол-35 с разным содержанием присадки на четырехшариковой машине трения. Представлены результаты влияния смазочного материала Росойл-Торсиол-35, с различным содержанием противозадирной присадки, на износостойкость стального каната. Полученные данные имеют практическое значение для разработки более эффективных канатных смазок.

Ключевые слова: износостойкость, стальной канат, присадка, испытание.

Введение

Канатная смазка играет огромную роль в составе конструкции стального каната. Смазка уменьшает трение между стальным канатом и блоками при передвижении, а также отдельными элементами каната, защищает от воздействия влаги и внешних негативно воздействующих факторов, тем самым увеличивая срок службы стального каната. Общеизвестно, что срок службы стального каната, пропитанного смазочным материалом, может быть в 2-3 раза больше, чем у канатов, эксплуатирующихся без смазочного материала. Для увеличения ресурса стальных канатов, их пропитывают смазочным материалом, в состав которого вводят различные функциональные присадки, такие как антикоррозионные, антифрикционные, противоизносные, противозадирные и т.п. [1-7].

В данной работе рассмотрено влияние противозадирной присадки на трибологические свойства канатной смазки Росойл-Торсиол-35 и износостойкость стального каната.

Материалы и методы

Для проведения данной работы был выбран смазочный материал Росойл-Торсиол-35 (ТУ 0254-076-06377289-2012), как наиболее универсальный

IMPROVING THE TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE ROPE LUBRICANT ROSOIL-TORSIOL-35

Gilmanov T.I., Golovin V.P., Abramov A.N., Tyulenev D.G.

The paper presents the results of the influence of the anti-seize additive on the tribological characteristics of the rope lubricant Rosoil-Torsiol-35. The tribological properties of the rope lubricant Rosoil-Torsiol-35 with different additive contents on a four-ball friction machine are determined. The results of the influence of the lubricant Rosoil-Torsiol-35, with different anti-seize additive contents, on the wear resistance of a steel rope are presented. The obtained data are of practical importance for the development of more effective rope lubricants.

Keywords: wear resistance, steel rope, additive, test.

смазочный материал, применяемый в нашей стране, а также противозадирная присадка ПЗ-5, разработанная сотрудниками лаборатории ООО «ХТЦ УАИ». Изготовлены три образца смазочного материала Росойл-Торсиол-35, с различным содержанием присадки: 0,25%, 0,5% и 3%.

Для исследования влияния противозадирной присадки на износостойкость стального каната, на ОАО «Белорецкий Металлургический Комбинат» был изготовлен стальной канат в соответствии с ГОСТ 2688-80 «Канаты двойной свивки типа ЛК-Р 6x19(1+6+6/6) + 1 о.с. Сортамент», марки 5,6-Г-I-Н-Р-1770. При изготовлении данного каната, его сердечник, проволока, пряди и канат в целом не пропитывались смазочным материалом.

Оценка трибологических свойств смазочного материала проводилась на четырехшариковой машине трения (ЧМТ-1) по ГОСТ 9490-75, узел трения которой представляет собой пирамиду из четырех контактирующих друг с другом стальных шариков.

Испытания на износостойкость стального каната проводились на пробегной машине по ГОСТ 2387-80 и по методу, описанному в работах [8,9,10], с периодическим окунанием каната в 5%-ый раствор NaCl.

Результаты и обсуждение

Трибологические свойства смазочного материала были определены на четырехшариковой машине трения по ГОСТ 9490-75, на стальных шариках диаметром $\varnothing 12,7$ мм, изготовленных из стали ШХ-15, результаты испытаний приведены в табл. 1.

Табл. 1. Трибологические свойства смазочного материала

№	Образец	Рс, кгс	Рк, кгс	Ди при 20 кгс, мм	Ди при 40 кгс, мм
1	Росойл-Торсиол-35	200	80	0,72	1,02
2	Росойл-Торсиол-35+0,25% ПЗ-5	266	80	0,40	0,61
3	Росойл-Торсиол-35+0,5% ПЗ-5	335	84	0,39	0,75
4	Росойл-Торсиол-Т-35+3% ПЗ-5	596	94	0,53	0,79

По результатам испытаний выявлено, что добавление противозадирной присадки ПЗ-5, позволяет увеличить значение нагрузки сваривания исходного смазочного материала почти в три раза, при этом зависимость нагрузки сваривания, прямо пропорциональна количественному содержанию присадки. Критическая нагрузка, максимально увеличилась на 17,5% по отношению к исходному смазочному материалу.

Минимальное значение диаметра пятна износа, при нагрузке 20 кгс, было получено при испытании смазочного материала, содержащего 0,5% противозадирной присадки. При этом, значение диаметра пятна износа уменьшилось в 1,85 раза, по отношению к исходному смазочному материалу.

Минимальное значение диаметра пятна износа, при нагрузке 40 кгс, было получено при испытании смазочного материала, содержащего 0,25% противозадирной присадки. При этом, значение диаметра пятна износа уменьшилось в 1,67 раза, по отношению к исходному смазочному материалу.

Для исследования влияния смазочного материала Росойл-Торсиол-35, с различным содержанием противозадирной присадки, на износостойкость стального каната, подготовленные образцы стального каната диаметром 5,6 мм, пропитывались при температуре на 20°C выше температуры каплепадения смазочного материала и выдерживались в течении суток.

Испытания проводились на машине при скорости вращения барабана 120 колебаний в минуту, обеспечивающий возвратно-поступательное перемещение образца на длине 350 мм. Нагрузка на одну ветвь каната составляла 245 Н. Сменные ролики, диаметром 55 мм, обеспечивали изгиб

испытуемого образца на 90°. Диаметр сменных роликов и нагрузка на одну ветвь каната выбирались в зависимости от диаметра каната по ГОСТ 2172-80 «Канаты стальные авиационные. Технические условия».

Износостойкость стального каната оценивалась по количеству перегибов образца до его полного разрушения.

Для более доступного анализа и интерпретации полученных данных, построены гистограммы результатов испытаний. Результаты испытаний стальных канатов по ГОСТ 2387-80 представлены на рис. 1.

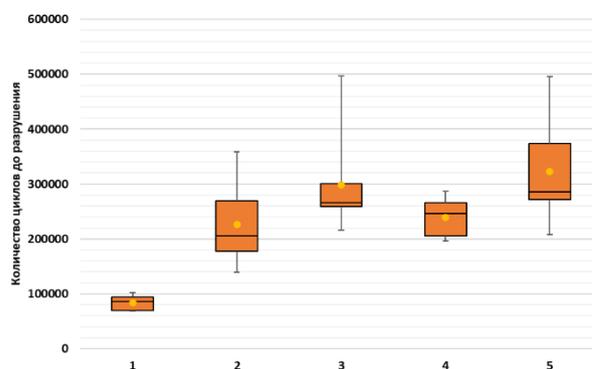


Рис. 1. Результаты испытания стального каната по ГОСТ 2387-80
 1 – канат без смазочного материала; 2 – канат пропитанный Росойл-Торсиол-35; 3 – канат пропитанный Росойл-Торсиол-35 с 0,25% присадки; 4 – канат пропитанный Росойл-Торсиол-35 с 0,5% присадки; 5 – канат пропитанный Росойл-Торсиол-35 с 3% присадки

Результаты испытаний стальных канатов с периодическим окунанием каната в 5%-ый раствор NaCl представлены на рис. 2.

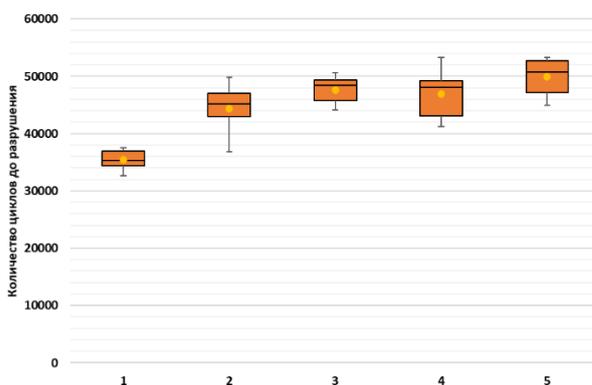


Рис. 2. Результаты испытания стального каната с периодическим окунанием в 5%-ый раствор NaCl
 1 – канат без смазочного материала; 2 – канат пропитанный Росойл-Торсиол-35; 3 – канат пропитанный Росойл-Торсиол-35 с 0,25% присадки; 4 – канат пропитанный Росойл-Торсиол-35 с 0,5% присадки; 5 – канат пропитанный Росойл-Торсиол-35 с 3% присадки

При проведении испытаний установлено, что применение смазочного материала, позволяет увеличить долговечность стального каната, минимум в 2,7 раза при испытании по ГОСТ 2387-80 и в 1,2 раза при периодическом окунании каната в 5%-ый раствор NaCl.

В результате испытаний выявлена зависимость износостойкости стального каната от количественного содержания противозадирной присадки в смазочном материале.

Износостойкость стального каната, испытанного по ГОСТ 2387-80, увеличивается минимум на 5,5% и максимально на 42%, при добавлении противозадирной присадки в количестве 0,25% и 3 % соответственно, по отношению к исходному смазочному материалу.

Износостойкость стального каната, испытанного при периодическом окунании каната в 5%-ый раствор NaCl, увеличивается минимум на 5,7% и максимально на 12,5%, при добавлении противозадирной присадки в количестве 0,5% и 3 % соответственно, по отношению к исходному смазочному материалу.

На рис. 3 представлена зависимость количества циклов до разрушения стального каната от концентрации присадки ПЗ-5 в смазочном материале Росойл-Торсиол-35.

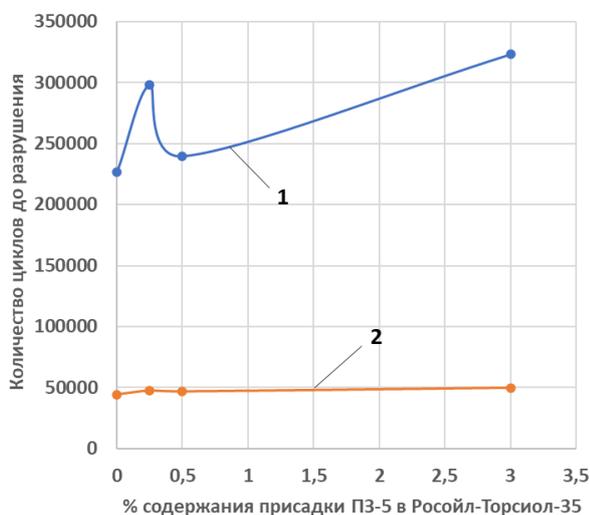


Рис. 3. Зависимость количества циклов до разрушения стального каната от концентрации присадки ПЗ-5 в смазочном материале Росойл-Торсиол-35

1 – при испытаниях по ГОСТ 2387-80,
2 – при испытаниях с периодическим окунанием каната в 5% раствор NaCl.

Заключение

Применение противозадирной присадки ПЗ-5, позволило повысить триботехнические характеристики канатной смазки Росойл-Торсиол-35.

Установлено, что добавление противозадирной присадки в канатную смазку Росойл-Торсиол-35 повышает износостойкость стального каната.

[1] Синицын В.В. Подбор и применение пластичных смазок, 2 изд. –М.: Химия, 1974. – 414 с.

[2] Кошкин А.П., Трифанов Г.Д. Канаты для подъемных установок. 2-е изд. перераб. и доп. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политех. ун-та, 2014. – 107 с.

[3] Уход и обслуживание проволочных канатов / [Электронный ресурс] // Zokescrane: [сайт]. — URL: <https://www.zokescrane.com/ru/posts/3724/?ysclid=m2ijw7ta7v800049108> (дата обращения: 28.09.2024).

[4] Мархель И.И. Крановые канаты. – М.: Машиностроение, 1983. – 128 с.

[5] Feyrer K. Wire Ropes. – Berlin-Heidelberg: Springer Verlag, 2007. – 322 с.

[6] Mironenko A., Shpakov I. Wire Ropes Condition Monitoring: Conception and Implementation// Proceedings of 19 Int. Conf. VVaPol. – Podbanske, 2016. – С. 7-13.

[7] Chaplin CR. Prediction of Fatigue Endurance of Wire Ropes Subject to Fluctuating Tension // OIPEEC Bulletin. –1995. – №. 70. – С. 31-40.

[8] Патент РФ №2640319 от 27.12.2017 Пат. 2463577 Российская Федерация, МКП:G01N19/02. Способ и устройство для испытания канатов на выносливость в жидких и агрессивных средах и при различных температурах/ Шолом В.Ю., Никольская В.В., Абрамов К.А. и др.; заявитель и патентообладатель ООО ХТЦ УАИ - №2016122006; заявл.02.06.2016;опубл. 27.12.2017. Бюл. № 20.

[9] Шолом В. Ю., Крамер О. Л., Головин В. П., Корнилова О. П., Абрамов А.Н., Вагапов Р.Ф. Влияние смазочного материала на износостойкость стальных канатов, эксплуатирующийся в коррозионно-активных средах. // Письма о материалах. – 2021. Т. 11. – № 2. – С.125-128.

[10] Шолом В.Ю. Усталостные испытания стальных проволочных канатов // Трибология - машиностроению: Труды XII Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию ИМАШ РАН, Москва, 19–21 ноября 2018 года. – Ижевск: Ижевский институт компьютерных исследований, 2018. – С. 577-580.

ВЛИЯНИЕ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

¹Головин В.П., ¹Шолом В.Ю*., ²Жернаков В.С., ³Гильманов Т.И.

* rosoil@rosoil.ru

¹Хозрасчетный творческий центр Уфимского авиационного института, Уфа, Россия;

²Академия наук Республики Башкортостан, Уфа, Россия;

³Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Россия.

В работе представлены результаты влияния различных смазочных материалов на долговечность стальных канатов, с учетом различных климатических условий. Представлена зависимость, числа циклов стального каната до разрушения, при изгибе на шкивах, в зависимости от воздействия на канат смазочного материала и внешних климатических условий. При этом определены значения коэффициентов, позволяющие рассчитать ресурс (число циклов) изгиба стального каната, при работе на шкивах, до разрушения, в зависимости от применяемого смазочного материала и внешних климатических условий эксплуатации.

Ключевые слова: стальной канат, канатные смазки, износостойкость, долговечность, пробегная машина.

Введение

При использовании стальных канатов в промышленности, всегда стояла проблема определения его долговечности (ресурса). В начале XX века было экспериментально установлено, что на ресурс стального каната влияет: отношение диаметра каната к диаметру огибаемого блока или барабана, а также количество перегибов каната на блоке.

В нашей стране такие работы проводились профессором Житковым Д.Г., были предложены зависимости для определения ресурса стальных канатов отечественного производства. В исследованиях учитывались следующие факторы: металлургические, технологические, конструктивные, эксплуатационные. Целью исследований было установление зависимостей ресурса канатов в числе перегибов на блоках N , от усилия растяжения F и отношения d/D , а также от названных выше факторов. Такие исследования проводились и в последующем, их результаты приведены в многочисленных работах [1-5].

В 1961-1965 годы во ВНИИнефтемаше на пробегной машине был проведен комплекс работ

EVALUATION OF THE DURABILITY OF STEEL ROPES, TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF LUBRICANT AND VARIOUS CLIMATIC CONDITIONS

Golovin V.P., Sholom V.Yu., Zhernakov V.S., Gilmanov T.I.

The paper presents the results of assessing the durability of steel ropes, taking into account the influence of various lubricants, in different climatic conditions. The physical dependence is presented: the number of cycles of bending the steel rope before destruction, when working on pulleys, depending on the lubricant used and external climatic effects on the steel rope. The values of coefficients allowing to calculate the number of cycles of bending of steel rope, when working on pulleys, before destruction, depending on the used lubricant and external climatic conditions of operation are determined.

Keywords: steel rope, rope lubricants, wear resistance, durability, running machine.

по выявлению усталостных характеристик талевого каната при работе на шкивах. Данные экспериментов представлены в табл. 1.

Обработка статистических данных показала, что число циклов изгибов каната до разрушения при работе на шкивах выражается зависимостью:

$$N = \left(\frac{D}{d}\right)^k * C, \quad (1)$$

где N – число изгибов каната до разрушения, D – диаметр шкива, d – диаметр каната; $k = 2,5 \dots 3$ – показатель степени, $m = 1,7$ – показатель степени кривой усталости каната, T – усилие в канате, C – коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции и типоразмера каната» [6].

На данный момент отсутствует методика оценки влияния смазочного материала на долговечность стального каната. В данной работе предпринята попытка разработать такую методику, которая позволит рассчитывать число циклов изгибов стального каната до разрушения при работе на шкивах, учитывающая влияние смазочного материала и внешние условия эксплуатации [7].

Табл. 1. Показатели испытаний на усталость талевых канатов с органическим сердечником при изгибах на шкивах

Диаметр каната d_k , мм	Предел прочности материала проволоки, МПа	Растягивающее усилие в канате T , кН	Число циклов изгибов каната до разрушения N	Коэффициент пропорциональности C
25	1666	105,5	$44,8 \times 10^3$	$2,64 \times 10^3$
28	1666	93,3	$69,2 \times 10^3$	$4,65 \times 10^3$
32	1666	122,3	$51,2 \times 10^3$	$8,14 \times 10^3$

Методы испытания на выносливость и материалы

ГОСТ 2172-80 «Канаты стальные авиационные. Технические условия (с Изменениями № 1-5)» предусматривают при приемке стального каната его испытание на выносливость по ГОСТ 2387-80 «Канаты стальные. Методы испытания на выносливость». Данный метод заключается в испытании стального каната на машине, по предложенной схеме рис. 1.

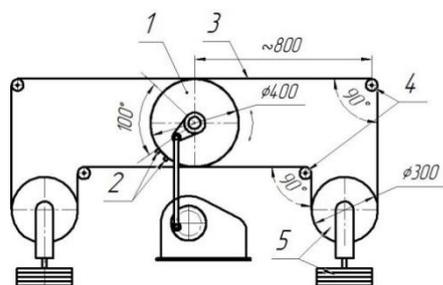


Рис. 1. Схема машины для испытания стальных канатов на выносливость

1 – ведущий барабан, 2 – зажимы, 3 – испытуемый образец, 4 – сменные ролики, 5 – грузовой ролик с грузом

Однако, данный метод не учитывает влияние смазочного материала, нанесенного на стальной канат и внешние условия эксплуатации на его долговечность [8].

Для их учета, авторы данной работы предлагают в формулу (1) добавить дополнительные коэффициенты C_1 и K , тогда формула примет вид:

$$N = \left(\frac{D}{d}\right)^k * C * C_1 * K, \quad (2)$$

где C_1 – коэффициент характеризующий свойства смазочного материала, K – коэффициент учитывающий внешние условия эксплуатации.

Для определения коэффициентов C_1 и K имеются способ и устройство для испытания стальных канатов на выносливость в жидких агрессивных средах, при повышенных или пониженных температурах [9-10].

Для определения значений коэффициентов C_1 и K , был использован стальной канат марки 5,6-Г-1-Н-Р-1770 изготовленный по ГОСТ 2688-80 «Канаты двойной свивки типа ЛК-Р 6×19(1+6+6/6)+1 о.с. Сортамент», при его изготовлении, на сердечник, пряди и канат в целом смазочный материал не наносился.

Для определения значений коэффициента C_1 использовалась канатная смазка Росойл-Торсиол-55, изготовленная по требованию ГОСТ 20458-2022 «Смазка Торсиол-55. Технические условия», а также канатная смазка Росойл-Торсиол-35, изготовленная по ТУ 0254-076-06377289-2012.

Результаты и обсуждение

На первом этапе производились испытания в соответствии с ГОСТ 2387-80 «Канаты стальные. Метод испытания на выносливость», при малоцикловом нагружении, при скорости вращения барабана 120 колебаний в минуту, обеспечивающий возвратно-поступательные перемещения образца на длине примерно 350 мм. Нагрузка на одну ветвь каната составляла 245 Н. Сменные ролики диаметром $D = 55$ мм, обеспечивали изгиб образца на 90° . Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Табл. 1. Среднее количество изгибов образца до полного разрушения, определенное по ГОСТ 2387

Образец	\bar{X}
Без смазки	141 089
Пропитанный смазкой Росойл-Торсиол-35	405 754
Пропитанный смазкой Росойл-Торсиол-55	269 904

Полученные данные, можно использовать для расчета коэффициента C , для определенного типа стального каната. В нашем случае, для стального каната марки 5,6-Г-1-Н-Р-1770.

Для исследуемого стального каната, без смазочного материала и в нормальных климатических условиях, значения коэффициентов C_1 и K будут равны единице, а значение коэффициента пропорциональности C , рассчитанное исходя из формулы (2), составит 27,05.

Определенное значение коэффициента C и результаты испытаний износостойкости на пробной машине, стального каната, пропитанного смазочными материалами, позволяют рассчитать значение коэффициента C_1 , которые составят 2,875 и 1,913 для смазок Росойл-Торсиол-35 и Росойл-Торсиол-55 соответственно.

Сравнивая полученные результаты значений C и C_1 , с результатами полученными предыдущими исследователями, можно предположить, что коэффициент пропорциональности имеет функциональную зависимость от диаметра каната $C = f(d)$ рис. 3, из которой видно, что определенные

нами значения коэффициентов соответствует данной зависимости.

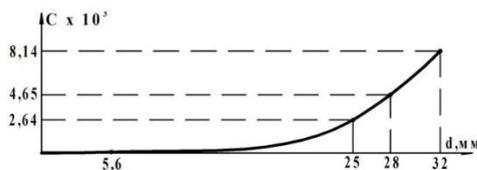


Рис. 3. Зависимость коэффициента пропорциональности от диаметра каната

Используя значения коэффициентов C и C_1 , можно определить коэффициент K , используя результаты испытаний стального каната при минус 60 °С, приведенные в табл. 2.

Значения коэффициента K будут равны 0,973, 0,590 и 1,286 для стального каната без смазочного материала, пропитанного смазками Росойл-Торсиол-35 и Росойл-Торсиол-55 соответственно. Аналогичным образом, используя результаты испытаний в морской воде, приведенные в табл. 3, определяем значения коэффициента K . Значения K будут равны 0,291, 0,132 и 0,202 для стального каната без смазочного материала, пропитанного смазками Росойл-Торсиол-35 и Росойл-Торсиол-55 соответственно.

Таким образом, проведя серию испытаний в лабораторных условиях, можно определить значения коэффициентов C , C_1 и K формулы (2), которые будут соответствовать определенному типу стального каната, смазочному материалу, применяемого для пропитки каната и внешним условиям его эксплуатации. Полученные коэффициенты приведены в табл. 4.

Имея значения коэффициентов и эксплуатационные характеристики стального каната,

Табл. 4. Значения коэффициентов

Коэффициент / Образец		Без смазочного материала	Росойл-Торсиол-35	Росойл-Торсиол-55
C		27,05		
C_1		1	2,875	1,913
K	При нормальных климатических условиях	1		
	При температуре минус 60°С	0,973	0,590	1,286
	При воздействии морской воды	0,291	0,132	0,202

[1] Глушко М.Ф. Стальные подъемные канаты. – Киев: Техника, 1966. – 327 с.
 [2] Малиновский В.А. Стальные канаты. – Одесса: Астропринт, 2001. 188 с.
 [3] Маршель И.И. Крановые канаты. – М.: Машиностроение, 1983. – 128 с.
 [4] Будрин С. Б. Ресурс стальных канатов грузоподъемных машин // Проблемы транспорта Дальнего Востока. Доклады научно-практической конференции. – 2019. – Т. 1. – С. 66-71.
 [5] Feyrer K. Wire Ropes. – Berlin-Heidelberg: Springer Verlag. - 2007. – 322 с.
 [6] Ефимченко С.И. Расчеты ресурса несущих элементов буровых установок: учебное пособие. - М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2001 г. – 171 с.
 [7] Агеев А.Г. Козлов В.В., Гарюнов Д.С. Обзор методов испытаний стальных авиационных тросов на выносливость //

по формуле (2), можно рассчитать долговечность стального каната до разрушения при работе на шкивах, в зависимости от применяемого смазочного материала и внешних условий эксплуатации.

Табл. 2. Среднее количество изгибов образца до полного разрушения, определенное при температуре минус 60 °С

Образец	\bar{X}
Без смазки	137366
Пропитанный смазкой Росойл-Торсиол-35	239192
Пропитанный смазкой Росойл-Торсиол-55	347165

Табл. 3. Среднее количество изгибов образца до полного разрушения, определенное при воздействии морской воды

Образец	\bar{X}
Без смазки	41066
Пропитанный смазкой Росойл-Торсиол-35	53412
Пропитанный смазкой Росойл-Торсиол-55	54661

Заключение

Разработана методика определения значений коэффициентов C_1 и K , позволяющая рассчитать число циклов изгиба стального каната, определенного типа, до разрушения, в зависимости от применяемого смазочного материала и внешних условий эксплуатации.

Установлено, что смазочный материал положительно влияет на долговечность стального каната, увеличивая ее минимум в 1,9 раза при испытании в нормальных климатических условиях, в 1,7 раза при воздействии отрицательной температуры и в 1,3 раза при воздействии морской воды, по отношению к несмазанному канату.

Авторы работы считают, что необходимо продолжить данную работу для набора большего числа статистических данных.

XXVI Туполевские чтения (школа молодых ученых): Материалы Международной молодежной научной конференции. Сборник докладов. – Казань: ИП Сагиев А.Р., 2023. – С. 8-11.
 [8] Шолом В.Ю., Крамер О.Л., Головин В.П. и др. Методы испытаний низкотемпературных свойств смазочных материалов для канатов // Письма о материалах. – 2021. – Т. 11. – № 2 (42). – С. 187-191. DOI: 10.22226/2410-3535-2021-2-187-191.
 [9] Патент № 2640319 Российская Федерация, МПК G01N 3/08. Способ и устройство для испытания канатов на выносливость в жидких агрессивных средах и при разных температурах: № 2016122006: заявл. 02.06.2016: опубл. 27.12.2017 / В.Ю. Шолом, В.В. Никольская, К.А. Абрамов [и др.]; заявитель ООО ХТЦ УАИ.
 [10] Абрамов А.Н., Шолом В.Ю., Крамер О.Л., Головин В.П. Стендовые ресурсные испытания стальных канатов // Письма о материалах. – 2020. – Т. 10. – № 2(38). – С. 195-199. DOI: 10.22226/2410-3535-2020-2-195-199.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ СРЕДЫ НА КОНТАКТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ИЗНАШИВАНИЕ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ

Горячева И.Г.

goryache@ipmnet.ru

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

Разработаны модели контактного взаимодействия и контактно-усталостного изнашивания упругих тел в условиях трения качения при наличии между взаимодействующими телами тонкого деформируемого слоя (покрытия). Проведен анализ влияния механических и геометрических характеристик поверхностного слоя, а также условий контактного взаимодействия (коэффициент трения скольжения, величина относительного проскальзывания) на силу сопротивления и скорость накопления контактно-усталостных повреждений в условиях трения качения.

Ключевые слова: трение качения, деформируемый поверхностный слой, контактно-усталостное изнашивание.

Одним из способов управления трением и изнашиванием деформируемых тел в условиях трения качения является нанесение на поверхности контактирующих тел тонких деформируемых слоев из более мягкого материала. Целью проведенных в [1-3] исследований являлось построение модели контактного взаимодействия в условиях качения с проскальзыванием двух упругих тел при наличии на поверхности одного из них деформируемого слоя и анализ влияния механических характеристик слоя и его толщины на распределение контактных и внутренних напряжений в упругом теле и скорость накопления в нем контактно-усталостных повреждений.

Постановка контактной задачи и метод ее решения

Рассматривается (рис. 1) качение в направлении оси Ox упругого шара радиуса R (1) по упругому полупространству (2) из того же материала, на поверхности которого находится тонкий деформируемый слой (3). Для описания податливости слоя в нормальном (по оси Oz , см.рис.1) и касательном (по направлению оси Ox) направлениях применяются одномерные модели Винклера, Максвелла и Кельвина.

Граничные условия в области контакта задаются отдельно для подобласти проскальзывания, в которой выполняется закон трения Кулона-Амонтона, и подобласти сцепления, в

MODELLING OF THE INTERMEDIATE LAYER EFFECT ON CONTACT CHARACTERISTICS AND WEAR OF DEFORMABLE SOLIDS IN ROLLING FRICTION

Goryacheva I.

The models of rolling friction and contact fatigue wear of elastic solids in the presence of the intermediate deformable layer are developed. The combined effects of the mechanical and geometrical surface layer properties and the contact conditions (sliding friction coefficient, relative slippage) on friction force and contact fatigue damage accumulation rate in rolling friction are analyzed.

Keywords: rolling friction, deformable surface layer, contact fatigue wear.

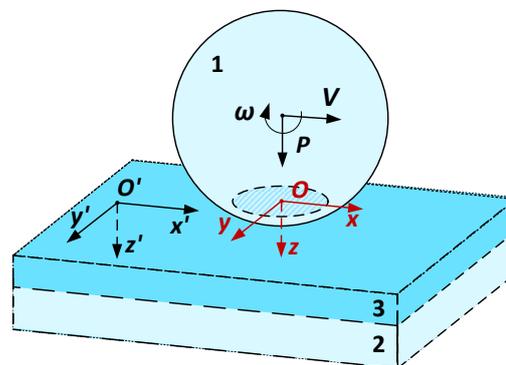


Рис. 1. Схема контакта

которой выполняется условие равенства нулю относительных скоростей проскальзывания контактирующих точек взаимодействующих тел.

В предположении, что влияние касательных контактных напряжений на распределение контактных давлений незначительно, для определения последних используется теория Герца, если нормальной податливостью промежуточного слоя можно пренебречь. При заданной упругой податливости промежуточного слоя задача определения контактных давлений сводится к решению интегрального уравнения второго рода, в котором внеинтегральный член описывает податливость слоя [4]. После определения контактных давлений распределение касательных напряжений рассчитывается вариационным методом [5].

Зависимость контактных напряжений и коэффициента сцепления от механических характеристик промежуточного слоя

Проведенный численный анализ распределения контактных напряжений при разных механических характеристиках промежуточного слоя показал, что свойства слоя существенно влияют на характер распределения контактных напряжений и на величину и расположение подобластей сцепления и проскальзывания в области контакта, что, в свою очередь, оказывает влияние на зависимость коэффициента сцепления T/P в условиях трения качения от величины относительного проскальзывания $\Delta = (V - \omega R) / V$: с увеличением Δ коэффициент сцепления, как известно, изменяется от 0 до величины коэффициента трения скольжения μ . На основании предложенной модели можно управлять коэффициентом сцепления, увеличивая диапазон угловых скоростей, обеспечивающих режим качения.

Моделирование образование контактно-усталостных повреждений

В условиях циклических перемещений катка по деформируемому основанию (рис. 1) в материалах контактирующих тел возникает циклическое поле напряжений, что может приводить к накоплению в них повреждений и их разрушению по контактно-усталостному механизму. Основные этапы моделирования этого процесса изложены в [4]. Они включают в себя расчет контактных и внутренних напряжений в упругом теле с последующим применением критериев накопления повреждений. Как правило, эти критерии зависят от амплитудных значений характерных напряжений (например, максимальных касательных напряжений) и прочностных характеристик материала.

На рис. 2 приведены зависимости амплитудных значений максимальных касательных напряжений в упругом основании от расстояния от поверхности контактного взаимодействия в условиях качения при разных значениях коэффициента трения скольжения и величинах относительного проскальзывания. Результаты расчетов показывают, что исследуемая функция при нулевом коэффициенте трения скольжения имеет только подповерхностный максимум, а при коэффициенте трения скольжения $\mu = 0,3$ – два максимума: на поверхности и под поверхностью. При этом с увеличением величины относительного проскальзывания величина амплитудных значений максимальных касательных напряжений на поверхности возрастает. Анализ внутренних напряжений показал также, что увеличение толщины поверхностного слоя

уменьшает амплитудные значения максимальных касательных напряжений в материалах катка и основания.

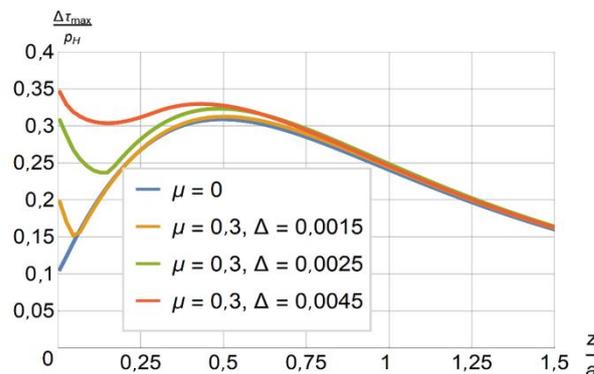


Рис. 2. Зависимость амплитудных значений максимальных касательных напряжений от глубины при разных значениях коэффициента трения μ и величинах относительного проскальзывания Δ

Таким образом, изменяя свойства поверхностного слоя можно влиять на глубину зарождения контактно-усталостных повреждений и характер изнашивания материалов взаимодействующих тел при заданных условиях контактного взаимодействия.

Выводы

Разработанная модель позволяет в условиях качения с проскальзыванием

- изучить влияние механических характеристик поверхностного слоя и его толщины на распределение контактных напряжений и силу трения при различных условиях взаимодействия (нагрузка, величина относительного проскальзывания, коэффициент трения скольжения);
- предсказать глубину зарождения контактно-усталостных повреждений в материалах взаимодействующих тел в зависимости от условий на контакте, включая наличие поверхностного слоя с заданными механическими и геометрическими характеристиками;
- разработать требования к свойствам поверхностного слоя, которые обеспечат повышение функциональных характеристик и контактно-усталостной долговечности пар трения качения.

Благодарности

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

- [1] Goryacheva I.G., Miftakhova A.R. Modelling of the viscoelastic layer effect in rolling contact // Wear. – 2019. – Т. 430. – С. 256-262.
- [2] Мещерякова А.П., Горячева И.Г. Напряженное состояние упругих тел в условиях качения с проскальзыванием при наличии промежуточного слоя // Физическая мезомеханика. – 2020. – Т. 23. – № 6. – С. 91-101.

- [3] Goryacheva I.G., Miftakhova A.R. Modelling of third body effect on rolling contact fatigue damage // Mechanics research communications. – 2022. – Т. 124.
[4] Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. – М.: Наука, 2001. – 478 с.

- [5] Гольдштейн Р.В., Зазовский А.Ф., Спектор А.А., Федоренко Р.П. Решение вариационными методами пространственных контактных задач качения с проскальзыванием и сцеплением // Успехи механики. – 1982. – Т. 5. – № 3/4. – С. 60-102.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВАЛИКОВ И ОСЕЙ ТОРМОЗНОЙ РЫЧАЖНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОВЗОВ

Даровской Г.В.*, Бобриков Ю.В., Шеховцов К.В.

* graffDAROVSKOI@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия.

Разработана технология восстановления износостойкой наплавки валиков тормозной рычажной передачи тягового подвижного состава железнодорожного транспорта путем применения легирующего керамического флюса. Установлено, что для достижения необходимой твердости наплавленного слоя наиболее предпочтительным компонентом флюса является релит (карбид вольфрама).

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, тормозная передача, ремонт, тела вращения, износостойкость, дуговая сварка, керамический флюс.

Введение

Тормозная система любого механизма является одним из важнейших элементов безопасности эксплуатации конкретного оборудования. В полной мере это относится и к безопасности работы тягового и нетягового подвижного состава железнодорожного транспорта.

При плановых видах ремонта электровозов серии ВЛ80в/и, ЭП-1, ЭП-1М, 2ЭС4К, 2ЭС5К возникает необходимость износостойкого восстановления валиков тормозной передачи, номенклатура которых по геометрическим параметрам и технологическим свойствам более десяти различных наименований.

Рабочая поверхность валиков и осей тормозной рычажной передачи должна иметь твердость 45...62 HRC₃ (рис. 1).

Цели и задачи исследования

Целью данной работы является разработка технологии восстановления валиков и осей тормозной рычажной передачи электровозов.

IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY OF RESTORATION OF ROLLERS AND AXLES OF THE BRAKE LEVERAGE OF ELECTRIC LOCOMOTIVES

Darovskoy G.V., Bobrikov U.V., Shekhovtsov K.V.

A technology has been developed for restoring wear-resistant surfacing of brake lever transmission rollers of traction rolling stock of railway transport by using alloying ceramic flux. It has been established that relit (tungsten carbide) is the most preferable component of the flux to achieve the required hardness of the deposited layer.

Keywords: railway transport, brake transmission, repair, rotating bodies, wear resistance, arc welding, ceramic flux.

Для этого необходимо проанализировать существующие методы восстановления валиков и осей тормозной рычажной передачи, оценить их преимущества и недостатки.

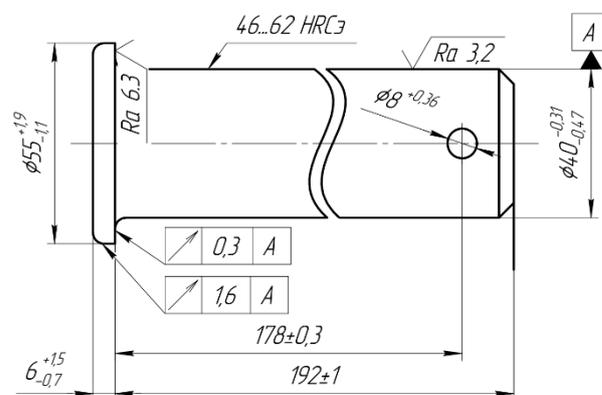


Рис 1. Ось тормозной рычажной передачи, черт. ДТЖИ.715 312.013 (8ТН.200.352.)

Материалы и методы исследований

Геометрическая простота изделия в данном случае не показательна, т.к. не она определяет сложности при проектировании технологического процесса восстановления изношенной поверхности изделия. Основная сложность состоит в применении стали 45, которая содержит углерод от 0,42 % до 0,5 %. Стали с содержанием углерода 0,26...0,46 % относятся к среднеуглеродистым улучшаемым сталям, а при содержании углерода свыше 0,46 % - к высокоуглеродистым сталям. Т.о., Сталь 45 находится на стыке между средне- и высокоуглеродистыми сталями.

По свариваемости сталь 45 относится к трудно свариваемым материалам. Основная причина ухудшения свариваемости состоит в возможности образования холодных трещин. Они образуются в основном по зоне термического влияния, где возникают благоприятные условия для формирования закалочных структур, прежде всего – мартенсита. В сочетании с возникающими при сварке напряжениями растяжения такие условия приводят к образованию холодных (закалочных) трещин, т.е. к местному разрушению материала в зоне сварки. Для предотвращения возможности возникновения такого рода дефектов изделие (в нашем случае валики и оси) необходимо предварительно подогреть до температуры 200...250 °С для снижения скорости охлаждения. Такая операция позволяет избежать возможного формирования мартенситной структуры. При этом в процессе сварки температура изделия не должна падать ниже 200 °С, т.е. должен обеспечиваться сопутствующий подогрев. После наплавки изделие необходимо медленно охлаждать или незамедлительно подвергать требуемой термической обработки.

Другим усложняющим фактором проектирования технологического процесса восстановления валика является требование к высокой твёрдости восстановленной поверхности (HRC, 46...63). Твёрдость стали на уровне 60 ед. HRC обеспечивает мартенситная структура стали. Такая высокая твёрдость приводит к большой вероятности образования холодных трещин в наплавленном слое.

Технологически мы имеем небольшой выбор имеющихся способов восстановления (наплавки) валика. К ним относятся дуговые способы наплавки: ручная, в среде защитных газов, порошковой проволокой и под флюсом.

В случае применения ручной дуговой наплавки необходимо правильно выбрать сварочные

материалы. В нашем случае можем использовать, например, наплавочные электроды марки ЭН-60М, которые обеспечивают твёрдость наплавленного слоя в диапазоне 53...61 HRCэ. Технология наплавки такими электродами подразумевает применение предварительного и сопутствующего подогрева около 400 °С. Поскольку сварщик вынужденно находится в зоне наплавки, то санитарно-технологические условия его труда существенно ухудшаются. Производительность процесса весьма низкая. Поэтому такую технологию не следует рекомендовать для серийного восстановления валиков.

Кроме того, в соответствии с ремонтной документацией, при выполнении сварочных и наплавочных работ на ответственных деталях железнодорожного подвижного состава рекомендуется применение механизированных способов восстановления, куда относятся остальные методы и подразумевают применение широкой номенклатуры установок для наплавки тел вращения, выбор которых достаточно широк. Принцип работы такого оборудования состоит в обеспечении вращательного движения заготовки (валика) и продольного перемещения плавящегося электрода. Для наплавки валиков диаметром до 100 мм чаще всего используют кинематическую схему, которая обеспечивает формирование наплавленного слоя по винтовой поверхности. Частота вращения изделия будет определять скорость наплавки (с учётом диаметра наплавленной поверхности), а подача, т.е. продольное перемещение электрода, обеспечивает формирование наплавленного слоя по всей поверхности изделия.

Наплавку можно производить с использованием самозащитной порошковой проволоки, например, марки ПП-Нп-40Х4Г2СМНТФ, которая обеспечивает твёрдость наплавленного слоя HRC 49,5-57,0. Основным недостатком наплавки порошковой проволокой является повышенное разбрызгивание наплавленного металла.

Применение для наплавки защитного газа маловероятно для выполнения требуемых условий. Использование углекислого газа приведёт к окислению легирующих элементов в наплавленном слое, а применение инертных газов требует высокой степени легирования от присадочного материала (электродной или присадочной проволоки) [1].

Результаты и обсуждение

Использование сварки (наплавки) под флюсом требует применения легирующих керамических флюсов [2]. В этом случае в качестве электродной проволоки можно использовать углеродистую или

низколегированную сталь таких марок как Св-08, Св-08А, Св-08Г2С и др. Необходимое легирование наплавляемого слоя обеспечивается введением в состав керамического флюса различных порошковых компонентов, таких как различного рода ферросплавы, чистые металлы или химические соединения (например, карбиды) [3, 4].

На рис. 2 представлено три варианта упрочнения поверхности валика. Упрочнение наплавленного слоя до требуемого значения твёрдости может быть достигнуто при легировании сварочного флюса феррохромом около 30 % по массе этого компонента во флюсе. В случае введения алюминиевого порошка в высоко активный флюс наплавленный слой легируется восстановленными элементами (кремнием и марганцем) из оксидов кремния и марганца, которые находятся в составе флюса. Для достижения необходимой твёрдости на поверхности изделия в составе керамического флюса должно находиться около 7,5 % алюминия.

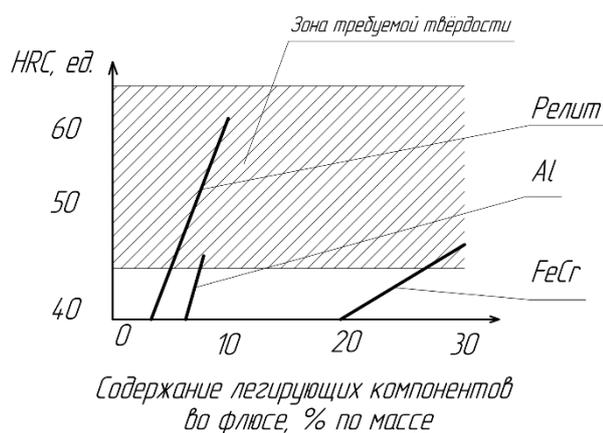


Рис. 2. Твёрдость наплавленного слоя

Наибольшее значение твёрдости наплавленного слоя (до HRC 60) достигается при введении релита (карбида вольфрама) около 10 % в состав керамического флюса.

Заключение

Экспериментально установлена возможность применения легирующего керамического флюса для восстановления валика тормозной рычажной передачи электровоза.

Наиболее предпочтительным компонентом керамического флюса для легирования наплавленного слоя изделия с высокой твёрдостью является релит (карбид вольфрама).

[1] Морозкин И.С., Даровской Г.В. Оптимизация процесса сварки короткой дугой при ремонте подвижного состава железных дорог // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 2 (94). – С. 181-187.

[2] Волобуев С.Ю., Волобуев Ю.С., Потапов Н.Н. и др. Механизм управления химическим составом наплавленного металла с использованием керамических флюсов // Сварочное производство. – 2023. – № 3. – С. 30-35.

[3] Волобуев С.Ю., Волобуев Ю.С., Потапов Н.Н. и др. Металлургические особенности влияния кремния на свойства металла при сварке под флюсом нержавеющей стали аустенитного класса // Сварочное производство. – 2022. – № 6. – С. 5-12.

[4] Бобриков Ю.В., Даровской Г.В. Особенности выбора способа производства сварочного флюса // Современное развитие науки и техники: Сборник научных трудов Всероссийской национальной научно-практической конференции, Ростов-на-Дону, 01–03 декабря 2020 года. – Ростов-на-Дону: Ростовский государственный университет путей сообщения, 2020. – С. 52-56.

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИСПЫТАНИЙ НА СТОЙКОСТЬ К АБРАЗИВНОМУ ИЗНОСУ

Денисов О.В.*, Малышев В.Н.

* denisov8428@gmail.com

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, Москва, Россия.

Были достигнуты результаты по предотвращению неоднородного линейного износа с помощью высокочастотного вращения испытуемого образца. Исследования выполнялись на новой машине трения, изготовленной по авторским чертежам. Изложены технологические способы повышения качества испытаний материалов и покрытий на стойкость к абразивному износу при сухом трении.

Ключевые слова: машина трения, абразивное изнашивание, сухое трение, трение скольжения, трение верчения, испытание покрытий, износостойкость.

Введение

Изнашиванию подвержены любые поверхности твёрдых тел, которые контактируют с другими телами или подвергаются воздействию внешней среды. В 80 % [1] случаев причиной отказа оборудования является износ его рабочей поверхности. Только абразивный износ обходится промышленно развитым странам в 1-4 % валового национального продукта [2]. На практике увеличение износостойкости достигается использованием защитных (износостойких) покрытий [3], причём доля их использования может достигать 80 % [4]. Поэтому исследование износостойкости поверхностных слоёв является актуальной задачей.

По причине многообразия факторов и условий испытаний, достоверная теоретическая оценка износостойкости материалов невозможна [5]. Достоверным, хотя весьма трудоёмким и долгим [6], способом определения стойкости материалов и покрытий к абразивному износу в различных средах по-прежнему являются экспериментальные испытания.

До сих пор в основе таких исследований лежит метод изнашивания образца о закреплённый абразив [7, 8]. Такая методика преимущественно относится к монолитным материалам, поскольку тонкие защитные покрытия в те времена были не столь распространены. Оценка износостойкости является затруднительной ввиду гетерогенности механических свойств компоновки, что проявляется в неоднородности линейного износа исследуемой поверхности, пример показан на рис. 1. А именно, в

WAYS TO IMPROVE THE QUALITY OF TESTS FOR RESISTANCE TO ABRASIVE WEAR

Denisov O.V., Malyshev V.N.

Results have been achieved to prevent inhomogeneous linear wear by high-frequency rotation of the test sample. The research was carried out on a new friction machine made according to the author's drawings. Technological methods for improving the quality of testing of materials and coatings for resistance to abrasive wear during dry friction are described.

Keywords: friction machine, abrasive wear, dry friction, sliding friction, spinning friction, coating testing, wear resistance.

процессе испытаний образец быстрее изнашивается с той стороны, которая первой контактирует с абразивом. Это проявляется в виде бокового износа, называемого также «скосами» или «завалами».

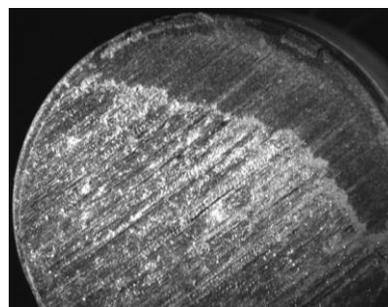


Рис. 1. Неоднородный износ покрытия после испытания

Цель этой работы состоит в освещении технологических способов подавления негативных явлений и достижения высокого качества испытаний на стойкость к абразивному износу.

Материалы и методы

Многолетняя трибологическая практика свидетельствует о том, что рациональнее [9, 10] достижение высокого качества испытаний, а не создание кинематических схем, которые подлинно воссоздают условия трения в узле.

При проектировании машины трения мы стремились преодолеть основные недостатки, которые встречаются в классических схемах:

а) вибрации и биения, существующие в схеме трения «цилиндр-диск» в результате разной скорости на образце;

- б) трение образца в старом следе;
- в) перегрев образца;
- г) непостоянство длительности испытаний, неизвестность времени разгона и торможения установки;
- д) приработка и ухудшение качества абразива;
- е) создание однонаправленной шероховатости;
- ж) неравномерный и боковой износ.

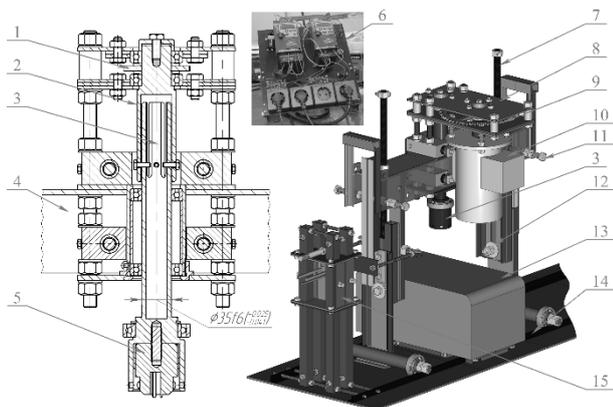


Рис. 2. Машина трения: 1 – быстроходное колесо; 2 – быстроходный вал; 3 – державка образца; 4 – корпус каретки; 5 – сверлильный патрон для закрепления образца (схематично); 6 – блок управления; 7 – регулятор высоты (винтовая пара); 8 – мультипликатор; 9 – тихоходное колесо; 10 – фланцевый двигатель с лапами (схематично); 11 – фиксатор наклона (винтовая пара); 12 – ось наклона; 13 – плоскошлифовальный станок (схематично); 14 – угловой профиль (рельсы); 15 – регулируемый по высоте ползун с пневмопоршнем

Созданная машина трения, представленная на рис. 2, преодолевает описанные выше проблемы следующими способами:

а) заменой основной схемы изнашивания на «цилиндр-плоскость», где в качестве абразива используется абразивная шкурка, перемещаемая плоскошлифовальным станком (13);

б) каретка (4) может перемещаться по рельсам (14) перпендикулярно grinderу (13) с помощью пневмопоршня, находящегося в ползуне (15), это реализует износ по новому следу, по ленте шириной до 100 мм;

в) удельная нагрузка меняется путём использования образца разного диаметра, закрепляемого в сверлильном патроне (5) и изменением массовой нагрузки в державке (3), что обеспечивает удельное давление до 1,5 МПа (по достоверным данным [9] этого достаточно для предотвращения температурного разупрочнения);

г) использование программируемого блока управления (6) с регуляторами частоты привода скольжения и вращения обеспечивает полную повторяемость испытаний по временному критерию;

д) возможность быстрой и дешёвой замены абразивной ленты позволяет использовать свежий абразив и менять скорость износа подбором зернистости ленты;

е), ж) предотвращаются вращением образца вокруг его оси с помощью привода вращения.

При выборе частоты вращения образца существует два подхода:

1. путь вращения должен превышать путь скольжения [11, 12];

2. за время прохождения диаметра образца абразивом, должен совершаться полный оборот.

Эти подходы отличаются тем, что во 2-м случае частота вращения в π раз больше, чем в 1-м. Нам удалось реализовать 2-й подход, выигрышность которого обосновывается системой уравнений (1), описывающей движение абразивной частицы по торцу цилиндрического образца.

$$\begin{cases} x(t) = vt; \\ y(t) = d/2 \cdot \sin(\omega t), \end{cases} \quad (1)$$

где

v – линейная скорость движения образца или абразива, м/с;

t – время, за которое преодолевается диаметр образца, $d/v = t$, с;

d – диаметр образца, м;

ω – угловая скорость, рад/с.

Закон движения (1) иллюстрируется на рис. 3.

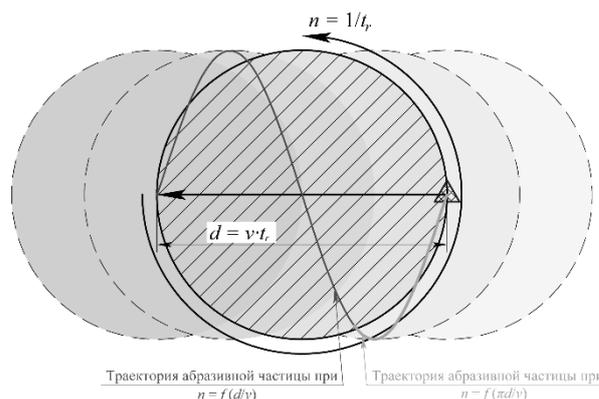


Рис. 3. Траектория абразива на торце цилиндрического образца

Заключение

Созданная машина используется практически и позволяет преодолеть основные вредоносные факторы, которые мешают качественно испытывать материалы и покрытия на стойкость к абразивному износу. Мы будем рады, если представленные технологические способы найдут более широкое применение.

Работа выполнена при технической поддержке ООО «ГЕРС» Технолоджи (г. Тверь), выражающейся в производстве деталей по авторским чертежам.

За практические советы и предоставление монтажного оборудования, авторы благодарят инженеров и сотрудников кафедры трибологии и технологии ремонта нефтегазового оборудования РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина.

[1] Елагина О.Ю. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин. Учебное пособие – М.: Логос, Университетская книга, 2009. – 488 с.

[2] Swain B. et al. Wear: a serious problem in industry //Tribology In Materials And Manufacturing - Wear, Friction And LubricationIntechOpen. – 2020.

[3] Лоханина С.Ю., Тарасов В.В. Аспекты выбора методики испытаний материалов покрытий (упрочненных слоев) на износостойкость при абразивном изнашивании // Химическая физика и мезоскопия. – 2018. – Т. 20, № 4. – С. 543-548.

[4] Бойцов А. Г. Инновации в области нанесения покрытий / РИТМ машиностроения: электронный журнал. – URL: <https://ritm-magazine.com/ru/magazines/2020> (дата обращения: 03.08.2024).

[5] Сивцев Н.С., Шаязданов Р.Р., Тукмачева Н.С. Совершенствование одной из схем трибологических испытаний материалов на износостойкость / Развитие кадрового потенциала ОПК: федеральные программы и региональная кадровая политика: Материалы XI Всероссийского совещания, Ижевск, 07–08 ноября 2018 года. – Ижевск: Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова, 2018. – С. 68-72.

[6] Аулов В.Ф., Рожков Ю.Н., Лялякин В.П. Новое устройство и порядок сравнительных испытаний абразивной износостойкости покрытий стали 65Г, полученных скоростным ТВЧ-борированием // Технический сервис машин. – 2021. – № 2 (143). – С. 120-129.

[7] Хрущев М.М., Бабичев М.А. Абразивное изнашивание. – М.: Наука, 1970. – 219 с.

[8] ГОСТ 17367-71 Металлы. Методы испытания на абразивное изнашивание о закрепленные абразивные частицы: дата введения 1971-12-31. – Москва: Издательство стандартов, 1971. – 7 с.

[9] Сорокин Г.М., Мальшев В.Н. Основы механического изнашивания сталей и сплавов: учебное пособие – М.: Логос, 2014. – 308 с.

[10] Виноградов В.Н., Сорокин Г.М. Износостойкость сталей и сплавов. – М.: Нефть и газ, 1994. – 417 с.

[11] Тарасов В.В., Трифонов И.С. Развитие метода изнашивания материалов по закрепленному абразиву // Химическая физика и мезоскопия. – 2015. – Т. 17, № 1. – С. 143-149.

[12] Патент № 2601502 Российская Федерация, МПК G01N 3/56. Способ испытания материала на абразивное изнашивание: № 2014144837/28: заявл. 05.11.2014: опубл. 27.05.2016 / Тарасов В.В., Трифонов И.С., Пузанов Ю.В., Бажин А.Г. – 5 с.

МЕТОДИКА НАНЕСЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ШЛИФОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ

¹Дербуш Д.А.*, ²Шалыгин М.Г.**

* denderbush@yandex.ru ** migshalygin@yandex.ru

¹НИЦ(ИМО и ИО) войсковой части 15644, Знаменск, Россия;

²ФГБОУ ВО «БГТУ», Брянск, Россия.

Гальваническое никелирование - процесс осуществляется путем осаждения никеля на медное основание с помощью электролиза, и эффективен для повышения коррозионной стойкости и защиты от механических повреждений. Разработанная методика нанесения покрытий, позволит снизить количество выхода из строя электрических контактов, увеличить наработку на отказ электрических соединителей и увеличить площадь контакта при их сопряжении.

Ключевые слова: трибология, гальваника, нанесение гальванических покрытий Ni-Cu.

Введение

Гальваническое никелирование, применяемое для меди, играет важную роль в расширении функциональных возможностей металлических изделий. Этот процесс осуществляется путем осаждения никеля на медное основание с помощью электролиза и эффективен для повышения коррозионной стойкости и защиты от механических повреждений. Никель, благодаря своим уникальным свойствам, таких как высокая прочность и отличная адгезия, образует толстый и прочный слой, что делает его идеальным выбором для защиты меди от окисления и износа [1].

Однако, при проведении гальванического никелирования, имеются недостатки и проблемы, связанные с наличием трещин, глубоких царапин и вмятин на поверхности изделия, которые в свою очередь приводят к электрическим потерям при подключении контакта, повышению сопротивления и уменьшению наработки на отказ [2].

Для решения данных проблем, необходимо улучшить характеристики изготовленных электрических контактов после проведения гальванического никелирования.

В данной статье представлена методика и способ гальванического нанесения никеля с использованием электрического шлифования

METHOD OF APPLYING GALVANIC COATINGS TO ELECTRICAL CONTACTS USING ELECTRICAL SURFACE GRINDING

Derbush D.A., Shalygin M.G.

Electroplating nickel is a process carried out by depositing nickel on a copper base using electrolysis, and is effective for increasing corrosion resistance and protection against mechanical damage. The developed coating application technique will reduce the number of electrical contact failures, increase the mean time between failures of electrical connectors and increase the contact area when mating them.

Keywords: tribology, galvanics, application of Ni-Cu galvanic coatings.

нанесенной поверхности покрытия, которое позволит решить ранее указанные проблемы.

Материалы и методы исследований

Общие сведения и описание проведения никелирования с использованием электрического шлифования

Полный технологический процесс никелирования с использованием электрического шлифования:

- Электрохимическое обезжиривание в стандартных растворах;
- Промывка проточная;
- Активирование;
- Травление;
- Промывка проточная;
- Никелирование;
- Промывка двухкаскадная противоточная;
- Сушка;
- Электрическое шлифование;
- Промывка проточная;
- Никелирование;
- Промывка двухкаскадная противоточная;
- Сушка.

Подробное описание методики нанесения покрытия:

1. Состав электрохимической ванны для проведения обезжиривания:

1.1 Карбонат натрия (технический) – концентрация г/л – 35;

1.2 Тринатрий фосфат – концентрация г/л – 40;

При режиме работы процесса электрохимического обезжиривания температура состава составляет 40 °С, при постоянной подаче тока $i^k = 5 \text{ А/дм}^2$, при этом напряжение составляет 12 В, время проведения электрохимического обезжиривания 3 мин;

2. Промывка в теплой воде производится на протяжении 1 минуты, при этом температура воды составляет 50 °С;

3. Промывка в холодной воде производится на протяжении 1 минуты, при этом температура воды составляет 20 °С;

4. Химическое травление, состав:

4.1 Серная кислота - концентрация г/л - 1100

4.2 Нитрат аммония - концентрация г/л – 275

Химическое травление производится на протяжении 1 мин, при температуре состава 25 °С;

5. Промывка в холодной воде производится на протяжении 1 минуты, при этом температура воды составляет 20 °С;

6. Промывка в теплой воде производится на протяжении 1 мин, при этом температура воды составляет $t = 50 \text{ °С}$;

7. Состав гальванической ванны для проведения никелирования:

Сульфат никеля - концентрация г/л - 250

Хлорид никеля - концентрация г/л - 15

Борная кислота - концентрация г/л - 30

Сахарин - концентрация г/л – 0,3

Нафталин - концентрация г/л – 2

Моющее средство - концентрация г/л – 0,2

Никелирование производится при постоянном токе $i^k = 4 \text{ А/дм}^2$ кислотно-основных свойств раствора $\text{pH} = 4-5$ и температуре 20 °С с доведением толщины слоя в 20 мкм, при этом необходимо установить время нахождения элемента в электролите на протяжении 2 часов 4 минут. На рис. 1 схематично показан результат нанесения гальванического покрытия никеля на медную подложку толщиной в 20 мкм;

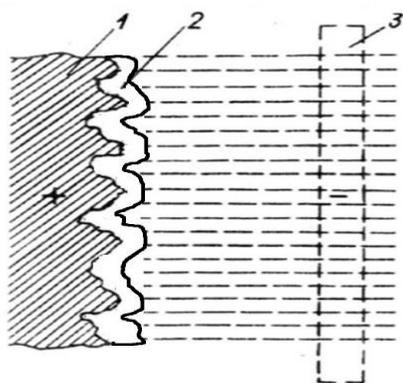


Рис. 1. Схема после нанесения покрытия в 20 мкм:
1 – анод; 2 – слой нанесения никеля в 20 мкм; 3 – катод

8. Промывка – улавливание производится при температуре 20 °С, на протяжении 1 минуты;

9. Промывка в холодной воде производится на протяжении 1 минуты, при этом температура воды составляет 20 °С;

10. Промывка в теплой воде производится на протяжении 1 минуты, при этом температура воды составляет 50 °С;

11. Сушка элемента на протяжении 5 минут, при температуре 70 °С;

12. Электрическое шлифование;

12.1 Для электрохимического шлифования электролитом служит серная кислота марки «химически чистая» или «аккумуляторная» [3]. Очень важно отсутствие или малое содержание в ней хлор-иона. Техническая серная кислота непригодна. Никаких добавок в электролите не требуется. Предпочтительно применять 30 % кислоту, так как при этой концентрации раствор обладает наивысшей электропроводностью, что выгодно в отношении экономии расхода электроэнергии, минимально требуемого напряжения (достаточно 6 В), повышенной рассеивающей способности, возможности работы при большой плотности тока (при которой нагрев джоулевой теплотой невелик вследствие малого омического сопротивления раствора), и значительной растворимости меди в кислоте такой концентрации. Благодаря этому оно не выпадает в осадок и не мешает процессу.

Температура раствора должна быть комнатной (18-20 °С), допустимо повышение до 30 °С. При высоких температурах медь не пассивируется.

Медь пассивируется на аноде в серной кислоте, только при значительно более высокой плотности тока – при работе в аккумуляторной серной кислоте плотность тока должна быть не меньше 30-35 А/дм². Верхний предел плотности тока ограничен только мощностью источника тока и опасностью разогрева электролита джоулевой теплотой.

12.2 Электрическое шлифование производится с возможностью частичного снятия слоя никеля до 10 мкм, при этом необходимо производить периодический контроль снятия поверхности. На рис. 2 схематично показан результат проведения электрического шлифования никеля со снятием слоя до 10 мкм;

13. Повторное никелирование производится в тех же условиях с изменением времени до 1 часа 2 минут и доведением толщины слоя в 20 мкм. На рисунке 3 схематично показан результат нанесения гальванического покрытия никеля на медную подложку после электрического шлифования толщиной в 20 мкм

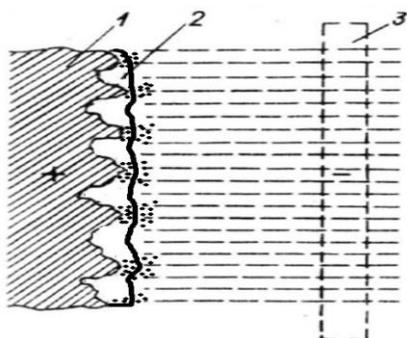


Рис. 2. Схема при проведенном электрическом шлифовании и полученной толщине в 10 мкм: 1 - анод; 2 - слой никеля при электрическом шлифовании; 3 - катод

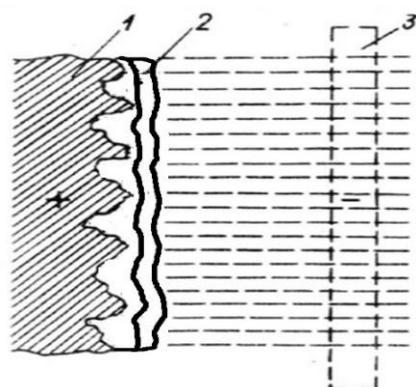


Рис. 3. Схема поверхности электрического контакта при повторном нанесении никелирования: 1 - анод; 2 - слой нанесения никеля в 20 мкм; 3 - катод

14. Промывка – улавливание производится при температуре 20 °С, на протяжении 1 минуты;

15. Промывка в холодной воде производится на протяжении 1 минуты, при этом температура воды составляет 20 °С;

16. Промывка в теплой воде производится на протяжении 1 минуты, при этом температура воды составляет $t = 50$ °С;

17. Сушка элемента на протяжении 5 минут, при температуре 70 °С.

Результатом исследований и проведения расчетов, получено, что введение электрического шлифования в технический план нанесения гальванического покрытия никеля на медную подложку является необходимым. Полученная поверхность показала минимальное количество трещин, глубоких царапин и вмятин на поверхности изделия, что в свою очередь увеличивает электрическую проводимость, поверхностное соединение контактных электрических соединителей, и снижает возникающее при соединении контактов электрическое сопротивление (Рис. 3).

Заключение

Таким образом при изменении методики нанесения гальванического покрытия никеля на медную подложку, технические характеристики и качество полученных деталей улучшаться, за счет увеличения пятна контакта между электрическими соединителями. Данная методика, в свою очередь, позволит снизить количество выхода из строя электрических контактов, увеличить наработку на отказ электрических соединителей, за счет внедрения в процесс никелирования деталей электрического шлифования. На данный момент, большое количество соединителей выходят из строя не выработав назначенного ресурса заводом-изготовителем. Представленная методика нанесения покрытий позволит решить данную проблему.

[1] Беркович И.И., Громаковский Д.Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения/ Учебник для вузов – Самара: Самарский государственный технический университет. 2000. – с. 268

[2] Андреев И.Н., Гильманшин Г.Г., Межевич Ж.В. Электрохимические технологии металлопокрытий (гальванотехника). Метод. указания к лабораторным работам / Казан. гос. технол. ун-т: Сост: И.Н. Андреев, Г.Г. Гильманшин, Ж.В. Межевич – Казань: КГТУ. 2005. – С. 35-37;

[3] Истомина Н.В., Сосновская Н.Г., Ковалюк Е.Н. Оборудование электрохимических производств / Учебное пособие. – 2-е изд., перераб. – Ангарск: АГТА. 2010. – С. 76-78.

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ КОМПЛЕКСНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК, ПРИГОТОВЛЕННЫХ НА РАЗЛИЧНЫХ НЕФТЯНЫХ МАСЛАХ

Дмитриев А.В.*, Золотова П.Н., Кокотова А.А.

* alexey-dmitriev-i@yandex.ru

Российский государственный университет нефти и газа (Национальный исследовательский университет)
имени И.М. Губкина, Москва, Россия.

В статье представлен анализ перспектив производства и применения комплексных алюминиевых смазок. Изучено влияние природы дисперсионной среды на свойства смазок.

Ключевые слова: комплексные алюминиевые смазки, дисперсионная среда, минеральные масла, эксплуатационные свойства.

Введение

В настоящее время мировой объем производства и потребления пластичных смазок достигает порядка 1,2 млн т. в год, при этом на долю Российской Федерации приходится около 5% от общемирового производства пластичных смазок. Львиную долю от указанного объема производства длительно занимают литиевые смазки – их доля от общего объема производства составляет более 75%. Такой высокий процент долгое время был обусловлен относительной доступностью и невысокой стоимостью гидроксида лития, применяемого в качестве основного компонента загустителя, в сочетании с высокими эксплуатационными характеристиками получаемых смазок.

Однако повышение глобального спроса на литий [1], активно используемый при производстве электроавтомобилей, вызывает резкий рост стоимости этого металла, что делает производство литиевых пластичных смазок все менее рентабельным и ставит перед учеными задачу по поиску альтернативных компонентов для производства высокоэффективных пластичных смазок. Перспективным направлением в этом ключе являются комплексные алюминиевые смазки (кAl-смазки - далее по тексту).

По эксплуатационным свойствам кAl-смазки не только не уступают литиевым, но в ряде случаев и превосходят их: кAl-смазки характеризуются гораздо более высокой влагостойкостью, чем литиевые, что делает возможным их применение в условиях контакта с влагой и паром (например,

STUDYING THE PROPERTIES OF COMPLEX ALUMINUM GREASES PREPARED WITH VARIOUS PETROLEUM OILS

Dmitriev A.V., Zolotova P.N., Kokotova A.A.

The article presents an analysis of the prospects for the production and application of complex aluminum greases. The influence of the nature of the dispersion medium on the properties of greases has been studied.

Keywords: complex aluminum greases, dispersion medium, mineral oils, performance properties.

пищевые производства) [2], обладают великолепными адгезивными свойствами и могут использоваться в широком температурном интервале (-40...+160 °С) [3]. Кроме того, алюминий является дешевым и широкодоступным металлом, его запасы практически безграничны, а РФ в общемировом рейтинге по производству алюминия занимает второе место (данные за 2024 г.) [4].

Перечисленные факторы делают кAl-смазки перспективной альтернативой литиевым смазкам. Поэтому было принято решение собственными силами разработать кAl-смазку, соответствующую всем современным требованиям.

Первым шагом на пути разработки высокоэффективной кAl-смазки стал подбор дисперсионной среды.

Цели и задачи исследования

Целью данной работы являлся подбор дисперсионной среды для получения кAl-смазок с наилучшими свойствами.

Задачами работы являлось приготовления ряда образцов кAl-смазок на различных нефтяных маслах и их испытания, анализ полученных данных.

Материалы и методы

Для приготовления образцов кAl-смазок в качестве дисперсионной среды использовались следующие базовые масла:

- I группа по API: SN-150, SN-400, SN-650;
- II группа по API: MVI-2;
- III группа по API: VHVI-4.

Содержание загустителя в смазках составляло 14 % масс. Образцы готовились при температуре 180-190 °С (интервал температур взят из

литературных источников) при непрерывном перемешивании. По достижении требуемой температуры смазки быстро охлаждались.

Полученные образцы кAl-смазок анализировались по следующим показателям:

1. Определение температуры каплепадения (ГОСТ 6793);
2. Определение коллоидной стабильности (ГОСТ 7142);
3. Температура каплепадения (ГОСТ 6793);
4. Определение трибологических характеристик на четырехшариковой машине трения: диаметр пятна износа при постоянной нагрузке 196 Н (ГОСТ 9490).

Результаты и обсуждение

Полученные результаты представлены в таблице 1.

Табл. 1. Свойства образцов кAl-смазок, приготовленных на различных нефтяных маслах

Дисперсионная среда	Пенетрация, мм ⁻¹	Коллоидная стабильность, % масс	Температура каплепадения, °С	Диаметр пятна износа, мм
SN-150	360	21,4	222	0,80
SN-400	360	14,9	230	0,72
SN-650	355	17,2	236	0,85
MVI-2	395	27,5	231	0,80
VHVI-4	381	29,0	229	0,81

В ходе испытаний было установлено, что среди нефтяных масел наилучшей дисперсионной средой для приготовления комплексных алюминиевых смазок является вязкое минеральное базовое масло SN-650, в то время как смазки, приготовленные на гидрогенизированных маслах, обладают плохой коллоидной стабильностью и более низкой температурой каплепадения.

Заключение

По результатам испытаний была отмечена зависимость свойств комплексных алюминиевых смазок от природы дисперсионной среды; была подобрана оптимальная дисперсионная среда для приготовления комплексных алюминиевых смазок.

Дальнейшие исследования данной темы будут посвящены оптимизации технологических параметров приготовления кAl-смазок, а также улучшению эксплуатационных свойств путём добавления присадок и наполнителей.

[1] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.interfax.ru/business/921812> (дата обращения: 25.11.2024)

[2] Ищук Ю.Л. Состав, структура и свойства пластичных смазок. – К.: Наук. Думка, 1996. – 516 с.

[3] Вайншток В.В., Левенто И.Ю. Алюминиевые смазки: состав, свойства, производство и применение. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1991. – 56 с.

[4] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.geeksforgEEKS.org/top-10-largest-aluminum-producing-countries/> (дата обращения: 25.11.2024).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИРАБОТКИ МНОГОТОЧЕЧНОГО ИЗНАШИВАЮЩЕГОСЯ КОНТАКТА

Егоров И.М.

egrov@mail.ru

Санкт-Петербург, Россия.

Моделируется процесс приработки зубчатой передачи на участках многопарного зацепления. Рассматривается этап приработки, на котором перераспределение нагрузки в точках контакта приводит к выравниванию углов доворота колеса вследствие совместного изнашивания зацеплений. Модель работает при любой зависимости интенсивности изнашивания от скорости скольжения и давления в точке контакта.

Ключевые слова: зубчатая передача многопарное зацепление, изнашивание, приработка.

Особенности приработки зубчатых передач

Процесс изнашивания передач зацеплением, как и любых других механизмов, содержащих высшие кинематические пары, сопровождается непрерывным изменением рабочих поверхностей зубьев, что приводит к непрерывному изменению интенсивности изнашивания в точках контакта зубьев.

На этапе первичной приработки доминирующую роль играет перераспределение нагрузки между точками многопарного зацепления. Нагрузка перераспределяется таким образом, чтобы обеспечить дальнейшее выравнивание углов доворота колеса вследствие совместного изнашивания зацеплений. То есть в передаче реализуется устойчивый изнашивающийся многоточечный контакт.

Процесс перераспределения нагрузки на участках многопарного зацепления играет существенную роль в общем процессе приработки передачи и является важным этапом формирования устойчивой формы естественного изнашивания профилей зубьев [1].

Многопарный контакт при наличии зазоров в зацеплениях

С первого момента изнашивания передачи участки многопарного зацепления превращаются в участки упругого пересопряжения зубьев. При работе без нагрузки в контакт вступает только одна пара зубьев. Во всех других зацеплениях появляются зазоры, которые выбираются при

MODELING OF MULTI-POINT CONTACT WEAR RUNNING-IN

Egorov I.M.

The process of running-in of the gear transmission in the areas of multi-pair meshing is simulated. The stage of running-in is considered, at which the redistribution of the load between the teeth ensures the alignment of the angles of rotation of the wheel as a result of joint wear of the teeth. The model works at any dependence of the intensity of wear on the sliding speed and pressure at the point of contact.

Keywords: gearing, multi-pair meshing, wear, running-in.

упругом довороте колеса после нагружения передачи.

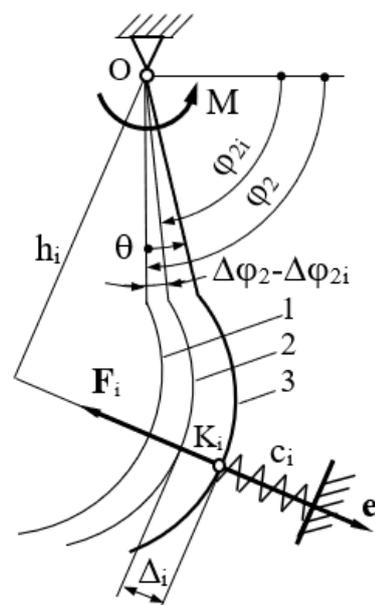


Рис. 1. Нагрузка в i -ом зацеплении многопарного контакта
1 – поворот колеса в ненагруженной передаче; 2 – то же при зацеплении только i -ой пары; 3 – поворот колеса при приложении момента M

Нагрузка в i -ом зацеплении многопарного контакта (см. рис. 1) определяется по формуле:

$$F_i = c_i \cdot (\theta - \Delta\varphi_2 + \Delta\varphi_{2i}) \cdot h_i,$$

где θ – угол упругого доворота колеса под нагрузкой; $\Delta\varphi_2$ – погрешность поворота колеса в

ненагруженной передаче; $\Delta\varphi_{2i}$ – то же при зацеплении только i -ой пары; c_i – жесткость i -го зацепления; h_i – плечо профильной нормали относительно оси колеса.

$$\Delta\varphi_2 = \max \{ \Delta\varphi_{2i} \}$$

Угол упругого доворота колеса под нагрузкой определяется из условия:

$$M = \sum_{i=1}^{i=n} F_i \cdot h_i,$$

где n – число пар зубьев в одновременном зацеплении; M – момент на колесе.

$$\theta = \frac{M - \sum (\Delta\varphi_{2i} \cdot c_i \cdot h_i^2)}{\sum (c_i \cdot h_i^2)} + \Delta\varphi_2.$$

В прямозубой зубчатой передаче одновременно в зацеплении могут находиться две пары зубьев ($n=2$). В планетарно-цевочном редукторе – половина зубьев сателлита.

Математическая модель процесса приработки эвольвентой прямозубой зубчатой передачи

При разработке модели процесса приработки приняты следующие допущения: передача абсолютно точная; все зубья изнашиваются одинаково; величина износа зубьев достаточно мала, чтобы считать скорости скольжения, плечи профильных нормалей и жесткости зацеплений неизменными. При этих допущениях модель процесса изнашивания, приведенная в работе [2] существенно упрощается.

На каждом шаге изнашивания для всех фаз зацепления плечи профильных нормалей равны радиусу основной окружности колеса; погрешность поворота колеса в ненагруженной передаче равна сумме износов шестерни и колеса, деленной на плечо профильной нормали.

Считается, что процесс приработки заканчивается, когда изменение нагрузки в зацеплении не превышает заданного достаточно малого значения.

Модель процесса приработки реализована в виде Matlab программы. Интенсивность изнашивания зубчатых колес определяется как приращение износа при прохождении площадки контакта через рассматриваемую точку поверхности зуба [2]. При этом может быть выбран любой закон изнашивания, зависящий от пути трения и нагрузки в зацеплении.

В данной работе считается, что интенсивность изнашивания прямо пропорциональна

произведению величин удельного скольжения [3] и нагрузки в зацеплении. При этом интенсивность изнашивания зацепления определяется по формуле:

$$J = k \cdot F \cdot \left(\vartheta_1 + \frac{Q}{u} \cdot \vartheta_2 \right),$$

где ϑ_1, ϑ_2 – удельные скольжения для шестерни и колеса; u – передаточное число; Q – коэффициент, учитывающий разницу износостойкости материалов шестерни и колеса.

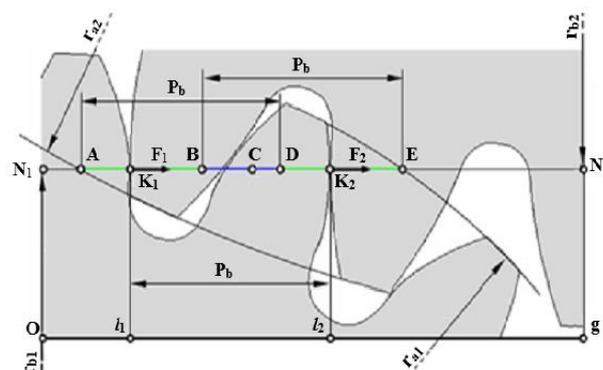


Рис. 2. Положение точек контакта K_1 и K_2 на участках двухпарного зацепления AB и DE линии зацепления N_1N_2 – линия зацепления; h_1, h_2 – координаты точек контакта на линии зацепления; P_b – шаг зацепления

Удельное скольжение зависит от положения точки контакта на линии зацепления (см. рис. 2):

$$\vartheta_1 = \frac{g - (u + 1) \cdot l}{u \cdot l}; \quad \vartheta_2 = \frac{g - (u + 1) \cdot l}{g - l},$$

Расчеты производятся при условных оборотах шестерни. Поэтому коэффициент пропорциональности k принят равным единице.

Результаты и их обсуждение

Ниже приведены результаты моделирования процесса приработки передачи со следующими параметрами: модуль $m = 1$ мм; числа зубьев шестерни и колеса $z_1 = 14, z_2 = 29$; коэффициенты смещения $x_1 = +0,5, x_2 = -0,2$. Момент на колесе и жесткость зацепления условно выбраны такими, что в однопарном зацеплении сила равна 1 Н, а деформация зацепления равна $0,005 \cdot m$.

На рис. 3 показано изменение нагрузки в зацеплении, на рис. 4 – изменение интенсивности изнашивания зацепления в процессе приработки зубчатой передачи. Графики построены через каждые 15 шагов изнашивания. Максимальное приращение износа на шаге изнашивания составляет $5 \cdot m \cdot 10^{-5}$ мм. Графики изменения указанных параметров в конце приработки выведены красным цветом.

Износ зацепления (см. рис. 5) достаточно мал, чтобы пренебрегать изменением в ходе приработки геометро-кинematicких показателей зацепления.

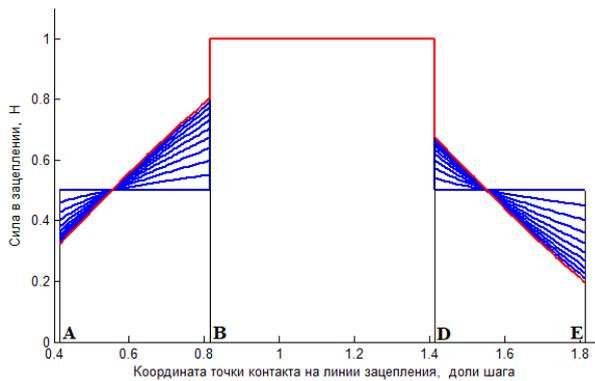


Рис. 3. Изменение нагрузки в зацеплении в процессе приработки

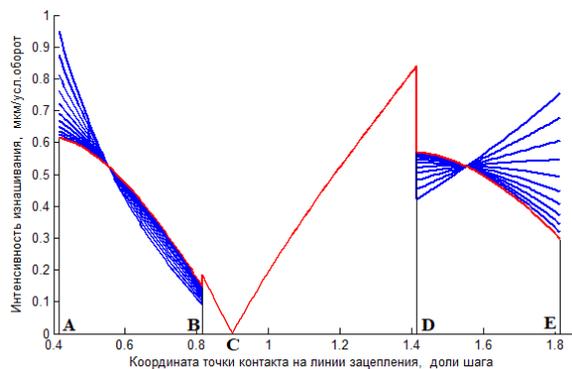


Рис. 4. Изменение интенсивности изнашивания зацепления в процессе приработки

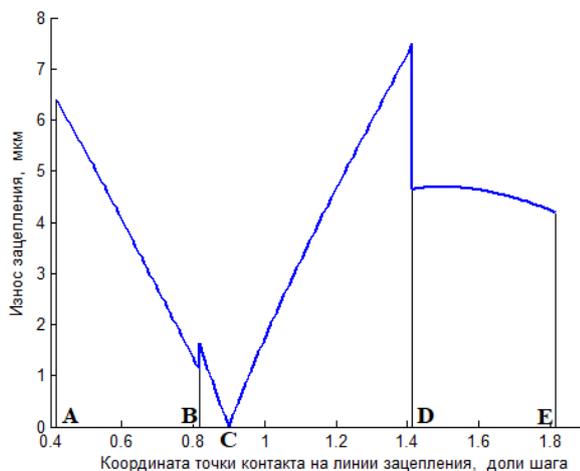


Рис. 5. Износ зацепления в ходе приработки

Результаты моделирования приработки хорошо согласуются с результатами, полученными из условия равенства интенсивностей изнашивания зацепления в точках двухпарного контакта приработанной зубчатой передачи (см. рис. 6).

Разработанная модель позволяет наблюдать закономерности процесса изнашивания зубчатых передач при любом законе изнашивания.

Модель может быть использована для определения коэффициентов смещения зубчатых колес при проектировании зубчатых передач с повышенной износостойкостью.

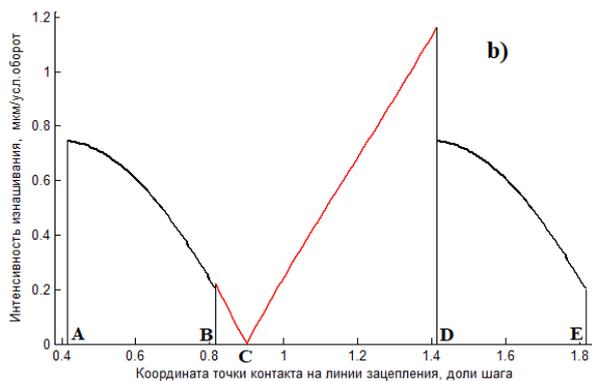
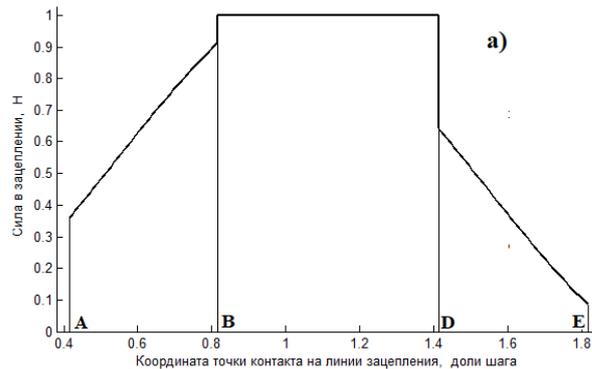


Рис. 6. Нагрузка (а) и интенсивность изнашивания зацепления (б), полученные из условия равенства интенсивностей изнашивания в точках двухпарного контакта

- [1] Шульц В.В. Форма естественного износа деталей машин и инструмента – М.: Машиностроение, 1990. – 207 с.
- [2] Егоров И.М. Опыт моделирования изнашивания передач зацеплением // Труды XI Международной научно-технической конференции Трибология - машиностроению (ТриБОМАШ-2016). – М.: – 2016. – С. 71-73.
- [3] Linke H., Börner J., Hess R. (ed.). Cylindrical gears: calculation–materials–manufacturing. – Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2016. – С. 848.

МОДИФИКАЦИЯ НАНОЧАСТИЦ МАГНЕТИТА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СВОЙСТВА СМАЗОК

Задошенко Е.Г.

zadoshenkoq@rambler.ru

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия.

Изучены триботехнические характеристики смазки Литол-24 с модифицированными и чистыми наночастицами магнетита. Модификацию наночастиц магнетита, полученных методом химического осаждения, проводили глицином и капролактамом. Установлено, что наилучшие противоизносные свойства наблюдаются для смазки с модифицированными частицами магнетита капролактамом. Улучшение триботехнических свойств смазки связано с образованием комплексных соединений магнетита и капролактама, которые имеют высокую полярность и устойчивость согласно квантово-химическим расчетам.

Ключевые слова: трение, износ, наночастицы магнетита, смазка, противоизносные свойства.

Введение

В настоящее время существует широкий спектр исследований, направленных на применение наноматериалов в качестве добавок к смазочным материалам. Эксплуатационные свойства смазок определяются концентрацией и стабильностью наноматериалов, температурными и нагрузочными режимами, природой базовых масел, использованием загустителей и различных дополнительных добавок [1]. Влияние наночастиц металлов и их оксидов на антифрикционные и противоизносные свойства смазок связано со способностью выполнять роль «третьего тела», сглаживать трещины и рубцы в зоне контакта. В ряде исследований [2-3] показано, что к перспективным добавкам относятся наночастицы магнетита, но при введении их в смазку необходимо учитывать размер, морфологию и концентрацию частиц. Отмечается также и негативное воздействие наночастиц магнетита на эксплуатационные свойства смазок связанное с их склонностью к окислению и агрегации в неполярных средах. Использование поверхностно-органических модификаторов приводит к повышению адсорбционной способности магнетита, к снижению их агрегации и обеспечивает улучшение их диспергирования в смазки [4].

MODIFICATION OF NANOPARTICLES OF MAGNETITE AND THEIR INFLUENCE ON THE PROPERTIES OF LUBRICANTS

Zadoshenko E.G.

The tribotechnical characteristics of Litol-24 lubricant with modified and pure nanoparticles of magnetite were studied. Modification of nanoparticles of magnetite obtained by chemical deposition was carried out with glycine and caprolactam. The best anti-wear properties have been found for the modified particles of caprolactam. The improvement of the lubricity properties is related to the formation of complex compounds of magnetite and caprolactam, which have high polarity and resistance according to quantum-chemical calculations.

Keywords: friction, wear, nanoparticles of magnetite, lubrication, anti-wear properties.

Целью работы является проведение модификации частиц магнетита органическими соединениями и изучение их влияния на триботехнические свойства смазки ЛИТОЛ-24.

Экспериментальная часть

Трибологические испытания смазочных композиций проводили на четырёхшариковой машине трения (ЧШМ) в соответствии с ГОСТ 9490–75. Диаметр пятен износа ($D_{и}$) определяли с помощью оптического микроскопа. В качестве исследуемых материалов использовали пластическую смазку Литол-24 с добавками 5% масс. наночастицы чистых и модифицированных наночастиц магнетита. Наночастицы магнетита получали методом осаждения из раствора солей двух- и трехвалентного железа концентрированным водным раствором аммиака. Поверхностную модификацию наночастиц магнетита проводили в водных растворах глицина и капролактама при температуре 60 °С в течении 1 часа. Состав синтезированных и модифицированных частиц оценивали рентгенофазовый анализом (РФА) на автоматизированном приборе ARL X'TRA. Размеры и морфологию частиц изучали с помощью атомно-силовой микроскопии на сканирующем зондовом микроскопе PHYWE Compact AFM. Модельные структуры модифицированных наночастиц

магнетита и их характеристики определяли на основе квантово-химических расчетов методом теории функционала плотности B3LYP/Lan12DZ.

Обсуждение и результаты

Триботехнические испытания (рис. 1), позволили установить, что все смазки с модифицированными и чистыми наночастицами магнетита проявляют высокие противоизносные свойства по сравнению с чистой смазкой Литол-24. Так, диаметр износа при наличии в смазке частиц магнетита уменьшается на 10%, частиц магнетита, модифицированных глицином - 7,5 %, а в присутствии частиц магнетита модифицированных капролактамом - 17 %.

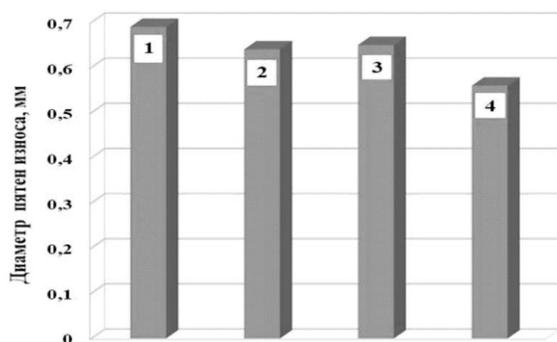


Рис. 1. Диаметр пятен износа при часовых испытаниях:
1 – Литол-24; 2 – Литол-24 и 5 % нанопорошка магнетита;
3 – Литол-24 и 5 % нанопорошка магнетита модификатор глицин;
4 – Литол-24 и 5 % нанопорошка магнетита модификатор капролактамам

Пятна износа имеют характерные изменения поверхности в результате пластической деформации и абразивного износа. Наиболее глубинных царапины и очаги микросваривания на поверхности контакта наблюдаются для образцов, работающих в смазке с чистыми наночастицами магнетита. Это связано с тем, что в процессе трения происходит агрегация наночастиц и частиц износа, которые выступают в роли абразивного вещества [5]. Менее интенсивные и глубинные борозды отмечаются на поверхности образцов, испытываемых в смазке с наночастица магнетита модифицированного капролактамам.

Особенности такого трибологического поведения смазки Литол-24 с модифицированными наночастицами магнетита связаны с структурным изменением поверхности наночастиц.

Известно [6], что в процессе модификации магнетита большую роль играют его адсорбционные свойства. Центрами адсорбции на поверхности магнетита выступают координационно-ненасыщенные ионы Fe^{+3} и Fe^{+2} , которые могут взаимодействовать с атомами азота и кислорода органических соединений с образованием комплексных соединений. Устойчивость комплексных соединений и их

свойства можно оценить на основе квантово-химических расчетов.

Результаты проведенных расчетов показывают, что комплекс магнетита с глицином обладает низкой энергией комплексобразования и низким значением дипольного момента. Связи с этим данные соединения являются нестабильными и не склонны к адсорбции. Это факт может выступать причиной более низких противоизносных характеристик смазки Литол-24 в присутствии модифицированных частиц магнетита глицином. Однако, комплексные соединения магнетита и капролактама характеризуются высокой полной энергией комплексобразования и высокими значениями дипольного момента. Поэтому устойчивость и полярные свойства таких соединений выше, что приводит к улучшению адсорбционной способности наночастиц магнетита и снижению их агрегации. Наличие комплексных соединений магнетита и капролактама в смазке Литол-24 обеспечивает стабильность смазки, способствует выдерживанию высоких температурных и нагрузочных режимов, препятствует адгезионному разрушению в зоне контакта и как следствие происходит улучшение противоизносных свойств смазки.

Выводы

Проведена модификация наночастиц магнетита глицином и капролактамом. Установлено, что наиболее высокие противоизносные свойства характерны для смазки Литол-24 с модифицированными капролактамом частицами магнетита. Улучшение триботехнических параметров смазки связано с образованием комплексных соединений в процессе модификации магнетита капролактамом, которые имеют высокую полярность и устойчивость согласно квантово-химическим расчетам.

- [1] Thampi A.D. et al. The effect of nanoparticle additives on the tribological properties of various lubricating oils—Review //Materials Today: Proceedings. – 2021. – Т. 47. – С. 4919-4924.
- [2] Chouhan M. et al. An investigation on the optimization of anti-wear performance of nano-Fe₃O₄ based ferro-magnetic lubricant //Jurnal Tribologi. – 2020. – Т. 25. – С. 119-135.
- [3] Shishkarev M. et al. Impact of Fe₃O₄ Nanoparticles on Viscous and Tribotechnical Properties of Oleic Acid //Robotics, Machinery and Engineering Technology for Precision Agriculture. – Springer, Singapore, 2022. – С. 205-212.
- [4] Javadian S. et al. Magnetic superhydrophobic polyurethane sponge loaded with Fe₃O₄@ oleic acid@ graphene oxide as high performance adsorbent oil from water //Chemical Engineering Journal. – 2021. – Т. 408. – С. 127369.
- [5] Singh A.K. et al. Effect of surface treatment on tribological characteristic of ferrite nanoparticles epoxy composites //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 802. – №. 1. – С. 012007.
- [6] José M. Liñeira del Río, et al. Tribological behavior of nanolubricants based on coated magnetic nanoparticles and trimethylolpropane trioleate base oil // Nanomaterials. – 2020. – Т. 10. – С.683-705.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК С ГИБРИДНОЙ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗОЙ

¹Ивахник А.В.*, ¹Жорник В.И., ²Зейналов Э.

* itmol@mail.ru

¹ГНУ Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь;

²Институт Катализа и Неорганической Химии им. акад. М.Ф. Нагиева НАН Азербайджана, Баку, Азербайджан.

Рассмотрены научно-технологические принципы формирования гибридной дисперсной фазы пластичных смазок, состоящей из мыльного (соли высших карбоновых кислот) и немыльного (высокодисперсные неорганические частицы) компонентов. Предложены технологические схемы получения гибридных пластичных смазок, содержащих, в частности, литиевый (или комплексный литиевый) мыльный компонент и ультрадисперсные углеродные частицы различного вида. Показано, что формирование гибридного строения дисперсной фазы существенно улучшает функциональные и технико-экономические показатели пластичной смазки.

Ключевые слова: пластичная смазка, гибридная дисперсная фаза, структура загустителя, реологические и трибологические свойства.

Введение

Пластичные смазочные материалы (ПСМ) по своему строению и составу являются коллоидными системами, состоящими из дисперсионной среды (масляная основа), дисперсной фазы (загуститель), а также функциональных добавок и присадок. В значительной степени эксплуатационные свойства, в том числе тиксотропность ПСМ определяется строением его дисперсной фазы (загустителя), которая представляет собой структурный каркас, удерживающий за счет сил адсорбционных, межмолекулярных и коллоидных взаимодействий дисперсионную среду (масляную основу). Именно дисперсная фаза (ДФ), содержание которой в ПСМ, как правило, составляет 10–25 масс.%, позволяет в обычных условиях смазке вести себя как твердое тело, а при приложении некоторой нагрузки – течь подобно жидкости. Также в случае ПСМ на минеральных базовых маслах на стоимость загустителя приходится 60–80 % от себестоимости. Существует четыре семейства загустителей: простые мыльные (в том числе смешанные); комплексные мыльные загустители; органические немыльные (парафины, церезины, петролатумы и др.); неорганические (силикогели, бентониты и др.). Во всех случаях дисперсная фаза ПСМ образована

FUNCTIONAL AND TECHNICAL AND ECONOMIC ADVANTAGES OF GREASES WITH HYBRID DISPERSED PHASE

Ivakhnik A.V., Zhornik V.I., Zeynalov E.

Scientific and technological principles of formation of hybrid dispersed phase of greases consisting of soapy (salts of higher carboxylic acids) and non-soapy (highly dispersed inorganic particles) components are considered. Technological schemes for obtaining hybrid greases containing, in particular, lithium (or complex lithium) soap component and ultradisperse carbon particles of various kinds are proposed. It is shown that the formation of the hybrid structure of the disperse phase significantly improves the functional and technical and economic performance of the grease.

Keywords: grease, hybrid dispersed phase, thickener structure, rheological and tribological properties

одним типом загустителя, т.е. имеет одинарную дисперсную фазу (ОДФ) [1–2].

К другой группе относятся ПСМ с загустителем, отличающимся гибридным строением, т.е. смазки с гибридной дисперсной фазой (ГДФ), представляющей собой либо комбинацию загустителей различных типов (например, мыльный загустителя и высокодисперсные неорганические (или органические) частицы). К числу таких смазок относится, например, нанокпозиционные литиевые смазки, имеющие загуститель в составе литиевая соль 12-гидроксистеариновой кислоты + наночастицы углерода. Смазочные материалы с ГДФ характеризуются комплексом улучшенных эксплуатационных свойств, к которым относятся: повышенная температура каплепадения, высокая механическая и коллоидная стабильность, хорошие противозносные и противозадирные свойства. Так же при синтезе данных материалов удаётся добиться незначительного повышения себестоимости, а часто даже и снижения ее [3–6].

Целью данной работы является анализ влияния принципа формирования гибридной дисперсной фазы пластичных смазок на их функциональные и технико-экономические свойства.

Материалы и методы

Для изготовления образцов пластичной смазки в качестве дисперсионной среды использовались смеси минеральных масел различной вязкости И-30А, И-40А, И-50А (ГОСТ 20799-2022). Мыльный компонент дисперсной фазы синтезировался в результате реакции нейтрализации высокомолекулярной 12-гидрооксистеариновой кислоты (ТУ 38 101 721) и низкомолекулярной борной кислоты (ГОСТ 18704-78) моногидратом гидроокиси лития (ГОСТ 8595-83). В качестве немыльного компонента использовались наноразмерные наполнители в виде диспергированного расширенного графита (РГ) пр-ва НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, ультрадисперсной алмазно-графитовой шихты марки ША-А (ША) пр-ва НП ЗАО «Синта» (ТУ РБ 100056180.003-2003) и углеродных нанотрубок (УНТ) пр-ва ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси.

Образцы ПСМ синтезировались в лабораторном реакторе объемом 3,0 л, оборудованном планетарной мешалкой, программируемым нагревом, циркуляционным контуром с возможностью отбора образцов, подключения диспергатора, фильтрации продукта.

Исследование структуры дисперсной фазы образцов пластичной смазки проводилось с использованием сканирующей электронной микроскопии. Свойства ПСМ оценивались в соответствии с методиками по показателю пенетрации (ГОСТ 5346-78), температуре каплепадения (ГОСТ 32322-2013), коллоидной стабильности (ГОСТ 7142-74), пределу прочности при сдвиге (ГОСТ 7143-84), а также по трибологическим характеристикам, определяемым на четырехшариковой машине трения (ГОСТ 9490-75).

Технологический прием синтеза ПСМ, имеющего ГДФ, содержащую наряду с мыльным загустителем также и ультрадисперсные (наноразмерные) частицы (немыльный компонент), состоит в предварительном введении этих частиц в дисперсионную среду и их активации с последующим введением в образовавшуюся масляную суспензию сырья, необходимого для формирования мыльного компонента ГДФ (т. е. кислот и щелочей). После этого технологический процесс протекает по традиционной схеме с участием активированных ультрадисперсных частиц наполнителя в формировании структуры ГДФ. При этом в процессе нагревания и перемешивания реакционной массы и протекания различного вида химических реакций происходит механическая, термическая и химическая активация компонентов,

способствующая появлению прочных физических и химических связей между различными элементами дисперсной фазы и образованию ее гибридного строения.

Результаты и обсуждение

Были синтезированы комплексные литиевые смазки (kLi-смазки) как с ОДФ (10 масс% загустителя), так и гибридные по разработанной технологии с помощью различных углеродных добавок (соотношение kLi солей и немыльного загустителя подбиралось с учетом получения смазки 2 класса пенетрации). Структура дисперсных фаз представлена на рис 1.

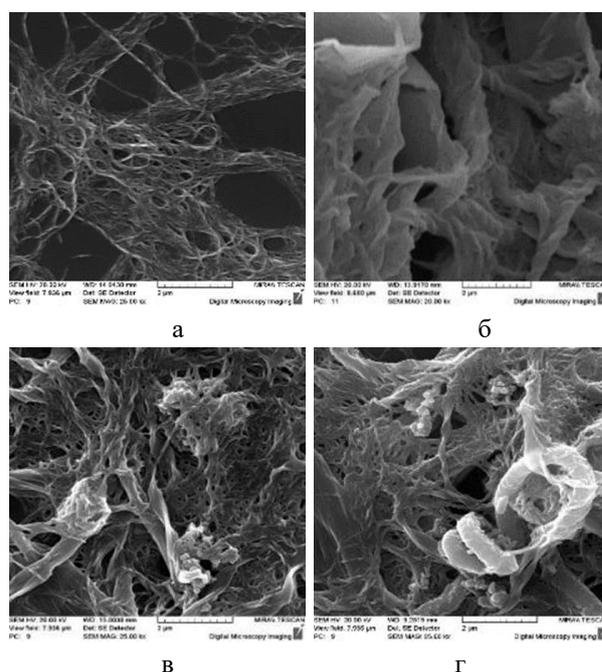


Рис.1. Микроструктура ОДФ комплексной литиевой смазки (а) и ГДФ комплексной литиевой смазки, содержащей ультрадисперсные углеродные частицы различного вида: б – РГ; в – ША; г – УНТ

Видно, что при синтезе ГДФ ПСМ с участием ультрадисперсных частиц немыльного компонента формируется уникальный разветвленный структурный каркас дисперсной фазы благодаря структурообразующим качествам вводимого немыльного компонента. При этом частицы немыльного компонента либо включены во внутрь волокон мыльной составляющей ГДФ, либо прочно зафиксированными их переплетениями. Такая структура во-многом и предопределяет повышенные функциональные свойства гибридных ПСМ.

Реологические свойства ПСМ (пенетрация, коллоидная стабильность, температура каплепадения и др.) также, как и их трибологические свойства (нагрузка сваривания, индекс задира, показатель износа и др.) весьма существенно зависят от состава и

структуры их дисперсной фазы. Влияние вида углеродного ультрадисперсного модификатора ПСМ (немыльного компонента ГДФ) и сопоставление свойств kLi-смазки с ГДФ со свойствами kLi-смазки имеющей ОДФ при отсутствии ультрадисперсных наполнителей, приведено в табл. 1.

Табл. 1. Сравнение показателей kLi-смазки, модифицированной различными ультрадисперсными углеродными добавками

Показатель	kLi-смазка	kLi-смазки		
		модификатор		
		РГ	ША	УНТ
Пенетрация, 0,1 мм	285	250	275	270
Температура каплепадения, °С	235	>300	248	247
Предел прочности при сдвиге, Па, при температуре 20°С	550	980	730	725
Коллоидная стабильность, %	12	7	6	7
Трибологические характеристики:				
– нагрузка сваривания, Н	2500	3720	3920	3530
– индекс задира, Н	450	580	617	570
Изменение себестоимости относительно базовой kLi-смазки	1	0,82	1,1	1,25

Анализ приведенных значений указывает на то, что показатели реологических и трибологических свойств комплексной литиевой смазки, с гибридной дисперсной фазой модифицированной ультрадисперсными углеродными наполнителями, существенно превышают уровень комплексной литиевой смазки с одинарной дисперсной фазой. Температура каплепадения для kLi-смазок с ГДФ находится в диапазоне 240–250 °С, предел прочности при сдвиге (при 20°С) составляет 700–950 Па, коллоидная стабильность – 6–7 %, а нагрузка сваривания находится на уровне 3530–3920 Н. Наибольший загущающий эффектом демонстрирует ГДФ, имеющая в своем составе РГ), также она отличается наилучшей термостойкостью. Фактически температура каплепадения отсутствует и максимальная температура применения ограничивается только термостойкостью дисперсионной среды. При этом наиболее высокий уровень трибологических свойств отмечен у комплексной смазки с ГДФ, включающей ультрадисперсные частицы алмазно-графитовой шихты ША-А.

Заключение

Показано, что формирование гибридной дисперсной фазы существенно улучшает функциональные свойства ПСМ. В частности, на

примере комплексной литиевой смазки, модифицированной ультрадисперсными частицами алмазно-графитовой шихты ША-А, введенными по различным технологическим схемам, показано при гибридной дисперсной фазе улучшается коллоидная стабильность (маслоудержание) (от 11 до 6 %), повышаются температура каплепадения (от 235 до 248 °С) и нагрузка сваривания (от $P_c = 2350$ Н до $P_c = 3920$ Н). При этом благодаря большому загущающему эффекту ГДФ удалось снизить содержание мыльного компонента на 35,0–40,0 масс.% (снижение содержания дефицитной 12-гидроксистеариновой кислоты, не производящейся на территории СНГ и дорогостоящей гидроокиси лития). Благодаря чему, не смотря на использование дорогостоящей добавки, себестоимость конечного продукта удалось сохранить на уровне не модифицированной смазки с повышением при этом функциональных свойств. Важным является то, что применение данной технологии позволяет осуществлять синтез пластичных смазок с ГДФ на традиционном оборудовании предприятий по выпуску пластичных смазок с минимальными производственными затратами.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ (грант № T22A3Г-001).

- [1] Ищук, Ю.Л. Состав структура и свойства пластичных смазок – Киев: Наук. думка, 1996. – 510 с.
- [2] Манг Т. Смазки. Производство, применение, свойства: Справочник: пер. 2-го англ. Изд. / Т. Манг, У. Дрезель; под ред. В.М. Школьникова. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2010. – 994 с.
- [3] Ивахник А.В. Пластичные смазочные материалы на основе бинарной дисперсной фазы повышенной нагрузочной способности – Дис. ... канд. техн. наук. Специальность 05.16.09 – Материаловедение (машиностроение). – Минск. – 2014. – 190 с.
- [4] Жорник В.И., Ивахник А.В., Ивахник В.П. Пластичные смазки, модифицированные углеродными наноматериалами // Наноструктуры в конденсированных средах: сб. науч. статей. – Минск: Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2016. – С. 504–508.
- [5] Пластичная смазка на основе лития, содержащая наноалмаз, и способ ее получения (Lithium-based lubricating grease containing nanodiamond and method of its preparation) [Электронный ресурс]: пат. CN 106675734 / Guo Liuxi, Zhao Qingguo, Yang Jinzhong, Li Meng, Wu Yanqiang, Yin Wei Zhao, Wang Cong. – Опубл. 17.05.2017. – Режим доступа: <https://patentimages.storage.googleapis.com/6b/5b/59/3b9bc0221b3ba/f/CN106675734A.pdf>. – Дата доступа: 14.08.2024.
- [6] On the use of single wall carbon nanotubes and other graphitic solids as lubricating grease thickeners / J. Andrew Waynick, Dr. Haiping Hong. – NLGI Spokesman, 2019. – Т. 83. – № 4. – С. 6-14.

ИССЛЕДОВАНИЕ СМАЗОК С ГИБРИДНОЙ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗОЙ В СОСТАВЕ ЛИТИЕВЫХ СОЛЕЙ И ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

Ивахник А.В.*, Жорник В.И., Ивахник В.П.

* itmol@mail.ru

ГНУ Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь.

Созданы новые образцы пластичных смазок с гибридной дисперсной фазой в составе литиевых солей и микро размерной целлюлозы. Рассмотрены способы активации целлюлозы для углубления процесса гибридной дисперсии. Приведены результаты испытаний опытных образцов. Установлено значительное влияние добавок целлюлозы и технологии ее введения на пенетрацию, триботехнические свойства смазок, их коллоидную стабильность. Благодаря загущающему эффекту гибридной дисперсной фазы удалось снизить содержание высокомолекулярных солей лития на 45 – 50 масс% с сохранением класса пенетрации.

Ключевые слова: пластичные смазочные материалы, гибридная дисперсная фаза, микро размерная целлюлоза, литиевые соли, триботехнические параметры.

Введение

Одним из перспективных направлений улучшения свойств пластичных смазочных материалов (ПСМ) является применение наполнителей, в основном, неорганических таких как глина, кремнезем, мел, диоксид титана и др. Однако неорганические наполнители имеют следующие недостатки: высокая плотность, которая увеличивает вес продукта; высокая истираемость, которая снижает ресурс добавки и загрязняет смазочный объем; низкая способность связывания с маслонеполненными системами, что повышает их склонность к агрегатированию, разделению фаз и снижает механическую и коллоидную стабильность смазок; высокая биостойкость препятствует производству с их применением биоразлагаемых смазочных материалов. В отличие от неорганических, органические добавки могут содержать различные функциональные группы, которые позволяют связывать их с органической составляющей мыльного загустителя ПСМ, что, в свою очередь, приводит к повышению прочности загустителя. Кроме того, органические добавки, такие как микроцеллюлоза, имеют низкую плотность, низкую твердость и истираемость, а также повышенную устойчивость дисперсий к

STUDY OF LUBRICANTS WITH HYBRID DISPERSED PHASE COMPOSED OF LITHIUM SALTS AND CELLULOSE

Ivakhnik A.V., Zhornik V.I., Ivakhnik V.P.

New samples of greases with hybrid dispersed phase in the composition of lithium salts and micro dimensional cellulose are created. Methods of cellulose activation for deepening of hybridization process are considered. Test results of prototypes are given. Significant influence of cellulose additives and technology of its introduction on penetration, tribotechnical properties of greases, their colloidal stability is established. Due to the thickening effect of hybrid disperse phase it was possible to reduce the content of high-molecular lithium salts by 45-50 wt% while maintaining the penetration class.

Keywords: grease, hybrid dispersed phase, micro sized cellulose, lithium salts, tribometric parameters.

осаждению и т.д. Кроме того, органические добавки из целлюлозы биоразлагаемы. Все это делает перспективным применение целлюлозы в ПСМ. Однако по своей природе целлюлоза является олеофобной, и для эффективного применения в смазках ей требуется придать свойство олеофильности. После модифицирования волокна целлюлозы проявляют себя не только как триботехническая добавка, но и как эффективный загуститель в составе гибридной дисперсной фазы (ГДФ) пластичной смазки [1-3].

Дополнительным стимулом для создания новых немывных ПСМ являются дефицитность 12-гидрооксистеариновой кислоты, которая не производится в странах СНГ, и высокая стоимость гидроксида лития, имеющая тренды к постоянному росту в связи с развитием электротранспорта. Все более актуальным становится поиск местного и возобновляемого сырья [4-6]. Частично эту проблему возможно решить, используя загущающую способность волокон целлюлозы.

Материалы и методы

Для изготовления образцов ПСМ в качестве дисперсионной среды использовалось минеральное масло средней вязкости И-50А (ГОСТ 20799-2022). Мыльный компонент дисперсной фазы

синтезировался в результате реакции нейтрализации высокомолекулярной 12-гидрооксистеариновой кислоты (ТУ 38 101 721) моногидратом гидроксили лития (ГОСТ 8595-83). В качестве немывного компонента использовалась микроразмерная мелкокристаллическая целлюлоза FLOCEL 102.

Образцы ПСМ синтезировались в лабораторном реакторе объемом 3,0 л, оборудованном планетарной мешалкой, устройством программируемого нагрева, циркуляционным контуром с возможностью отбора образцов, подключения диспергатора, фильтрации продукта. Дополнительные присадки и наполнители в состав смазки вводились.

Свойства ПСМ оценивались в соответствии со стандартизованными методиками по показателю пенетрации (ГОСТ 5346-78), температуре каплепадения (ГОСТ 32322-2013), коллоидной стабильности (ГОСТ 7142-74), пределу прочности при сдвиге (ГОСТ 7143-84), а также по трибологическим характеристикам, определяемым на четырехшариковой машине трения (ГОСТ 9490-75).

Результаты и обсуждение

Для исследований были синтезированы образцы литиевых смазок (Li-смазки) как с одинарной дисперсной фазой (5 масс.% литиевого загустителя), изготовленные по традиционной технологии, так и с ГДФ, изготовленные по специально разработанной технологии. Смазки с целлюлозой изготавливались по рецептуре: во всех случаях содержалось 5 масс.% 12-гидрооксистеарата лития (LioSt) и 5 масс.% модифицированной и немодифицированной целлюлозы, введенной до стадии омыления и на стадии охлаждения.

Результаты определения реологических показателей полученных образцов ПСМ с добавками немодифицированной и модифицированной целлюлозы представлены в табл. 1, в которой для сравнения также приведены данные для пластичной смазки с целлюлозой, введенной по традиционной технологии.

Из приведенных данных видно, что введение целлюлозы, как немодифицированной, так и модифицированной по традиционной технологии практически не влияет на реологические свойства смазки. При этом введение модифицированной целлюлозы по разработанному методу оказывает существенное влияние на реологические свойства ПСМ. В частности, пенетрация и коллоидная стабильность изменились на 37 и 16 единиц соответственно, а предел прочности увеличился на 600 Па, также на 13 °С выросла температура каплепадения.

Табл. 1. Реологические показатели гибридной пластичной смазки на основе гибридной дисперсной фазы «целлюлоза – LioSt» и литиевой смазки с целлюлозой, введенной по традиционной технологии.

Наименование показателя	Значение			
	Без добавки целлюлозы 5 масс.% LioSt	Традиционная технология 5 масс.% LioSt+5 масс.% не мод. целлюлозы	Традиционная технология 5 масс.% LioSt +5 масс.% мод. целлюлозы	Разработанная технология 5 масс.% LioSt +5 масс.% мод. целлюлозы
Пенетрация, мм·10 ⁻¹	305	302	298	268
Предел прочности на сдвиг, Па, при 20 °С	210	240	285	870
Коллоидная стабильность %	28	28	25	12
Температура каплепадения, °С	193	193	197	205

Результаты триботехнических испытаний литиевых смазок, представлены в таблице 2. При этом образцы смазок, содержащих целлюлозу, имели гибридное строение дисперсной фазы, включающей мыльный литиевый загуститель в количестве 5,0 масс.% и различное количество (от 0 до 7,5 масс.%) немывного компонента дисперсной фазы в виде волокон целлюлозы

Табл. 2. Триботехнические свойства литиевых смазок с ГДФ с добавлением разного содержания целлюлозы

Содержание модифицированной целлюлозы, масс. %	Нагрузка заедания, Н	Нагрузка сваривания, Н	Показатель износа при 40 кгс, мм
—	617	1098	4,6
1,0	980	1166	4,35
2,5	1166	1235	3,22
5,0	1235	1303	2,40
7,5	1235	1303	2,35

По результатам испытаний видно, что целлюлоза является средне эффективной триботехнической добавкой. При этом в большей мере увеличиваются противоизносные свойства, чем противозадирные. Для повышения триботехнических свойств требуется введение значительного количества целлюлозы, но при увеличении содержания целлюлозы свыше 5 масс% прироста триботехнических свойств не наблюдается.

Заключение

Установлено, что без обработки целлюлозы с целью придания ей олеофильности не получается добиться образования гибридной дисперсной фазы, независимо от размеров частиц целлюлозы. При этом обнаружено значительное положительное влияние добавок целлюлозы на противоизносные свойства смазки. Так введение 5,0 масс.% целлюлозы увеличило критическую нагрузку на 70–80 %, при этом нагрузка сваривания увеличилась незначительно (на 10–15 %). При реализации разработанного метода образуется гибридная дисперсная фаза смазки, отличающаяся прочными физическими и химическими связями между мицеллами целлюлозы и волокнами мыльной составляющей загустителя, что придает смазке улучшенные реологические и триботехнические свойства.

Синтез пластичных смазок с гетерогенной дисперсной фазой, содержащей добавки целлюлозы, введенной по разработанному методу, может быть реализован на традиционном технологическом оборудовании предприятий по выпуску пластичных смазок с минимальными дополнительными производственными затратами.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИИ (грант № T22A3Г-001).

- [1] Манг Т. Смазки. Производство, применение, свойства: Справочник: пер. 2-го англ. Изд. / Т. Манг, У. Дрезель; под ред. В.М. Школьников. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2010. – 994 с.
- [2] Паренаго О. П., Сафиева Р. З., Антонов С. В., Стенина Н. Д., Лядов А. С. Состояние и перспективы развития производства биоразлагаемых пластичных смазок (обзор) // Нефтехимия. – 2017. – Т. 57. – № 6. – С. 766-768.
- [3] Devin Granger, Renato Baptista de Oliveria, Shoshana Sakolsky. Organic solid EP additive for lubricating greases // NLGI Spokesman. – 2024. – Т. 88 – № 1. – С. 28-34.
- [4] Dwaine Morris. Novel lithium free thickener system – performance profile // NLGI Spokesman. – 2022 – Т. 86. – № 3. – С. 8-15.
- [5] Devin Granger, Shadaab Maghrabi. Modified fatty acids as alternative soap thickeners for lubricating greases // NLGI Spokesman. – 2022. – Т. 85. – № 6. – С. 28-34.
- [6] Mehdi Fathi-Najafi, John Kay. Moving forward... Can lubricating grease be produced in a more efficient way // NLGI Spokesman. – 2019. – Т. 81. – № 1. – С. 1–10.

ЭФФЕКТ БЕЗЫЗНОСТИ В КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЯХ

¹Ипатов А.Г.*, ²Харанжевский Е.В., ³Макаров А.В.

* Ipatow.al@yandex.ru

¹Удмуртский государственный аграрный университет, Ижевск, Россия;

²Удмуртский государственный университет, Ижевск, Россия;

³Института физики металлов имени М.Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия.

Представленные исследования направлены на анализ трибологического поведения тонкого керамического покрытия на основе оксидов марганца и висмута, полученного короткоимпульсной лазерной наплавкой, в сопряжении со стандартными сплавами. Полученные результаты выявили, что в условиях граничного трения в сопряжении с алюминиевым сплавом АЖ1 наблюдается нулевой износ контактирующих поверхностей. Повышение динамических и кинематических условий испытаний не приводят к повышению температуры, что определяет атермические процессы самоорганизации трибосопряжения за счет пластической деформации контактирующих поверхностей. Данное явление открывает новую страницу в понимании эффекта безызносности, а результаты исследований имеют высокий научный и практический потенциал.

Ключевые слова: легирование висмутом, безызносность, короткоимпульсная лазерная обработка, трение, алюминиевый сплав.

Введение

Из исследований ряда отечественных и зарубежных исследователей следует, что снижение адгезионного изнашивания в сопряжениях предполагает абсорбцию молекул одной поверхности к противоположной поверхности с последующим ее резким освобождением при дальнейшем движении поверхностей [1-4]. В предыдущих исследованиях нами был представлен инновационный метод, позволяющий значительно снизить адгезию в подшипниках скольжения, работающих в условиях ограниченной смазки [5]. Керамические покрытия на основе оксидов марганца и висмута показали рекордные трибологические характеристики в отсутствие смазки и продемонстрировали сверхнизкий коэффициент трения при скольжении в сопряжении с бронзой при скоростях до 3 м/с. Тем не менее, нерешенной инженерной проблемой является невозможность достичь сверхнизких характеристик износа обеих контактирующих поверхностей при высоких динамических и кинематических нагрузках.

WEARLESS EFFECT IN CERAMIC COATINGS

Ipatov A.G., Kharanzhevskiy E.V., Makarov A.V.

The presented research is aimed at analyzing the tribological behavior of a ceramic coating based on bismuth oxide obtained by short-pulse laser cladding in conjunction with standard alloys. The obtained results revealed that under boundary friction conditions in conjunction with aluminum alloy, zero wear of the contacting surfaces is observed. Increasing the dynamic and kinematic test conditions does not lead to an increase in temperature, which determines the athermal processes of self-organization of the tribocoupling due to plastic deformation of the contacting surfaces. This phenomenon opens a new page in understanding the effect of wearlessness, and the research results have high scientific and practical potential.

Keywords: bismuth alloying, wearless, short-pulse laser treatment, friction, aluminum alloy.

Основной целью данных исследований является описание условий безызносности керамического покрытия на основе оксидов марганца и висмута в условиях граничного трения с высокими кинематическими и динамическими режимами испытаний.

Материалы и методы исследований

Керамическое покрытие на поверхности стального диска получили с использованием короткоимпульсного лазерного излучения. В качестве присадочного материала использовали мелкодисперсную порошковую композицию мелкодисперсной порошковой смеси, состоящей из оксида висмута (Bi_2O_3) и оксида марганца (MnO_2). Результаты исследований, представленные в работе [5, 6, 7], показали, что рациональный состав порошковой композиции, при котором формируется минимальный коэффициент трения, соответствует 20 мас. % Bi_2O_3 в смеси с MnO_2 .

Для испытаний на износ стальные диски были изготовлены из углеродистой стали марки 40 (содержащей 0,4% С по ГОСТ 1050-88) твердостью 34HRC. После подготовки на поверхность стальных

дисков наносили тонкий слой порошковой композиции (до 35 мкм) с последующей короткоимпульсной лазерной обработкой порошкового слоя в специальной камере с защитной аргоновой средой. Для достижения требуемых параметров шероховатости легированная поверхность была подвержена алмазному выглаживанию. Трибологические исследования выполнили по схеме «палец-диск» в соответствии с ГОСТ 30480-97 в условиях граничного трения.

Использование диска большого диаметра (190 мм) обеспечило различные кинематические условия испытаний в зависимости от диаметра дорожки трения. Для анализа трибологических свойств легированной поверхности стального диска испытания провели в контакте со стандартными сплавами – бронзой БрАЖНМц10-4-2, алюминиевым сплавом АЖ-1, серым чугуном СЧ18. Трибологические исследования выполнялись при трех различных скоростях трения: 3, 6 и 9 м/с. При каждой скорости трения проводили испытания с различной нормальной нагрузкой на палец в диапазоне от 25 до 250 Н (через 25 Н). Каждое испытание на износ включало в себя путь трения длиной 2000 м, в результате чего совокупный путь скольжения для каждой пары диск-палец составил 60 км. Оценку износа проводили путем анализа изменения массы Δm контртела с помощью аналитических весов с точностью 0,01 мг.

Шероховатость поверхности образцов и геометрию следов износа оценивали с помощью 3D-оптического профилометра Wyko NT 1100 (Veeco). Оптическую микроскопию поверхностей проводили с использованием оптического микроскопа Olympus GX53F.

Результаты и их обсуждение.

Испытания выявили способность исследуемого керамического покрытия достигать сверхнизких коэффициентов трения в паре с алюминиевым контртелом. Прирабатываемость и задиристость наблюдается в широком диапазоне кинематических и динамических нагрузок (рис. 1а). Крайне важно подчеркнуть, что температура в зоне контакта не превышала 55 °С даже при высокой скорости скольжения 9 м/с и при динамическом нагружении в 250 Н в отсутствие подачи смазки.

В сопряжении с бронзовым контртелом динамика поведения коэффициента трения аналогична с алюминиевым контртелом (рис. 1б). Однако заметное различие наблюдается при нормальном усилии 250 Н и скорости 9 м/с, где зарегистрировано скачкообразное повышение коэффициента трения (рис. 1б). Повышение коэффициента трения сопровождается также

значительным повышением температуры в зоне контакта. Скачкообразное повышение температуры указывает на формирование адгезионных связей, что вызывает интенсивное изнашивание с последующим схватыванием контактирующих тел.

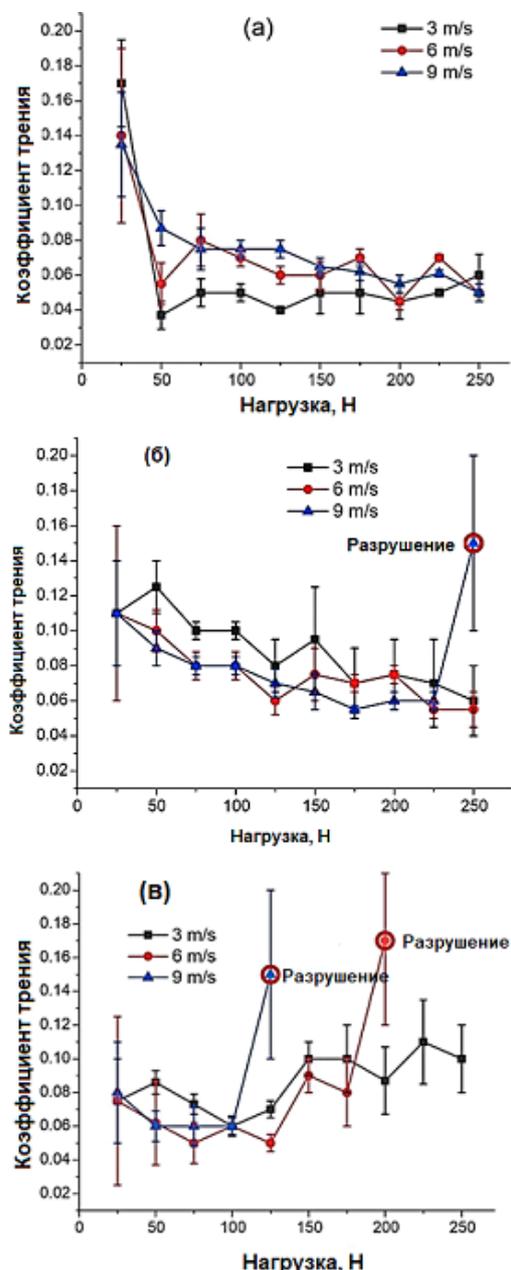


Рис. 1 Зависимость среднего значения коэффициента трения: а – для алюминиевого контртела, б – бронзового контртела, в – чугунного контртела

Достижение сверхнизких коэффициентов трения в сопряжениях из родственных сплавов крайне сложно и практически невозможно в условиях граничной смазки и интенсивного трения [8-10]. Результаты, полученные в результате испытаний на трение в сопряжении с чугунным контртелом (рис. 1в), демонстрируют возможность достижения сверхнизкого трения скольжения без присутствия смазочных материалов до

определенного порога нормальных нагрузок, определяемого скоростью скольжения. Оптический анализ подтвердил адгезионное взаимодействие контактирующих поверхностей у бронзового и чугунного контртел. Из оптического анализа следует, что разрушение бронзового контртела носит усталостный характер, что вызвано высоким циклическим динамическим нагружением [11,12]. На поверхности чугунного контртела наблюдаются следы износа, связанные с интенсивным усталостным разрушением. Необходимо отметить, что заметный износ для пары легированный диск – чугунное контртело, также зарегистрирован только при испытаниях с максимальной нормальной нагрузкой.

Наиболее интересным является поведение пары трения керамическое покрытие – алюминиевый палец. Оптический анализ поверхности пальца показывает образование контактной площадки в процессе испытания. Однако, 3D-оптическая профилометрия алюминиевого контртела после испытаний выявила, что формирование площади контакта происходит не за счет изнашивания поверхности, а за счет пластической деформации поверхностного слоя контртела под действием нормальных нагрузок. Отсутствие изнашивание подтверждается анализом величины износов. Износ на всех этапах испытаний находится в пределах ошибки измерения, что особенно заметно при более высоких скоростях скольжения 9 м/с. При этом стоит отметить стабильно низкий температурный фон работы сопряжения, не превышающий 55 °С. Данное состояние трибологических параметров характерно для эффекта безызносности. Процесс приработки и самоорганизация процесса трения реализуются за счет пластического течения материала под действием относительно высоких нормальных нагрузок. Высокие удельные нагрузки в зоне контакта направлены не на разрушение контактирующих тел, а на процессы пластической деформации и тем самым самоорганизации процессов трения с обеспечением минимального коэффициента трения.

Выводы

Тонкое керамическое покрытие на основе оксидов марганца и висмута демонстрирует сверхнизкий коэффициент трения скольжения без подачи смазки в парах трения с контртелами из бронзы, чугуна и алюминиевого сплава. Бронза и чугун в ходе испытаний с высокой динамической и кинематической нагрузкой подвержены усталостному изнашиванию за счет относительно низкой циклической прочности. Высокая циклическая прочность алюминиевого сплава и пластичность

структуры совместно с низкой адгезионной активностью в паре с керамическим покрытием, создают условия для перехода в режим безызносного трения в условиях отсутствия интенсивной смазки и при высоких динамических нагрузках. Природа безызносного трения в исследуемых образцах определяется подавлением межмолекулярного взаимодействия между трущимися телами, устранением механической составляющей трения, а также процессами самоорганизации поверхностей трения за счет выгодного перераспределения материала в зоне контакта. Исследуемое явление открывает новые возможности в обеспечении безызносности подшипниковых сопряжений за счет подавления молекулярной и механической составляющих трения контактирующих тел.

Полученные экспериментальные данные имеют высокий научный и практический потенциал и могут быть реализованы в машиностроении при проектировании подшипников скольжения.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 19-79-20012.

- [1] Горячева И.Г., Добычин М.Н. Итоги развития молекулярно-механической теории трения // Трение и износ. – 2008. – Т.29. – №4. – С. 327-337.
- [2] Польшер Г., Майсснер Ф. Основы трения и изнашивания – М.: Машиностроение. – 1984. – 264 с.
- [3] Ahmatov A.S. Molecular physics of boundary friction, Publ. Israel Program for Scientific Translations, University of California, 1966. – 480 с.
- [4] Tomlinson G.A. A molecular theory of friction //The London, Edinburgh, and Dublin philosophical magazine and journal of science. – 1929. – Т. 7. – №. 46. – С. 905-939.
- [5] Kharanzhevskiy E. V. et al. Towards eliminating friction and wear in plain bearings operating without lubrication //Scientific Reports. – 2023. – Т. 13. – №. 1. – С. 17362.
- [6] Ipatov A.G. et al. Reconditioning of Hydraulic Motor Shaft Mounting Surface by Selective Laser Melting //Steel in Translation. – 2023. – Т. 53. – №. 3. – С. 248-252.
- [7] Ипатов А. Г. и др. Триботехнические свойства керамических антифрикционных покрытий на основе оксида железа и оксида бора //Трение и износ. – 2023. – Т. 44. – №. 5. – С. 427-434.
- [8] Pratt G.C. Materials for plain bearings //International Metallurgical Reviews. – 1973. – Т. 18. – №. 2. – С. 62-88.
- [9] Hutchings I., Shipway P. Tribology: friction and wear of engineering materials. – Butterworth-heinemann, 2017.
- [10] Barlemont S. et al. Effect of the countermaterial on the tribological behavior of Cu45Zr46Al7Nb2 bulk metallic glass //Wear. – 2023. – Т. 522. – С. 204712.
- [11] Daure J. L. et al. Galling of stainless steels as a function of test conditions in an ASTM G196-type test setup–The role of temperature, rotational velocity, interrupted rotation and rotational distance //Wear. – 2023. – Т. 524. – 204804.
- [12] Wang H. H. et al. Wear and rolling contact fatigue competition mechanism of different types of rail steels under various slip ratios //Wear. – 2023. – Т. 522. – С. 204721.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В КОНИЧЕСКИХ МЕЛЬНИЦАХ

Карцев И.С.

johnkarcev@gmail.com

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия.

С помощью методов математического планирования эксперимента и обработки полученных результатов исследуется зависимость параметра оптимизации, в качестве которого выбран размер помолотого зерна от значимых факторов, определяющих ход данного технологического процесса с целью последующего управления свойствами полученной продукции. В результате проведенных математических расчетов получено уравнение регрессии в виде полинома первого и второго порядка, характеризующие вклад каждого фактора в процесс измельчения зерновых культур на мельницах конического типа.

Ключевые слова: зазор, математическая модель, мельница коническая, параметр оптимизации, ротор, статор, скорость вращения, разрушение, уравнение регрессии.

Введение

Одной из главных задач при проектировании технологических процессов измельчения зерновых культур – нахождение оптимальных параметров, при которых выходной параметр имел бы экстремальное значение. В практической деятельности часто требуется оценить параметры, т.е. построить ее математическую модель и найти численные значения параметров этой модели. В нашем случае – это технологический процесс измельчения зерновых культур при использовании конических мельниц. Анализ современных конструктивно-технологических схем конических мельниц отечественного и зарубежного производства, результаты исследований, свидетельствуют о том, что значительно повысить эффективность рабочего процесса конических мельниц можно лишь за счет правильно подобранного режима работы мельницы при разрушении зерна и контроля величины получаемых частиц. При этом важно выбрать такой режим разрушения зерна, который позволил бы добиться максимальной однородности получаемого продукта (минимальное количество муковидных частиц). В

MATHEMATICAL MODEL OF OPTIMIZATION OF CONTROLLED PARAMETERS IN THE DESTRUCTION OF GRAIN CROPS IN CONICAL MILLS

Kartsev I.S.

Using methods of mathematical planning of the experiment and processing of the obtained results, the dependence of the optimization parameter, which is the size of the ground grain, on significant factors determining the course of this technological process for the purpose of subsequent control of the properties of the obtained products is studied. As a result of the mathematical calculations, a regression equation was obtained in the form of a first- and second-order polynomial, characterizing the contribution of each factor to the process of grinding grain crops in conical mills.

Keywords: gap, mathematical model, conical mill, optimization parameter, rotor, stator, rotation speed, destruction, regression equation.

этом случае энергия, затраченная на разрушение зерновых культур, используется с максимальной эффективностью.

Цели и задачи исследования

Основной целью настоящей работы является разработка математической модели процесса измельчения зерновых культур, обеспечивающего эффективное разрушение зерна, за счет оптимизации параметров измельчительной машины конического типа.

В соответствии с целью, поставлены следующие задачи исследования: вывести уравнения регрессии в виде полинома первого и второго порядка для кодированных и натуральных значений.

Рекомендовать оптимальные параметры процесса измельчения зерновых культур для получения наивысшего качества готовой продукции.

Материалы и методы исследований

На процесс разрушения зерновых культур воздействует множество факторов, которые в различной степени влияют на качество получаемой продукции. Для исследования процесса разрушения спроектирована и изготовлена установка,

воспроизводящая реальные процессы разрушения зерна в конических мельницах в лабораторных условиях при различных режимах работы [1]. В качестве параметра оптимизации процесса разрушения зерновых культур при использовании мельниц конического типа был выбран – размер и однородность получаемой продукции. Математическое ожидание критерия оптимизации как функцию от градиента входных управляемых переменных (факторов), можно записать в виде выражения:

$$M(Y) = F(X) = F(X_1; X_2), \quad (1)$$

где:

X_1 – скорость вращения ротора (500–1000 мин⁻¹);

X_2 – зазор между ротором и статором (0,5–2 мм).

Полный факторный эксперимент по определению качества помола «модели 2²» в котором реализуются все сочетания двух факторов, каждый из которых варьируется по двум уровням. В результате аппроксимации функции (1) математическая модель системы с учетом взаимодействий имеет вид:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 \quad (2)$$

где: b_0 ; b_1 ; b_2 – искомые параметры математической модели.

Математическая обработка результатов экспериментальных исследований выполнена в последовательности, характерной для полного факторного эксперимента. Для упрощения записи условий эксперимента и обработки экспериментальных данных введены кодированные независимые переменные. Верхний уровень значения каждого фактора соответствовал «+1», нижний «-1» (Рис. 1). Результаты планирования эксперимента представлены в табл. 1.

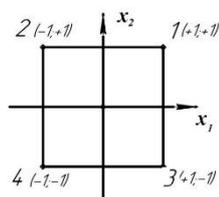


Рис. 1. Расположение опытов эксперимента 2² в системе кодированных переменных

Произвели замеры помолотого зерна. Измеряемые образцы помолотого зерна были случайно взяты из получаемой в ходе каждого эксперимента партии. Полученные данные позволили проанализировать средний размер получаемой продукции, а также визуально оценить качество помола и наличие муковидных частиц.

Табл. 1. Матрица планирования эксперимента

Показатель	Исследуемый фактор				Средний размер помоло- того зерна
		Скорость вращения, мин ⁻¹	Зазор, мм	Сочетания действия факторов	
Кодовое обозначение	x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	Y
Опыт 1	+	+	+	+	0,548
Опыт 2	+	-	+	-	0,465
Опыт 3	+	+	-	-	1,395
Опыт 4	+	-	-	+	1,503

В результате математической обработки результатов опытов получены коэффициенты регрессии, выведено уравнение регрессии в виде полинома первого порядка:

$$Y = 0,975 + 0,00625x_1 + 0,471x_2 + 0,0475x_1x_2. \quad (3)$$

Анализ полученного линейного уравнения (3) дает возможность, установить в какой степени каждый из факторов влияет на размер получаемой продукции. Величина коэффициентов при независимых переменных указывает на силу влияния факторов, и чем больше коэффициент, тем сильнее влияет фактор. Знаки коэффициентов характеризуют влияние факторов. При знаке коэффициента «плюс» отметка возрастает, при знаке «минус» – уменьшается. Однако пользоваться уравнением регрессии для интерпретации полученных результатов и практических расчетов неудобно, поэтому рекомендуется преобразовать его по формулам перехода от кодированных значений (x_1 ; x_2) к натуральным факторам ($x_{1нат}$; $x_{2нат}$) представленными выражениями (4):

$$x_{1код} = \frac{x_{1нат} - x_{1сп}}{\Delta x_1}, \quad x_{2код} = \frac{x_{2нат} - x_{2сп}}{\Delta x_2}, \quad (4)$$

где:

$x_{1нат}$, $x_{2нат}$ – натуральное значение факторов;

Δx_1 , Δx_2 – значение интервалов варьирования;

$x_{1сп} = 750$; $x_{2сп} = 0,75$.

Таким образом, переходя от кодированных значений к натуральным значениям, получили зависимость размера получаемой продукции от выбранных параметров оптимизации (скорость вращения ротора, зазор между ротором и статором), представленную выражением в виде полинома первого порядка:

$$Y_{нат} = 0,000256x_{1нат}x_{2нат} - 0,0003345x_{1нат} - 0,82x_{2нат} + 2.02175 \quad (5)$$

Результаты и обсуждение

По приведенному уравнению регрессии в виде полинома первого порядка (5) можно решать и обратные задачи: находить интересующий параметр по заданным известным параметрам технологического процесса разрушения зерновых культур. Вблизи экстремума, как правило, поверхность отклика имеет значительную кривизну и не может быть адекватно описана неполным квадратным уравнением даже в весьма узкой области. В этих случаях, руководствуясь общей идеей шагового эксперимента, необходимо пытаться описать исследуемую поверхность отклика полным уравнением второй степени. Для этого надо провести эксперимент таким образом, чтобы каждый фактор варьировал хотя бы на трех уровнях. Напомним, что при постановке полного факторного эксперимента и дробных реплик от него факторы варьировали только на двух уровнях. Простейшим решением хочется назвать планирование типа 3^k , но это неверно, так как реализация такого решения приведет к необходимости постановки неоправданно большого числа опытов если число факторов $k \geq 3$ [2,3].

Заключение

Представленная математическая модель позволяет в полной мере прогнозировать процесс разрушения зерновых культур при использовании мельниц конического типа в зависимости от скорости вращения ротора (x_1) и зазора между ротором и статором (x_2) благодаря полученному уравнению регрессии в виде полинома второго порядка.

Анализ значений коэффициентов в уравнениях регрессии позволяет заключить, что изменение зазора оказывает наибольшее влияние на качество разрушения зерна.

Для разработки технологического процесса разрушения зерновых культур можно рекомендовать следующие параметры (опыт 3): скорость вращения ротора - 1000 мин^{-1} ; зазор между ротором и статором - 0,5 мм. При данных параметрах достигается средний размер продукции - 1,395 мм и наименьшее количество визуально определенных муковидных частиц. А при наличии технических условий на готовую продукцию по размеру помола зерновых культур рекомендуется устанавливать соответствующую скорость вращения ротора и зазор между ротором и статором получаемую благодаря математическому моделированию.

Благодарности

Исследования выполнялись в рамках научной темы ИМАШ РАН (шифр: FFGU-2021-0004).

[1] Карцев И.С. Экспериментальный стенд для проведения испытаний на изнашивание жерновов мельниц // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2022. – № 4. – С. 144-147.

[2] Шаршунов В.А., Евдокимов А.В., Покатилов А.Е., Попов В.Н. Математическое моделирование процессов измельчения досушенного пророшенного зерна // Вестник Могилевского государственного университета продовольствия. – 2016. – №2 (21) – С. 95–106.

[3] Кравченко И.Н., Карцев С.В., Москвитин Г.В. и др. Исследование механических свойств материалов с резко выраженной анизотропией структуры / Технический сервис машин. – 2021. – Т. 59. – № 4 (145). – С. 128137.

АНАЛИЗ РАБОТЫ И ПРИЧИНЫ ПОТЕРИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АКСИАЛЬНО-ПОРШНЕВЫХ НАСОСОВ

Карцев С.В., Абдулхаликов В.С.*

* 9778603288@mail.ru

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия.

В статье рассматриваются причины снижения производительности аксиально-поршневых насосов. В результате проводимых исследований определены основные факторы, влияющие на технический ресурс аксиально-поршневых насосов, приводящие к снижению коэффициента полезного действия аксиально-поршневых насосов, а также рассмотрены основные дефекты деталей, возникающие в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: аксиально-поршневые насосы, гидромашин, коэффициент полезного действия, дефекты деталей, износ.

Введение

В гидравлических системах современных сельскохозяйственных и дорожно-строительных машин для передачи крутящего момента от двигателя внутреннего сгорания к исполнительным механизмам применяются гидроприводы, составной частью которых являются аксиально-поршневые насосы. Выход из строя узла, а именно аксиально-поршневого насоса влечет за собой сбой в работе техники, следствие, простой техники и снижение финансовой эффективности. Статистический анализ работоспособности и ресурса аксиально-поршневых насосов отечественного производства показал, что доля их отказов в доремонтный период составляет порядка двадцати процентов, в отличии от более качественных Европейских производителей, где доля отказа составляет не более десяти процентов. При ремонте аксиально-поршневых насосов импортного производства предприятия сталкиваются с проблемами: первая – при наличии поставок на рынок Российской Федерации (санкции), это время поставки запчастей, вторая – это высокая стоимость запасных частей. В итоге всё это сказывается на сроках ремонта и простое техники. В связи с этим актуальной задачей является проведение исследований и разработка путей повышения межремонтной долговечности аксиально-поршневых насосов за счет внедрения новых технологий для их реализации и как

ANALYSIS OF WORK AND CAUSES OF LOSS OF WORKING CAPACITY AXIAL PISTON PUMPS OF HYDRAULIC SYSTEMS OF MACHINES

Kartsev S.V., Abdulkhalikov V.S.

The article discusses the reasons for the decrease in the performance of axial piston pumps. As a result of the conducted research, the main factors affecting the technical life of axial piston pumps, leading to a decrease in the efficiency of axial piston pumps, have been identified, and the main defects of parts that occur during operation have been considered.

Keywords: hydraulic machines, axial piston hydraulic pump, efficiency coefficient, defects in parts, wear.

следствие импортозамещение и конкурентоспособность на рынке.

Цели и задачи исследования

Основной целью исследования является проведение исследований и разработка путей повышения межремонтной долговечности аксиально-поршневых насосов и новых технологий для их реализации. В соответствии с целью, поставлены следующие задачи исследования: выявить наиболее частые причины потери работоспособности аксиально-поршневых насосов. Предоставить рекомендации по техническому усовершенствованию, доработке узлов, механизмов и техническому обслуживанию аксиально-поршневых насосов, повышающие надежность и качество продукции отечественного производства и как следствие, повышение конкурентоспособности предприятий в условиях импортозамещения.

Материалы и методы исследований

Главной задачей гидравлического аксиально-поршневого насоса является преобразование механической энергии в гидравлическую (подача, давление). Для аксиально-поршневого насоса является единственным принципом действия – это вытеснение жидкости. Во время работы внутри насоса образуются изолированные камеры, в которых рабочая жидкость перемещается из полости всасывания в полость нагнетания. Поскольку между полостями всасывания и нагнетания не существует прямого соединения, объемные аксиально-

поршневые насосы очень хорошо приспособлены для работы в условиях высокого давления в гидросистеме. Основными параметрами аксиально-поршневого насоса являются: – рабочий объем (удельная подача) ($\text{см}^3/\text{об}$) – это объем жидкости, вытесняемый насосом за один оборот вала; максимальное рабочее давление (МПа, bar), максимальная частота вращения (мин^{-1}) [1]. За основу исследования взят аксиально-поршневой насос производства АО «Пневмостроймашина» (бренд PSM-Hydraulics). Сборочный чертеж установки представлен на рисунке 1. Механическое основное соединение между корпусом насоса и монтажным фланцем приводного двигателя выполнено без гибких промежуточных элементов. За счет этого корпуса приводного двигателя и приводимого в действие аксиально-поршневого насоса образуют единый узел.

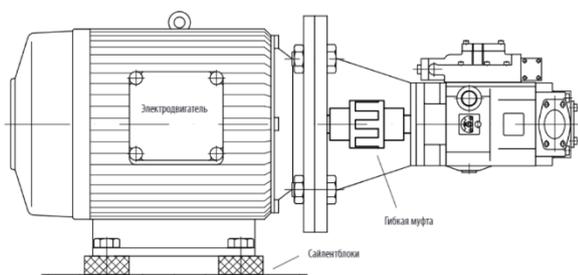


Рис. 1. Аксиально-поршневой насос в сборе. Производитель АО «Пневмостроймашина» г. Екатеринбург, Россия

Между приводным валом и валом аксиально-поршневого насоса установлена гибкая муфта (Рисунок 2), предотвращающая торсионные вибрации коленчатого вала двигателя.

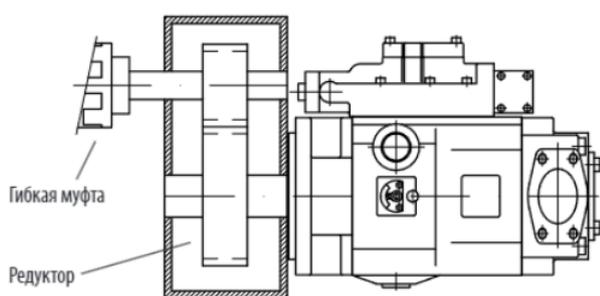


Рис. 2. Гибкая муфта аксиально-поршневого насоса

Всасывающий фланец аксиально-поршневого насоса является самым узким местом линии всасывания (имеет самое маленькое сечение во всей линии). В расчете на каждый метр дополнительной длины шланга линии всасывания диаметр увеличивается на один сантиметр. Всасывающий патрубок в баке для гидравлической жидкости является самым широким местом линии всасывания (имеет самое большое сечение). Конец всасы-

вающего патрубка в баке гидравлической жидкости срезан под углом 45° (входная воронка). Расстояние от входного отверстия до уровня масла составляет не менее восьми диаметров, расстояние до дна бака гидравлической жидкости – не менее двух диаметров. Переходы в местах изменения диаметра выполнены в виде обтекаемых конусов; изгибы труб имеют максимально возможный радиус. Участок линии всасывания в непосредственной близости от аксиально-поршневого насоса выполнен в форме гибкого шланга или оснащен гибким компенсатором. Продольная ось компенсатора находится в одной плоскости с продольной осью аксиально-поршневого насоса. За счет этого обеспечивается преимущественно поперечная нагрузка на компенсатор при крутильных колебаниях аксиально-поршневого насоса. Если это условие не соблюдено, возникающие продольные нагрузки могут приводить к разрыву струи гидравлической жидкости, результатом чего будут кавитация и повышенный шум аксиально-поршневого насоса. Бак гидравлической жидкости состоит из двух камер, разделенных переборками. Это позволяет изолировать обратную линию и линию отвода утечек гидравлической жидкости от всасывающих патрубков, благодаря чему загрязнения успевают осесть, а воздушные пузыри – лопнуть. Фильтр и радиатор для охлаждения гидравлической жидкости установлены в обратной линии или вспомогательном контуре. Вентиляция бака для гидравлической жидкости осуществляется с помощью воздушного фильтра достаточного размера; Уровень гидравлической жидкости выше всасывающего патрубка аксиально-поршневого насоса. Линия всасывания соединяет бак для гидравлической жидкости и аксиально-поршневой насос по прямой (Рисунок 3).

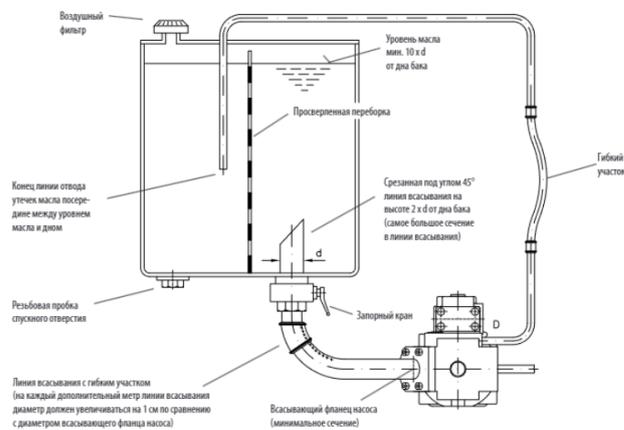


Рис. 3. Линия всасывания бака для гидравлической жидкости и аксиально-поршневого насоса

Корпус аксиально-поршневого насоса оснащен двумя соединительными резьбовыми соединениями для отвода утечек гидравлической жидкости. Регуляторы аксиально-поршневого насоса измеряют рабочее давление в напорной системе и корректируют отклонения, соответствующим образом изменяя рабочий объем насоса (регулирование крутящего момента или мощности). Перед вводом гидравлической системы в эксплуатацию наполняем линию всасывания и, при необходимости, удаляем из нее воздух, а также наполняем корпус аксиально-поршневого насоса и двигателя. Регулятор давления аксиально-поршневого насоса, а также главный предохранительный клапан должны быть полностью открыты. После включения насоса настраиваем низкое давление, при котором из бака могут улетучиться остатки воздуха, а также могут быть полностью смазаны все подвижные детали. Примерно через 5-10 мин. практически весь воздух удален, и можно постепенно повышать давление гидравлической жидкости. Основными неисправностями аксиально-поршневых насосов являются: задиры на деталях поршневой группы, разрушение прижимного диска, поломка вала, износ и обрыв подпятников, разрушение уплотнений.

Результаты и обсуждение

Больше половины отказов возникает из-за плохого состояния масла, причем две трети из них связано с чистотой масла и качеством фильтрующих элементов. К неисправностям аксиально-поршневых насосов относят: снижение подачи гидравлической жидкости, шум, вибрация, утечки гидравлической жидкости, уменьшение подачи гидравлической жидкости при росте нагрузки, пульсация в нагнетательном трубопроводе, повышенный нагрев при работе. К основным факторам, приводящим к неисправностям гидравлической системы относятся: – дешевые расходные запасные части и принадлежности; – нарушение условий пуска гидравлической системы в работу; – некорректные настройки системы клапанов и распределительной аппаратуры; – кавитация, аэрация, чрезмерное насыщение гидравлической жидкости воздухом; – загрязнение гидравлической системы [2]. Таким образом, анализ работы качающего узла аксиально-поршневого насоса показывает, что возникновение износов происходит по следующим причинам: во-первых, при вращении блока цилиндров вместе с распределителем из цветного металла находящегося

в контакте с закрепленным на задней крышке стальным распределителем возникают силы трения и происходит абразивный износ обоих распределителей; во-вторых, при вращении поршней происходит возвратно-поступательное движение их во втулках блока цилиндров, что также приводит к возникновению трения и абразивного износа; в-третьих, вращаясь пяты поршней, скользят по упору, но за счет гидростатической разгрузки не касаются его и здесь возможен только абразивный износ при утечке гидравлической жидкости в зазоры.

Заключение

Аксиально-поршневые насосы применяют в гидравлических системах машин различного назначения не один десяток лет. Сегодня уже немыслимо представить многие сферы жизнедеятельности человека без аксиально-поршневых насосов. Столь широкая сфера применения объясняется простотой конструкции таких насосов. К тому же узел можно использовать, как гидромотор. Помимо упомянутых выше габаритно-весовых характеристик аксиально-поршневые насосы обладают самой высокой удельной мощностью среди всех насосов поршневого типа. Стоит также добавить высокий КПД, максимальную частоту вращения, которая в некоторых моделях может достигать до 20 000 мин⁻¹, и, конечно, высокое выходное давление гидравлической жидкости. Гидросистема с аксиально-поршневым насосом позволяет в полном объеме произвести исследования и разработку путей повышения межремонтной долговечности аксиально-поршневых насосов и новых технологий для их реализации. Предоставить рекомендации по техническому усовершенствованию, доработке узлов, механизмов и техническому обслуживанию аксиально-поршневых насосов, которые повысят надежность машин.

Благодарности

Исследования выполнялись в рамках научной темы ИМАШ РАН (шифр: FFGU-2024-0024).

[1] Тетюхин В.И. Эксплуатация и ремонт шестеренных, аксиально-поршневых и пластинчатых насосов / В.И. Тетюхин, В.Ж. Фрейманис, В.М. Янсон- Ленинград.: Стройиздат, 1974. – 183 с.

[2] Насосы аксиально-поршневые унифицированной конструкции. Профилактика неисправностей и текущий ремонт Методические рекомендации [Электронный ресурс]. URL: https://rusneb.ru/catalog/000200_000018_rc_565989/?ysclid=m2ncajif8t634401214 (дата обращения: 02.07.2024).

АПРИОРНОЕ РАНЖИРОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИЗНАШИВАНИЕ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ

Карцев С.В., Елагин С.Г.*

* sotell@mail.ru

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия.

На основе априорной информации произведено априорное ранжирование факторов, влияющих на изнашивание подшипников скольжения

мельницы самоизмельчения сырья на первой стадии измельчения ММС-70×23 «Гидрофол», объемом 80 м³. Априорное ранжирование позволило выделить наиболее значимые факторы и отсеять факторы, оказывающие несущественное влияние. Такой анализ позволил обоснованно исключить факторы из дальнейшего рассмотрения и значительно сократить объем экспериментальных исследований.

Ключевые слова: априорное ранжирование, изнашивание, коэффициент конкордации, матрица рангов, факторы.

Введение

При исследовании изнашивания подшипников скольжения мельницы самоизмельчения сырья на первой стадии измельчения ММС-70×23 «Гидрофол», объемом 80 м³, результаты опытов определяются большим числом контролируемых и неконтролируемых факторов. Часть факторов, вследствие малого влияния их на изнашивание подшипников скольжения, проконтролировать в процессе исследования не представляется возможным. Эти неконтролируемые факторы, при проведении экспериментов вызывают большой разброс значений изнашивания подшипников скольжения. Опыты, повторенные несколько раз при одних и тех же значениях контролируемых факторов, дают результаты, отличающиеся друг от друга. Кроме этого, воздействие каждого из факторов на изнашивание подшипников скольжения осложняется влиянием взаимодействий факторов. В последнее время при экспериментальном исследовании используют методы планирования эксперимента, базирующиеся на идеях математической статистики и математической теории эксперимента.

Цели и задачи исследования

Качество оценки результата исследования изнашивания подшипников скольжения зависит от многих факторов, к которым можно отнести: состав

APRIORI RANKING OF FACTORS AFFECTING WEAR SLIDING BEARINGS OF HIGHLY LOADED FRICTION UNITS

Kartsev S.V., Elagin S.G.

Based on a priori information, a priori ranking of the factors affecting the wear of the sliding bearings of the self-grinding mill of raw materials at the first stage of grinding MMC-70×23 "Hydrofol", with a volume of 80 m³, was performed. A priori ranking made it possible to identify the most significant factors and eliminate factors that have an insignificant impact. Such an analysis made it possible to reasonably exclude factors from further consideration and significantly reduce the volume of experimental studies.

Keywords: a priori ranking, wear, concordance coefficient, rank matrix, factors.

материала подшипника скольжения, физико-механические свойства материала поверхностного слоя, радиальную нагрузку на подшипник скольжения, шероховатость рабочих поверхностей, геометрические параметры сопряженных поверхностей, остаточные напряжения в поверхностном слое подшипника скольжения, контактную жесткость рабочих поверхностей, вязкость масла, температуру масла в узле трения, толщину масляного слоя [1].

При разработке программы исследования возникает необходимость отсеивания незначимых и выявления значимых факторов, оказывающих наиболее существенное влияние на изнашивание подшипников скольжения мельницы самоизмельчения сырья на первой стадии измельчения ММС-70×23 «Гидрофол», объемом 80 м³, которые и подлежат в дальнейшем более детальному изучению.

Материалы и методы исследований

Для отсеивания факторов влияющих на изнашивание подшипников скольжения использовали априорную информацию: литературные данные и данные сети интернет. На основе этих данных составили список факторов, влияющих на изнашивание подшипников скольжения, установили область определения каждого из факторов и разработали анкету для

опроса экспертов. Список факторов, влияющих на изнашивание подшипников скольжения мельницы самоизмельчения сырья на первой стадии измельчения ММС-70×23 «Гидрофол», объемом 80 м³ представлен в табл. 1.

Табл. 1. Факторы, влияющие на изнашивание подшипников скольжения

Факторы	
X ₁	Состав материала подшипника скольжения
X ₂	Физико-механические свойства материала поверхностного слоя
X ₃	Радиальная нагрузка на подшипник скольжения
X ₄	Шероховатость рабочих поверхностей
X ₅	Геометрические параметры сопряженных поверхностей
X ₆	Остаточные напряжения в поверхностном слое подшипника скольжения
X ₇	Контактная жесткость рабочих поверхностей
X ₈	Вязкость масла
X ₉	Температура масла в узле трения
X ₁₀	Толщина масляного слоя

При подборе экспертов в области трибологии стремились к наличию среди них представителей НИИ, ВУЗов и промышленных предприятий. При сборе мнений каждому из экспертов предлагалось заполнить анкету, в которой перечислены факторы и предполагаемые интервалы варьирования. Заполняя анкету, эксперты расположили факторы в ряд по степени их влияния. При этом каждый эксперт мог дополнить список факторов, и высказать свое мнение об изменении интервалов варьирования.

Вклад каждого фактора оценивали по величине ранга-места, которое отводилось экспертом данному фактору при ранжировании всех факторов с учетом их предполагаемого влияния. Фактору, которому приписывалась ведущая роль, отводилось первое место, остальные располагаются в порядке убывания степени их влияния на изнашивание подшипников скольжения. Если было трудно определить превалирующее влияние какого-то фактора над другим, то им присваивались одинаковые ранги, являющиеся средним арифметическим из предполагаемой их суммы рангов. Результаты опроса экспертов представлялись в виде матрицы рангов и обрабатывались следующим образом. Для каждого фактора вычисляли сумму рангов $\sum_{j=1}^m a_{ij}$, где m – число опрошенных экспертов; a_{ij} – ранг i -го фактора, присвоенный j -м экспертом. В дальнейшем вычисляли отклонение Δ суммы рангов от средней суммы рангов для каждого из факторов по выражению:

$$\Delta_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} - \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m a_{ij} \quad (1)$$

где Δ_i – отклонение суммы рангов i -го фактора от средней суммы рангов;

k – число факторов;

$\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m a_{ij}$ – средняя сумма рангов.

Определив значения Δ_i для каждого из факторов, оценивали степень согласованности мнений опрошенных экспертов. Для этого использовали коэффициент конкордации W , который вычисляли по выражению:

$$W = \frac{12S}{m^2(k^3-k)} \quad \text{где } S = \sum_{i=1}^k \Delta_i^2. \quad (2)$$

В нашем случае коэффициент конкордации равен:

$$W = \frac{12S}{m^2(k^3-k)} = 0,31.$$

Установлено, что при $k > 7$ величина $m(k-1)W$ подчиняется χ^2 - распределению с числом степеней свободы $f = k - 1$ [2,3].

Значимость коэффициента конкордации W устанавливали с помощью критерия Пирсона. Для этого находили расчетное значение χ_p^2 по выражению:

$$\chi_p^2 = m(k-1)W = \frac{12S}{mk(k+1)}. \quad (3)$$

Расчетное значение χ_p^2 сравнивали с табличным значением из распределения Пирсона, найденным для принятого уровня значимости и числа степеней свободы $f = k - 1$. Гипотеза о наличии согласия мнений опрошенных экспертов принимается, если: $\chi_p^2 \geq \chi_t^2$. В нашем случае $\chi_p^2 = m(k-1)W = 10(10-1)0,31 = 27,9$.

При пятипроцентном уровне значимости ($\alpha = 0,05$) и числе степеней свободы $f = k - 1 = 10 - 1 = 9$. Табличное значение χ^2 составляет 16,919. Так как $\chi_p^2 = 27,9 > \chi_t^2 = 16,919$, то мнения экспертов согласуются. Убедившись в согласованности мнений, экспертов построили диаграмму рангов, представленную на рис. 1.

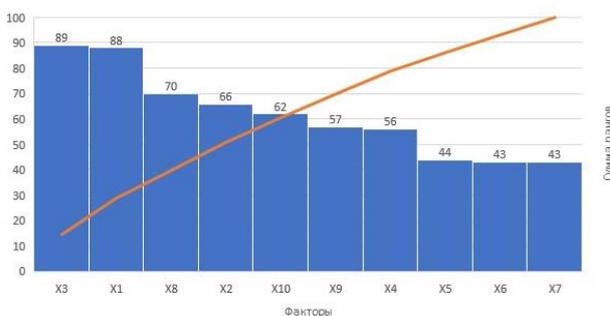


Рис. 1. Диаграмма рангов

Результаты и обсуждение

Заштрихованная часть диаграммы рангов характеризует степени влияния факторов на исследуемую величину. Степень влияния фактора на изнашивание подшипников скольжения оценивали по величине суммы рангов: чем меньше сумма рангов фактора, тем большее влияние он оказывает на изнашивание подшипников скольжения.

Анализ диаграммы рангов показал, что больше других влияют на изнашивание подшипников скольжения, по мнению опрошенных экспертов, факторы: X_3 – радиальная нагрузка на подшипник скольжения; X_1 – состав материала подшипника скольжения; X_8 – вязкость масла. Остальные факторы оказывают значительно меньшее влияние, и их можно исключить из дальнейшего рассмотрения.

Заключение

На основе априорной информации было произведено априорное ранжирование факторов, заключающегося в объективной оценке данных, полученных в результате опроса экспертов в

области трибологии, которое позволило выделить наиболее значимые факторы, оказывающие влияние на изнашивание подшипников скольжения мельницы самоизмельчения сырья на первой стадии измельчения ММС-70×23 «Гидрофол», объемом 80 м³. Такой анализ позволил наиболее обоснованно исключить некоторые факторы из дальнейшего рассмотрения.

Благодарности

Исследования выполнялись в рамках научной темы ИМАШ РАН (шифр: FFGU-2024-0024).

- [1] Трение и смазка твёрдых тел / Ф.П. Боуден, Д. Тейбор; Перевод с англ. Н.М. Михина и А.А. Силина; Под ред. д-ра техн. наук И.В. Крагельского. – М.: Машиностроение, 1968. – 543 с.
- [2] Чемезов О.В., Маковская О.Ю. Теория эксперимента: учебное пособие – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022. – 96 с.
- [3] Тарасов Р.В., Макарова Л.В., Бахтулова К.М. Оценка значимости факторов методом априорного ранжирования // Современные научные исследования и инновации. 2014. № 4. Ч. 1 [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2014/04/33181> (дата обращения: 02.07.2024).

СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПОДГОТОВКЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПОД ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

Карцев С.В., Святищук Н.Н.*

* 1357625@mail.ru

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия.

Представлены современные подходы перспективности применения высококонцентрированного потока энергии (лазера ультракоротких импульсов) для подготовки поверхностей деталей технологического оборудования перед нанесением износостойких покрытий плазменным напылением. Приведены результаты испытаний образцов из легированной качественной стали, из которой изготавливаются детали технологического оборудования. Даны практические рекомендации по использованию лазера ультракоротких импульсов для подготовки поверхностей деталей технологического оборудования перед нанесением износостойких покрытий плазменным напылением.

Ключевые слова: плазменное напыление, адгезия, деталь, импульс, поверхность, покрытие, лазер, энергия.

APRIORI RANKING OF FACTORS AFFECTING WEAR SLIDING BEARINGS OF HIGHLY LOADED FRICTION UNITS

Kartsev S.V., Sviatiashchuk N.N.

Based on a priori information, a priori ranking of the factors affecting the wear of the sliding bearings of the self-grinding mill of raw materials at the first stage of grinding ММС-70×23 "Hydrofol", with a volume of 80 m³, was performed. A priori ranking made it possible to identify the most significant factors and eliminate factors that have an insignificant impact. Such an analysis made it possible to reasonably exclude factors from further consideration and significantly reduce the volume of experimental studies.

Keywords: a priori ranking, wear, concordance coefficient, rank matrix, factors.

Введение

Обработка поверхностей деталей технологического оборудования перед нанесением покрытий различного назначения плазменным методом играет важную роль в активизации процессов образования связи между наносимым покрытием и поверхностью детали. Неустойчивость свойств подготовленной поверхности детали, технологического оборудования, является следствием несоблюдения установленных режимов обработки, что приводит к снижению прочности сцепления нанесенного покрытия с поверхностью детали [1].

Цели и задачи исследования

Основной целью обработки детали является удаление с поверхности веществ, препятствующих нанесению покрытия различного назначения и ускоряющих коррозионные процессы, а также получение поверхности, обеспечивающей требуемую адгезию с металлической основой. В условиях механического производства современного машиностроения для обработки поверхностей с целью дальнейшего нанесения покрытий различного назначения применяются: механический метод, химический метод, термический и электронно-лучевой методы. При выборе метода обработки поверхности учитывают исходное состояние поверхности детали, условия эксплуатации, материал и характеристики детали технологического оборудования.

Основной задачей исследования было, обеспечить заданный параметр шероховатости и активизацию процессов образования связи между напыляемыми частицами и поверхностью детали за счет локального воздействия на поверхность участка лазером ультракоротких импульсов с одновременным нагревом обрабатываемой поверхности до температуры, которая будет обеспечивать качественное сцепление напыляемого покрытия с поверхностью, на которую оно наносится.

Материалы и методы исследований

Для обработки поверхности под плазменное напыление был использован высококонцентрированный поток энергии, для формирования которого применен специализированный генератор ультракоротких импульсов с воздушным охлаждением в полностью волоконных иттербиевых лазерах. Технические характеристики лазера ультракоротких импульсов представлены в табл. 1.

Табл. 1. Технические характеристики лазера ультракоротких импульсов модели «НТО ИРЭ-Полус»

Наименование показателей	Показатели
Максимальная средняя мощность, Вт	300000
Пиковая мощность, Вт	166000
Частота повторения импульсов, кГц	150–2000
Энергия в импульсе, мДж	2
Длительность импульса, нс	2–400
Длина волны излучения, мкм	1,64
Режим работы лазера	Импульсный
Время выключения излучения, мкс	2
Потребляемая мощность, Вт	1200
Вес портативного оборудования, кг	40

Общий контроль параметров иттербиевого импульсного волоконного лазера, параметров подачи сжатого воздуха для охлаждения и контроль цепей защитных блокировок всех систем осуществлялся контроллером на базе микропроцессора, размещенного в базовом блоке. Общий вид лазерного излучателя представлен на рис. 1.

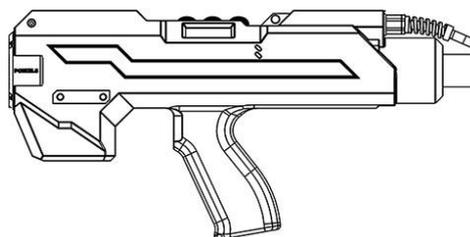


Рис. 1. Общий вид лазерного излучателя

Уникальным свойством данного оборудования является мобильность и возможность управления щадящими режимами при обработке поверхности деталей технологического оборудования в труднодоступных местах производства [2].

Результаты и обсуждение

Поставленную задачу можно решить следующим образом. Обработку осуществляют одновременным нагревом поверхности за счет поглощения доли энергии лазерного импульса в фокальной области до 80–200 °С и обработкой направленным под углом 60–65° к обрабатываемой поверхности лазером ультракоротких импульсов прямоугольной формы размером 30×2 мм перемещающегося относительно поверхности образца со скоростью 3–5 мм/с, сформированного в генераторе ультракоротких импульсов волоконных иттербиевых лазерах до получения параметра шероховатости поверхности Ra, среднеарифметического отклонения профиля, 40–50 мкм. Обработка поверхности образцов лазером ультракоротких импульсов представлена на рис. 2.

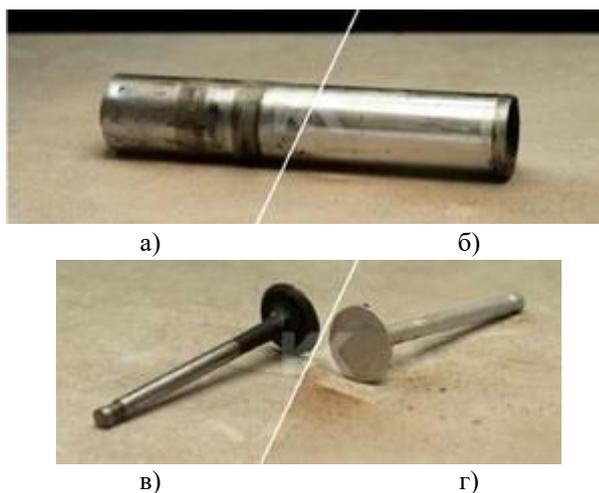


Рис. 2. Обработка поверхности образцов лазером ультракоротких импульсов: а, в – поверхность до обработки; б, г – поверхность после обработки.

Предложенный современный способ подготовки поверхности для нанесения покрытий различного назначения плазменным напылением осуществляют следующим образом. Формируют лазер ультракоротких импульсов. Этот лазер ультракоротких импульсов направляют под углом $60-65^\circ$ к обрабатываемой поверхности, например на детали рабочих органов технологического оборудования подлежащей плазменному напылению покрытий. Поверхность, на которую будет производиться плазменное напыление, нагревают, за счет поглощения доли энергии лазерного импульса в фокальной области до $80-200^\circ\text{C}$. Одновременно с нагревом поверхности проводят обработку лазером ультракоротких импульсов до достижения параметра шероховатости поверхности $R_a = 40-50$ мкм [3]. При локальном воздействии на поверхность деталей лазером ультракоротких импульсов происходит их очистка, обеспечивается заданный параметр шероховатости, а также это приводит к росту температуры в контакте и улучшает теплофизические условия для протекания активационных процессов.

Диапазон температуры нагрева поверхности, скорость перемещения и угол воздействия лазера ультракоротких импульсов на поверхность детали

выбирают в зависимости от основы поверхности детали, на которой будет проводиться плазменное напыление, а параметр шероховатости поверхности R_a определяют в зависимости от вида покрытий этой поверхности в процессе плазменного напыления. Предложенные диапазоны температуры, скорость перемещения, угол обработки поверхности лазером ультракоротких импульсов и заданный параметр шероховатости после ее обработки были определены опытно-экспериментальным путем.

Заключение

На основе проведенных исследований предложен современный подход к подготовке поверхности для нанесения покрытий различного назначения плазменным напылением. Лазер ультракоротких импульсов формируют в генераторе ультракоротких импульсов волоконных итербиевых лазерах на длине волны 1.064 мкм, мощностью 1200 Вт, до получения параметра шероховатости поверхности $R_a = 40-50$ мкм. Предложенные диапазоны температуры, скорость перемещения, угол обработки поверхности лазером ультракоротких импульсов и параметр шероховатости R_a после ее обработки были определены опытно-экспериментальным путем и могут быть использованы в дальнейших исследованиях.

Благодарности

Исследования выполнялись в рамках научной темы ИМАШ РАН (шифр: FFGU-2024-0024)

[1] Карцев С.В. Восстановление и упрочнение деталей технологического оборудования свеклосахарного производства плазменным методом: дис. ... д-ра техн. наук: 4.3.1. / Карцев Сергей Васильевич. - Москва, 2023. - 425 с.

[2] Пат. 122929. Российская Федерация, МПК В08В 7/00. Оборудование для лазерной очистки / М.О. Олегин, А.С. Никитин. - № 2020143488; заявл. 28.12.2020; опубл. 20.09.2021. Бюл. № 26.

[3] Хорохорин Д.М., Баранов О.Г., Литвинов И.И. Лазерная очистка поверхности металлов оборудования при выводе из эксплуатации // Материалы VIII Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Изотопы: технологии, материалы и применение». Томск, 2023. - С. 53.

ВЛИЯНИЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕДЯНОГО НАЛЕТА В ЗОНЕ КОНТАКТА КОЛЕСА ЛОКОМОТИВА С РЕЛЬСОМ

Керопян А.М.

am_kerop@mail.ru

ООО «Московский научно-исследовательский проектно-изыскательский институт технологий и инноваций»,
Москва, Россия.

Известно, что от тяговой способности железнодорожного транспорта зависит его эффективность работы, которая характеризуется многими факторами и, в первую очередь, коэффициентом сцепления бандажей колесных пар локомотивов с рельсами, который в свою очередь зависит от различных характеристик и в том числе – климатических условий эксплуатации. Однако, следует отметить, что до настоящего времени практически не исследована и не решена проблема удаления ледяного налета на рельсах в зимних климатических условиях Сибири и Арктического региона. В результате выполненных исследований в статье обоснована актуальность реализации способа для борьбы с обледенением железнодорожных рельсов промышленного транспорта в условиях Арктики и континентального шельфа РФ.

Ключевые слова: Арктика, локомотив, система колесо-рельс, ледяной налет, температура, контактные напряжения, прочность на сжатие, твердость.

Введение

Целью настоящей работы является выявление способа устранения ледяного налета в зоне контакта колеса локомотива с рельсом, который может возникнуть в зимних условиях эксплуатации Арктического региона. Данная проблема может быть актуальна при реализации проекта, называемого Северный Широтный Ход. С этой целью следует определить предел прочности на сжатие σ_c (контактные напряжения), в зоне контакта рабочих поверхностей пары колесо – рельс локомотива и сравнить с аналогичными характеристиками ледяного налета, образующегося на рабочей поверхности рельсов. Ответ на данный вопрос может служить одно из двух решений альтернативы:

- дробить ледяную корку рельса катящимся по его поверхности колесом локомотива либо другим

INFLUENCE OF LOW TEMPERATURES IN THE ARCTIC REGION ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF ICE PATTERN IN THE CONTACT ZONE OF THE LOCOMOTIVE WHEEL AND RAIL

Keropyan A.M.

It is known that the traction capacity of railway transport determines its operating efficiency, which is characterized by many factors and, first of all, the coefficient of adhesion between the tires of locomotive wheel pairs and the rails, which in turn depends on various characteristics, including climatic operating conditions. However, it should be noted that to date, the problem of removing ice deposits on rails in the winter climatic conditions of Siberia and the Arctic region has been practically unexplored and unsolved. As a result of the research performed, the article substantiates the relevance of implementing the method for combating icing of railway rails of industrial transport in the conditions of the Arctic and the continental shelf of the Russian Federation.

Keywords: Arctic, locomotive, wheel-rail system, ice deposits, temperature, contact stresses, compressive strength, hardness.

механическим способом (по предложению специалистов РЖД);

- удалить наледь применением дополнительных средств (например, путём подвода в зону контакта системы колесо – рельс дополнительного тепла).

Материалы и методы

Поэтому, в первую очередь необходимо определиться с прочностными характеристиками ледяного налета при температурах, характерных для Арктического региона (-40 ...-60 °C). В работе [1] отмечено, что «... при температуре плавления лед имеет твердость по Моосу 2 или меньше, но твердость увеличивается примерно до 4 при температуре -44 °C (-47,2 °F) и до 6 при температуре -78,5 °C (-109,3 °F). Результаты исследований Богородского В.В., Гаврило В.П., показывающие связь между твердостью в МПа и по шкале Мооса для различных минералов, приведены в табл. 1.

Табл. 1. Сравнительные данные о твердости при сжатии различных минералов

Материал	Твердость, МПа	Твердость по Моосу
Гранит	12000	7
Ортоклаз	7950	6
Апатит	5360	5
Сталь 20	2400	4
Кальцит	1090	3
Гипс	360	2

Результаты исследований М.М. Хрущева (табл. 2) согласуются с данными, приведенными в табл. 1 [2].

Табл. 2. Твердость минералов

Эталонный минерал	Твердость по шкале Мооса	Абсолютная твердость по М.М. Хрущеву, МПа
Тальк	1	24
Гипс	2	360
Кальцит	3	1090
Флюорит	4	1890
Апатит	5	5360
Ортоклаз	6	7967

Результаты и их обсуждение

Анализ результатов, приведенных в табл. 1, 2, позволяет определить графическую зависимость твердости льда от температуры (рис. 1).

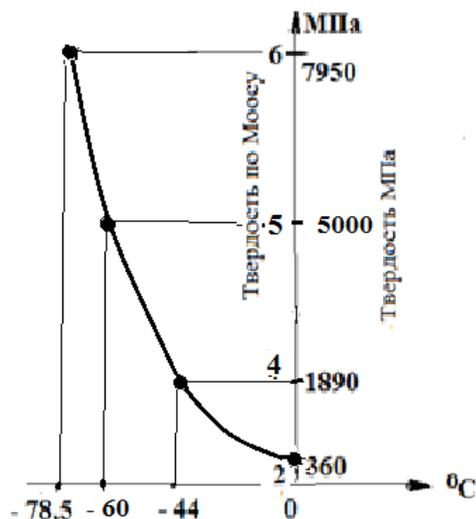


Рис. 1. Зависимость твердости льда от температуры

Из графика следует, что с понижением температуры твердость ледяного налета на рельсах может значительно повыситься. Далее следует определить среднее значение площадки контакта системы колесо – рельс и рассчитать контактное напряжение в пятне контакта.

В работах [3, 4, 5] (табл. 3) приведены данные о величине площадки контакта пары колесо – рельс. Анализ результатов выполненных исследований позволяет составить таблицу, в которой показаны максимально возможные контактные напряжения в зоне взаимодействия колеса локомотива с рельсом.

Табл. 3. Контактные напряжения в зоне площадки контакта пары колесо – рельс

Параметр (ссылка на источник)	Ед. изм.	[3, с.60]	[4, с.72]	[5, с.33]
Осевая нагрузка	кН	112,5	175,0	120,0
Площадь контакта (контур.)	мм ²	296,0	193,0	102,2
Контактное напряжение	МПа	380,1	906,7	1174,2

Анализ результатов, приведенных в табл. 3 показывает, что наибольшее контактное напряжение в зоне площадки контакта тяговых колес локомотива с рельсом не превышает 1200 МПа.

В табл. 4 приведены сравнительные показатели параметров табл. 1, табл. 2 и рис. 1.

Табл. 4. Сравнительные показатели прочностных параметров ледяного налета на рельсах в зависимости от температуры и контактных напряжений в зоне взаимодействия системы колесо-рельс

№№	Величина характеристики	Температура, °C			
		0	-44	-60	-78
1	Температура, °C	0	-44	-60	-78
2	Твердость по Моосу	2	4	5	6
3	Твердость, МПа	300...360	1890...2400	5000	7950
4	Контактное напряжение в зоне контакта колеса с рельсом МПа*)	380,1 [4]			
5		906,7 [5]			
6		1174,2 [6]			

*) Приведенные результаты получены при температурном диапазоне +25... -25 °C

Анализ характеристик, приведенных в табл.4, показал, что при температуре – 40 °C и ниже (что соответствует климатическим условиям Арктического региона России) раздробить ледяной налет на рельсе катящимся по его поверхности колесом локомотива либо другими механическими способами не представляется возможным. Следовательно, для удаления ледяного налета необходимо применение дополнительных средств (например, путём подвода в зону контакта дополнительного тепла) [6, 7, 8, 9].

Заключение

Механические свойства льда как материала демонстрируют сходство с механическими свойствами керамических материалов (в частности – по прочности на сжатие). В диапазоне температур, при которых выполнялись исследования, эти показатели свойств льда значительно ниже аналогичных свойств керамических материалов. Однако, в интервале температур $-40\dots-60$ °С и ниже лед приобретает твердость, превышающую аналогичные показатели некоторых керамических материалов, а иногда, и металлов. Эти результаты можно объяснить различиями на уровне атомных связей рассматриваемых материалов. Результаты исследований показали, что удаление *ледяного налета* на рельсах механическим способом при низких температурах, характерных для Арктического региона России, не представляется возможным. Следовательно, для удаления ледяного налета необходимо применение дополнительных средств (например, путём подвода в зону контакта дополнительного тепла).

- [1] Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Физические свойства. Современные методы в гляциологии. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 384 с.
- [2] Хрущев М.М. Абразивное изнашивание / АН СССР. НИИ машиноведения – М.: Наука, 1970. – 252 с.
- [3] Флячинский К.П. Влияние условий взаимодействия колеса и рельса на фрикционные процессы в зоне контакта. Дисс. на соискан. уч. ст. к.т.н. Коломна, 1993, – 175 с.
- [4] Кротов В.Н. Повышение износостойкости пары трения колесо – рельс путем выбора рациональных профилей поверхностей контакта. Дисс. на соискан. уч. ст. к.т.н., Ростов-на Дону, 1998. – 180 с.
- [5] Протасов А.В. Повышение коэффициента сцепления колес локомотива избирательной дозировкой вводимых в зону контакта магнитных порошков. Дисс. на соискан. уч. ст. к.т.н., Ворошиловград, 1984. – 229 с.
- [6] Патент РФ на изобретение № 2504492 МПК В61С 15/10. Способ увеличения сцепления колеса с рельсом [Текст] / А.М. Керопян, Ю.М. Лужнов; заявитель и патентообладатель - М., ГОУ ВПО МГГУ и НИТУ «МИСиС» (RU) № 2012124483/11; заявл.14.06.12; опубл. 20.01.14 в Бюл. № 2.
- [7] Керопян А.М., Албагачиев А.Ю. Степень воздействия доминирующих факторов в зоне контакта с рельсами рабочих поверхностей колес карьерных локомотивов на их тяговую способность // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2023. – № 1. – С. 4-9.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОМОЩИ ТЕХНОЛОГИИ МИНЕРАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ

¹Кислов С.В.*, ²Бурмистров А.В., ³Балаш П.В., ⁴Сказочкин А.В.

* s.kislov@mico-tech.com

¹ООО «НПЦ «Технологии минеральных покрытий», Калуга, Россия;

²Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга, Россия;

³АО «Калужский завод энергетического машиностроения», Калуга, Россия;

⁴ООО «Криокон», Калуга, Россия.

В статье представлены результаты эксплуатационных испытаний газового двигателя ГДГ-492, работающего в составе газопоршневой электростанции ГД-1000, после модификации поверхности основных металлических деталей двигателя при помощи технологии минеральных покрытий. Минеральные антифрикционные покрытия были созданы на 267 парах трения, включая пары трения коленчатого вала и цилиндра поршневой группы, пары трения газораспределительного механизма, блока привода шестерен, детали масляного насоса. По итогам 18 месяцев эксплуатации потребление природного газа на всех режимах снижено на 10-12%, среднее потребление масла на угар составило 0,22 грамма на 1 кВт выработанной электроэнергии. Состояние основных параметров двигателя позволило уменьшить число сервисных обслуживаний с 8-ми до 3-х раз, что привело к значительной экономии затрат на материалы для сервисного обслуживания.

Ключевые слова: газовый двигатель, газопоршневая электростанция, технология минеральных покрытий, модификация поверхности, расход газа, межсервисный интервал.

Введение

В настоящее время газопоршневые электростанции (ГПЭ) являются достаточно эффективными и производительными установками, которые используются для выработки тепла и электричества, в том числе при отсутствии иного источника электроэнергии. Традиционно ГПЭ используют для обеспечения электричеством зданий, поселков, учреждений образования, здравоохранения, производственных организаций, логистических узлов. Масштабирование использования ГПЭ в нашей стране отчасти решает и экологические задачи, так как газовое топливо значительно снижает уровень токсичности и дымности выбросов энергетических установок [1].

Несмотря на универсальность конструкции ГПЭ, относительную дешевизну эксплуатации,

IMPROVING GAS ENGINE EFFICIENCY WITH MINERAL COATING TECHNOLOGY

**Kislov S.V., Burmistrov A.V., Balash P.V.,
Skazochkin A.V.**

The article presents the results of operational tests of the GDG-492 gas engine operating as part of the GD-1000 gas piston power plant after modifying the surface of the main metal parts of the engine using mineral coating technology. Mineral antifriction coatings were created on 267 friction pairs, including friction pairs of the crankshaft and piston group cylinder, friction pairs of the gas distribution mechanism, gear drive unit, and oil pump parts. Based on the results of 18 months of operation, natural gas consumption in all modes was reduced by 10-12%, the average oil consumption for burnout was 0.22 grams per 1 kW of generated electricity. The state of the main engine parameters made it possible to reduce the number of servicing from 8 to 3 times, which led to significant savings in the cost of materials for servicing.

Keywords: gas engine, gas piston power plant, mineral coating technology, surface modification, gas consumption, service interval.

достаточную надежность, актуальной проблемой является повышение эффективности их работы и совершенствование как отдельных частей ГПЭ, так и системы в целом [2]. Традиционными направлениями повышения эффективности работы ГПЭ являются качественное повышение решения эксплуатационных задач, модернизация отдельных блоков и устройств, а также совершенствование системы управления и мониторинга [3].

Учитывая, что процесс преобразования механической энергии в электрическую сопровождается трением друг о друга большого количества металлических деталей, начиная от работы поршня в цилиндре и заканчивая вращением коленчатого вала, передающего механическую энергию на генератор, еще одним важным направлением повышения эффективности ГПЭ и ее

составных частей является минимизация энергетических потерь на парах трения и повышение износостойкости деталей.

В настоящей работе для формирования оптимального коэффициента трения в парах трения и повышения износостойкости трущихся деталей была использована технология минеральных покрытий [4], которая за последние несколько лет демонстрирует конкурентные результаты по техническим параметрам и экономическим затратам. Технология формирует модифицированный поверхностный слой толщиной 5-30 мкм путем его пластического деформирования с помощью ультразвукового и механического воздействий, активирующих вхождение ультрадисперсных частиц минералов в объем металла [4]. Модифицированные слои, созданные по технологии минеральных покрытий, успешно работают в агрессивных средах абразивных частиц, при термоциклических нагрузках в широком температурном диапазоне, морской воде, слабых растворах кислот и атмосфере некоторых газов [4].

Целью настоящей работы являлось повышение эффективности газового двигателя ГДГ-492, функционирующего в составе контейнерной газопоршневой электростанции ГД-1000 электрической мощностью 1000 кВт/час, используя модификацию поверхности металлических деталей двигателя по технологии минеральных покрытий. О повышении эффективности должно свидетельствовать улучшение следующих базовых показателей эксплуатации газового двигателя: снижение удельного потребления топлива (природный газ) на единицу мощности при различных режимах работы газового двигателя; снижение потребления моторного масла на угар на единицу выданной мощности; увеличение межсервисного интервала при сохранении рабочих параметров газового двигателя.

Материалы и методы

Модернизации были подвергнуты основные ответственные узлы газового двигателя ГДГ-492, производства АО «Волжский дизель имени Маминых», обладающего следующими техническими и экономическими характеристиками: номинальная мощность на валу - 1000 кВт; количество оборотов в минуту – постоянно 1000 об/мин; диапазон выдаваемой мощности 20-100% от номинала; межсервисный интервал 1000 моточасов (м.ч.), текущий ремонт 10000 м.ч., общая наработка до капитального ремонта 80000 м.ч.; затраты на текущий ремонт каждые 10000 м.ч. (сроки выполнения - 8 рабочих дней, 32 человека дня) –

2 100 тыс. руб.; общие затраты на расходные материалы для выполнения сервисного обслуживания в течение года (8000 м.ч.) – 4 320 тыс. руб. (в текущих ценах).

После согласования с отделом главного конструктора предприятия-производителя двигателя, минеральные покрытия были созданы на 267 парах трения, которые можно разделить на 4 основные группы:

1) пары трения коленчатого вала и цилиндра поршневой группы (шейка вала – вкладыш, палец – шатун – поршень);

2) пары трения газораспределительного механизма, распределительный вал, рокеры, толкатели (распределительный вал - втулка корпуса двигателя, подшипники качения - подшипники трения рокера, пары трения толкателей);

3) пары трения головки блока цилиндра (ГБЦ), клапаны, втулки, траверсы, коромысла (клапан-втулка ГБЦ, шток траверсы - втулка ГБЦ, втулка коромысла - палец коромысла - втулка ГБЦ);

4) вспомогательное устройства газового двигателя, блок привода основных и паразитных шестерен, масляный насос (зубья шестерен, втулки шестерен - направляющие пальцы, подшипники скольжения, подшипники качения, блок шестерен масляного насоса - (зубья, втулки, оси, корпус)).

Модификация поверхности была осуществлена на деталях, выполненных из следующих металлов: сталь, биметалл, сплав алюминия, бронза, кованный чугун. К сожалению, марка металла, из которого изготовлены детали двигателя, не подлежит разглашению соглашением о конфиденциальности.

При проведении эксплуатационных испытаний газового двигателя ГДГ-492 были выполнены следующие контрольные мероприятия:

1) анализ масла на наличие примесей – каждые 250 м.ч. на протяжении 12 месяцев эксплуатации (выполняла заводская лаборатория);

2) замеры параметров температуры и давления рабочих жидкостей и наддувочного воздуха – выполнялись ежедневно;

3) замеры давления в цилиндре - при каждом сервисном обслуживании;

4) замеры отклонения зазоров клапанов ГБЦ – при каждом сервисном обслуживании;

5) изменения параметров потребления природного газа – ежедневно;

6) измерение параметров потребления масла на угар – еженедельно.

Расход природного газа определяли, используя узел учета газа компании Эльстер RVG-G-100 с корректором вычисления ЕК-270 (коррекция с учетом давления и температуры). Мощность двигателя определяли на узле учета электроэнергии Меркурий и дополнительно по информации с контроллера управления двигателя-генератора Comar-4v. Эксплуатационные испытания, включающие работу двигателя, сервисное обслуживание, техническое обслуживание были проведены в течение 18 месяцев после монтажа двигателя на площадке заказчика.

Результаты и обсуждение

Первым результатом после создания минеральных покрытий на ответственных узлах газового двигателя и последующей сборки в единое изделие, стало снижение сопротивления «холодного» поворота коленчатого вала двигателя на 35-37% по сравнению с таким же изделием без покрытий. Вторым результатом стало снижение потребления газа на 4-6% относительно базовых заводских параметров при выполнении наладочных испытаний на заводе изготовителе. При этом при запуске было зафиксировано увеличение оборотов стартера на 10%.

После выполнения монтажа изделия на объекте заказчика была выполнена обкатка двигателя в течении 400 м.ч., средняя нагрузка составляла 280-420 кВт час 28-42% от номинала. Далее после проведения нулевого технического обслуживания (замена масла и фильтров) изделие было запущено в рабочем режиме с нагрузкой от 30 до 80% от номинальной мощности.

По итогам эксплуатационных испытаний двигателя ГДГ-492 в составе газопоршневой электростанции ГД-1000 на объекте заказчика были получены следующие результаты:

1) потребление природного газа на всех режимах снижено на 10-12% от базовых значений, обозначенных заводом изготовителем, что дало экономию 136 000 метров кубических газа за 12 месяцев эксплуатации;

2) снизилось потребление масла на угар на 30%. Среднее потребление масла на угар составило 0,22 г на 1 кВт выработанной электроэнергии;

3) замер параметров масла на наличие примесей в заводской лаборатории выявил отсутствие (нахождение в пределах нормы) в масле металлов, что говорит об отсутствии (минимизации) износа основных пар трения двигателя после модификации поверхности деталей. Состояние

масла, определенное после анализа, позволило увеличить межсервисный интервал в 2,25 раза до 2250 м.ч. Поэтому вместо 8-ми сервисных обслуживаний было проведено 3 сервисных обслуживаний в год, что дало существенную экономию в затратах на материалы для сервисного обслуживания (1 850 тыс. руб.);

4) при подведении итогов работы двигателя за 10000 м.ч. (14 месяцев) и выполнении замеров его параметров, было принято решение об увеличении интервала по выполнению текущего ремонта до 15000 м.ч.

Заключение

Целью работы являлось повышение эффективности газового двигателя ГДГ-492, функционирующего в составе газопоршневой электростанции ГД-1000 электрической мощностью 1000 кВт/час, используя модификацию поверхности металлических деталей двигателя при помощи технологии минеральных покрытий. По результатам эксплуатационных испытаний в течение 12 месяцев расход природного газа на всех режимах снижен на 10-12% относительно базовых значений, что дало экономию 136 000 метров кубических газа. Состояние масла двигателя, определенное после анализа лабораторией, позволило увеличить межсервисный интервал в 2,25 раза, что привело к тому, что вместо 8-ми сервисных обслуживаний было проведено 3 сервисных обслуживания в год, а экономия на материалах для сервисного обслуживания составила 1млн 850 тыс. руб. в текущих ценах. Учитывая состояние параметров двигателя после работы в течение 10000 м.ч. (14 месяцев) было принято решение об увеличении интервала по выполнению текущего ремонта до 15000 м.ч.

[1] Гуреев В.М., Мисбахов Р.Ш., Гумеров И.Ф. Улучшение экологических и экономических характеристик газопоршневого двигателя КАМАЗ 820.20.200 в составе электросиловой установки АП100С-Т400-1Р // Энергетика Татарстана. – 2009. – № 2. – С. 26-30.

[2] Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Джалагова Э.И., Абдуллаева С.А. Метод и алгоритм сравнения эффективности работы газопоршневых электростанций электроэнергетических систем // Известия РАН. Энергетика. – 2019. – № 2. – С. 106-117.

[3] Разуваев А.В., Костин Д.А., Кудашева И.О., Губатенко М.С. Повышение эффективности работы газопоршневых электростанций в условиях резкопеременных нагрузок электроэнергетической системы // Вестник КРСУ. – 2020. – Т. 20. – № 8. – С. 26-29.

[4] Балаш П.В., Кислов С.В., Сказочкин А.В. Малое инновационное предприятие: возможности развития технологии и масштабирования бизнеса // Инновации. – 2015. – №12 (206). – С. 95-105.

АЛГОРИТМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ИЗНОСА ШАРОВОГО ШАРНИРА

Клачков В.А.

klachkoff.vladimir@mail.ru

ФГБОУ ВО "МГТУ "СТАНКИН", Москва, Российская Федерация.

Новый алгоритм имитационного моделирования эксплуатационного износа шарового шарнира предназначен для исследования зависимости износа контактных поверхностей компонентов шарового шарнира от стратегии движения. В предложенном алгоритме расчет распределения контактного давления базируется на модели гидравлического взаимодействия сплошных сред металлической плотности. Сформированный программный комплекс позволяет проводить исследования с широким диапазоном варьирования геометрических, кинематических и эксплуатационных факторов в автоматизированном режиме. Первично полученные результаты имитационного моделирования качественно схожи с результатами натурных исследований.

Ключевые слова: эксплуатация, износ поверхности, сферическая поверхность, имитационное моделирование, алгоритм моделирования, математические модели.

Введение

Шаровые шарниры часто встречаются в составе различных механизмов. В процессе эксплуатации механизмов происходит истирание контактной сферической поверхности деталей шарнира. Образующиеся зазоры приводят к повышенным динамическим нагрузкам, которые могут привести к поломке механизма.

Прогнозирование характера износа контактных сферических поверхностей деталей шарнира при различных условиях эксплуатации позволяет планировать своевременный ремонт шарнира, замену смазки и поворот основания, что повышает долговечность и надежность работы механизма в целом.

Такое прогнозирование осуществляется посредством имитационного моделирования физических процессов. В современной литературе можно найти модели, предназначенные для описания процесса притирки и полирования [1-2].

По результатам проведенного анализа существующих имитационных моделей была предложена своя имитационная модель, предназначенная для исследования зависимости износа контактных поверхностей компонентов шарового шарнира от кинематических, геометрических,

ALGORITHM FOR SIMULATION MODELING OF A BALL JOINT OPERATIONAL WEAR

Klachkov V.A.

A new algorithm for simulating the ball joint operational wear is designed to study the dependence of the wear of the contact surfaces of the ball joint components on the movement strategy. In the proposed algorithm, the calculation of the distribution of contact pressure is based on a model of hydraulic interaction of metallic density continuous media. The developed software package allows conducting research with a wide range variations of geometric, kinematic and operational factors in an automated mode. The initial results of simulation modeling are qualitatively similar to the results of field studies.

Keywords: exploitation, surface wear, spherical surface, simulation modeling, modeling algorithm, mathematical models.

динамических и технологических факторов эксплуатации.

Цель исследования – разработать алгоритм имитационного моделирования эксплуатационного износа шарового шарнира, предназначенный для исследования износа контактных поверхностей компонентов шарового шарнира в процессе эксплуатации.

Материалы и методы

Основным методом исследования является имитационное моделирование физического процесса. Вспомогательными методами исследования являются анализ научно-технической литературы, систематизация полученных данных и классификация факторов процесса притирки.

Представленная имитационная модель реализована в Web-формате (рис. 1). Предложенный алгоритм имитационного моделирования базируется на моделях гидравлического взаимодействия сплошных сред и рассматривает компоненты шарового шарнира, как жидкости высокой вязкости.

В качестве стенда для проведения натурных исследований выступает станок для взаимной сферической притирки шаровых шарниров собственной разработки (рис. 2).

Рис. 1. Интерфейс программного обеспечения

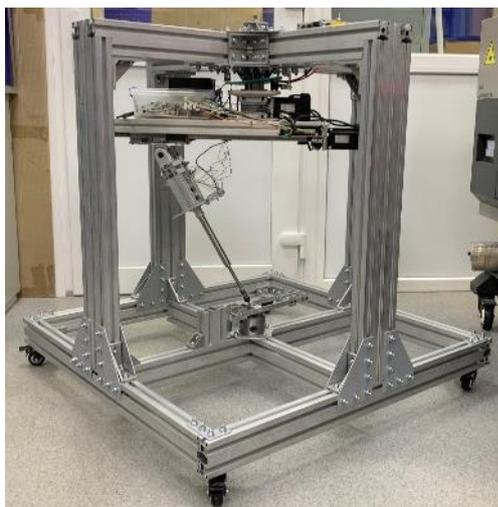


Рис. 2. Станок для взаимной сферической притирки шаровых шарниров

Результаты и обсуждение

Разработанный алгоритм имитационного моделирования эксплуатационного износа шарового шарнира базируется на уравнении Престона, поскольку она позволяет учесть наличие абразивных частиц в зоне контакта деталей. Это позволяет производить имитационное моделирование как для нормальных, так и для агрессивных условий эксплуатации. Рассмотрим подробнее каждый из этапов алгоритма.

Этап генерации сферической поверхности заключается в формировании равномерно распределённых точек по площади сферической поверхности. Точки образуются в местах пересечения меридиан и широт. Меридианы задаются с равным угловым шагом. Широты задаются с равным шагом по высоте. При таком методе распределения точки являются вершинами сферических четырехрберных сегментов, равной площади.

Итоговый результат генерации сферических поверхностей деталей представлен на рисунке 3.

Этап смещения поверхностей крышки и подпятника сводится к расчету минимально вертикального зазора по формуле среднего взвешенного значения и перемещению поверхностей (рис. 4). Смещение поверхности

крышки производится на величину минимального зазора с добавлением величины заглабления.

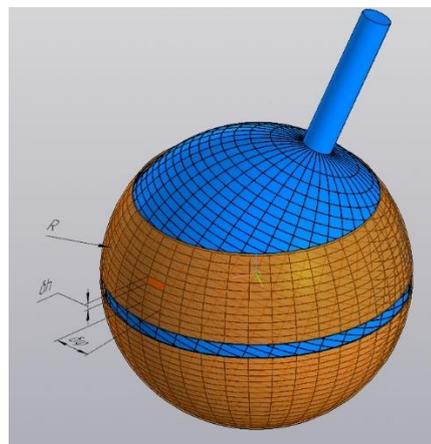


Рис. 3. Сферические поверхности деталей шарнира

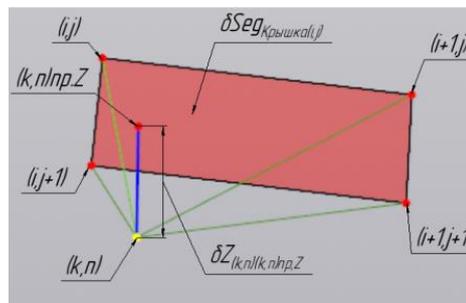


Рис. 4. Вертикальный зазор между пальцем и крышкой в точке (k,n)

Этап силового расчета сводится к расчету результирующей силы, действующей на сегмент пальца, находящийся в зоне коллизии. В качестве эквивалента силового воздействия на сегмент используется объем коллизии. Для расчета объема коллизии предварительно строятся эквивалентные поверхности крышки и подпятника, сегменты которых сориентированы аналогично пальцу (рис. 5).



Рис. 5. Генерация эквивалентной поверхности крышки

Формирование эквивалентной поверхности крышки производится в следующем порядке. Сначала рассчитывается зазор между точкой поверхности пальца (k,n) и сегментом поверхности крышки, в который попадает точка (k,n) при радиальном смещении (рис. 6), по формуле среднего взвешенного значения.

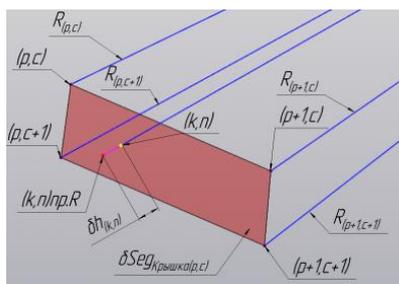


Рис. 6. Радиальный зазор между пальцем и крышкой в точке (k,n)

Далее происходит построение эквивалентной поверхности по вершинам радиальных проекций точек поверхности пальца на сегменты поверхности крышки (рис. 7). Если в результате построения эквивалентной поверхности образуются сегменты только с двумя не соседними вершинами с отрицательными зазорами (рис. 7е), то производится пересчет поверхности с уплотнением сетки точек. В остальных случаях производится расчет объемов коллизий.

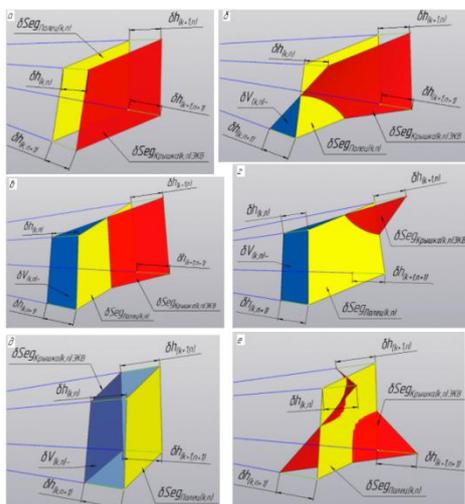


Рис. 7. Вариативность коллизии поверхностей сегментов

Затем производится расчет силы прямого воздействия на каждый сегмент пропорционально доле объема коллизии сегмента. Аналогичный расчет производится для взаимодействия поверхности подпятника и пальца.

После выполняется расчет ответного силового воздействия по сферической поверхности пальца для обеспечения баланса сил в соединении (рис.8), который производится согласно доле объема коллизии сегмента с учетом распределения по закону косинуса. При этом предполагается, что возникающий результирующий момент сил воспринимается несущей конструкцией притирочного оборудования.

Далее производится расчет результирующей силы, действующей на сегмент пальца, как суммы прямого воздействия и всех ответных воздействий, в которых участвует данный сегмент.

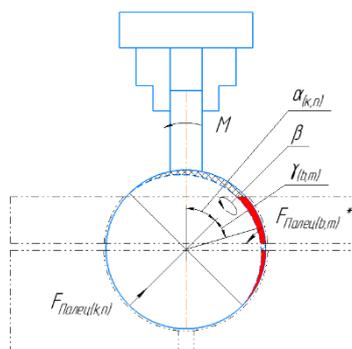


Рис. 8. Схема силового баланса в шарнире

Этап кинематического расчета сводится к вычислению средней величины перемещения сегмента пальца, который равен среднему значению величин перемещения вершин сегмента. Для этого производится расчет координат точек поверхности пальца в результате его элементарного вращения посредством матрицы поворота.

На заключительном этапе производится расчет величины радиального износа сегментов поверхности пальца. Расчет производится по эмпирическому уравнению Престона, которое выглядит следующим образом:

$$H_{Cer(k,n)} = k \cdot F_{Pez(k,n)} \cdot L_{Cer(k,n)}, \quad (1)$$

Далее производится радиальное смещение точек сферической поверхности пальца на величину радиального износа. Аналогичное моделирование с 3 по 5 этап производится для расчета радиального износа поверхностей крышки и подпятника.

Заключение

Предложенный алгоритм имитационного моделирования базируется на моделях гидравлического взаимодействия и кинематики твердого тела. При этом в модели имеется ряд допущений, которые при необходимости можно устранить. Так, например, можно модифицировать уравнение Престона, заложив в него нелинейность влияния факторов силы и перемещения. Также в предложенном алгоритме не производится учет влияния соседних сегментов поверхности при распределении силы, действующей на шарнир.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Фонда содействия инновациям (номер договора №1874ГССС15-L/88337).

- [1] Zhou P. et al. A mixed elastohydrodynamic lubrication model for simulation of chemical mechanical polishing with double-layer structure of polishing pad //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Т. 77. – С. 107-116.
- [2] Geng Z. et al. Prediction of surface profile evolution of workpiece and lapping plate in lapping process //Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2022. – Т. 144. – №. 8. – С. 081001.

О ТРИБОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Клюев В.А., Савенко В.И.*

* visavenko@rambler.ru

Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия.

В работе представлены результаты экспериментальных исследований экзоэмиссии электронов, возникающей при взаимном трении скольжения полимерных материалов в условиях вакуума. Рассмотрены зависимости интенсивности экзоэмиссии электронов от режимных факторов трения и их геометрических размеров. При анализе наблюдаемых закономерностей использованы современные представления о механизмах возникновения трибоэлектрических зарядов в полимерных материалах. Показано, что экзоэмиссия электронов в рассматриваемых случаях является автоэлектронной.

Ключевые слова: трибоэлектричество, полимеры, двойной электрический слой, экзоэлектронная эмиссия.

Введение

Известно, что электризация материалов при их трении – многостороннее «полифоническое» явление. В общем случае оно включает функционирование совокупности микромеханизмов, действующих в приповерхностных слоях контактирующих тел при их трибоактивации [1-4]. Относительный вклад этих микромеханизмов в трибоэлектризацию материала зависит от его механических свойств, режимов трения, физико-химических свойств окружающей среды.

Анализ закономерностей трибоэлектрических явлений и их характеристик позволяет получить существенную информацию о характере структуры поверхностных слоев трибоматериала, а также о кинетике протекающих в ней химических реакций [5-6].

Среди трибоэлектрических явлений особое место занимает явление экзоэмиссии электронов (ЭЭЭ), возникающей с поверхности материалов в процессе трения скольжения. Повышенный интерес к этому явлению вызван не только возможностями его практического использования [7,8], но и необходимостью решения проблем, связанных с его природой и особенностями проявления [1,4-6]. Данная работа посвящена изучению основных характеристик ЭЭЭ пленок политетрафторэтилена (ПТФЭ) при их трибоиспытаниях в вакууме при различных граничных условиях. К таким характеристикам, прежде всего, относятся интенсивность ЭЭЭ, плотность поверхностного

ON TRIBOELECTRIC CHARACTERISTICS OF POLYMER MATERIALS

Klyuev V.A., Savenko V.I.

The paper presents the results of experimental studies of electron exoemission arising from the mutual sliding friction of polymer materials in vacuum conditions. The dependences of the electron exoemission flux on the regime friction factors and their geometric dimensions are considered. To explain the observed patterns, modern ideas about the mechanisms of the occurrence of triboelectric charges in polymer materials are used. It is shown that the electron exoemission in the considered cases is autoelectronic.

Keywords: triboelectricity, polymers, double electric layer, exoelectronic emission.

заряда пленки и параметры двойного электрического слоя (ДЭС), возникающего на межфазной границе контактирующих тел.

Материалы и методика

Образцы представляли собой лентообразные пленки ПТФЭ площадью 10×1 см² и толщиной от 10 мкм до 5 мм. Выбор данного материала был обусловлен его широким использованием в промышленных узлах трения [8]. В качестве контртел использовались прямоугольные пластинки природного (кератино-фиброинового) полимера - фетра (ГОСТ 11025-78) площадью $A = 3 \times 1$ см² и толщиной $5 \div 10$ мм. Эксперименты проводили на специально сконструированном для этой цели приборе (рис. 1).

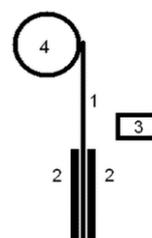


Рис. 1. Блок-схема прибора для исследования трибоэлектрических процессов. Пояснения обозначений в тексте

На рис. 1 представлена принципиальная схема узла трения скольжения, позволяющая регистрировать ЭЭЭ в динамическом режиме. 1 – пленка полимера, 2 – контртела, зажимающие пленку при давлении $P = 0,5$ Н/см², 3 – детектор электронов. Трение

происходило при вращении барабана (4), протягивавшего пленку через узел трения со скоростью 1 см/с.

Эмиссию электронов регистрировали в непрерывном режиме по выходе пленки из трибоконтакта. В качестве детектора использовался вторично-электронный умножитель канального типа ВЭУ-6 [9]. Стимулированные ЭЭЭ электрические сигналы поступали с ВЭУ на соответствующую электронно-пересчетную аппаратуру и регистрировались в виде скорости счета импульсов I (имп/с).

Часть экспериментов проводилась в условиях «композиционного» трения. В этом случае одна из сторон пленки контактировала с движущейся с той же скоростью заземленной металлической лентой 5.

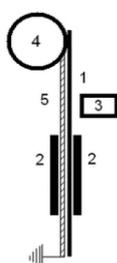


Рис. 2. Модифицированный узел трения. Обозначения те же, что и на рис. 1

В экспериментах была предусмотрена возможность одновременного измерения потока эмитированных электронов и плотности q поверхностного заряда, распределенного на эмитирующем участке пленки. Величину q измеряли при помощи емкостного вибрационного преобразователя [10].

Все эксперименты проводились в камере, выполненной на базе вакуумного поста ВУП-2К при остаточном давлении $P \leq 10^{-3}$ Па.

Экспериментальные результаты.

На рис. 3 представлены зависимости интенсивности ЭЭЭ I (1) и плотности поверхностного заряда q (2) от толщины пленки полимера d при трении в условиях вакуума.

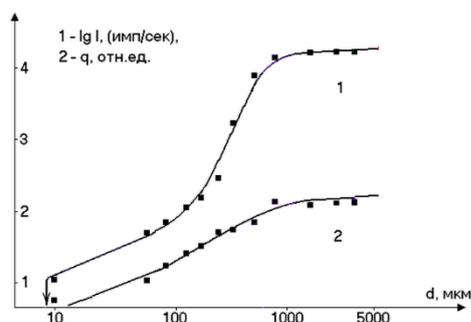


Рис. 3. Зависимость интенсивности I (1) и плотности поверхностного заряда q (2) от толщины d в пленки ПТФЭ при ее трении между двумя фетровыми контртелами в вакууме

Эксперименты показали, что эмиссии электронов возникает лишь при толщине пленок $d \geq 10$ мкм (см. рис. 3, кривая 1). С ростом значений d она постепенно увеличивается. Однако при $d \approx 1000$ мкм значения интенсивности I выходит на плато и в дальнейшем практически не изменяются. Величина q в области этих же толщин d также достигает насыщения (см. рис 3, кривая 2). Таким образом, существует заметная положительная корреляция между значениями I и q .

При трении тех же полимерных пленок на воздухе при атмосферном давлении наличия ЭЭЭ, или поверхностного заряда не обнаружено.

Для выяснения влияния граничных условий на поверхности пленки, находящейся в трибоконтакте на противоположной ее стороне, были поставлены эксперименты по трению полимерных пленок в условиях «композиционного» трения в вакууме. Полученные результаты представлены на рис. 4.

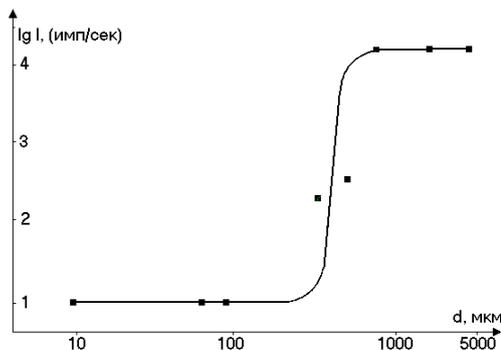


Рис. 4. Зависимость потока эмитированных электронов I от толщины d пленки ПТФЭ при ее трении в контакте с подложкой из алюминиевой фольги толщиной 0,5 мм

Аналогичный вид имеет зависимость плотности электрического заряда q на рабочей поверхности пленке от ее толщины d в условиях тех экспериментов.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о взаимосвязи эмиссии электронов с полимерных пленок с наличием на их поверхностях отрицательного электрического заряда. Возможность управлять величиной потока ЭЭЭ с помощью наведенного металлической подложкой электрического поля E_{ex} свидетельствует об автоэлектронной природе этого явления.

Обсуждение результатов

При анализе природы ЭЭЭ в полимерах обычно используются два инструментария: электростатическая теория адгезионной связи [11], и квантово-механическое приближение, учитывающее представления зонной теории твердых тел и существование в энергетическом спектре полимера поверхностных состояний (см., например, [12]).

Согласно электростатической теории адгезии в результате донорно - акцепторных переходов между

поверхностными атомами (молекулами) контактирующих тел на их межфазной границе образуется двойной электрический слой (ДЭС) и возникает контактная разность потенциалов. Донорные или акцепторные свойства этих атомов/молекул, а, следовательно, знак заряда их поверхностей определяются различными значениями энергии ионизации и/или сродства к электрону этих наночастиц. Скорость установления термодинамического равновесия в таких системах может быть очень высока из-за малого числа высокоэнергетических носителей зарядов на поверхности диэлектрика.

В рамках квантово-механического описания зонной структуры полимерных материалов (диэлектриков) ДЭС на межфазной границе образуется благодаря выравниванию их уровней Ферми, а полярность ДЭС определяется соотношением их работ выхода. Согласно обеим теориям на межфазной границе формируется ДЭС, однако результаты анализа его экспериментально найденных характеристик не всегда позволяют сделать соответствующий выбор.

Данные, приведенные на рис. 3 и 4, позволяют сделать заключение о том, что электрические поля, возникающие при «симметричной», схеме трения (рис. 1) на противоположных сторонах полимерной пленки, перестают влиять друг на друга при толщинах пленки $d_c \approx 500-600$ мкм. Полагая, что толщина ДЭС, образующегося на трибопаре ПТФЭ/фетр, по порядку величины должна составлять $d_e \ll d_c \approx 400-600$ мкм, можно получить приближенную оценку для $d_e \approx 5$ мкм.

В этом случае емкость C_A плоского конденсатора, который образует ДЭС в трибоконтакте: $C = \epsilon_0 \epsilon_r A / d_e \approx 0,53$ нф. Здесь $A = 3 \cdot 10^{-4}$ м², $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м, $\epsilon_r = 1$. Тогда разность потенциалов ДЭС $U_{ДЭС} \approx C/Q = 1,2 \cdot 10^3$ В. Здесь $Q = q \cdot A$, $q = 2,4 \cdot 10^{-2}$ кул/м². Полученное значение близко по порядку величины к значениям U , характерным для адгезии типичных полимерных пар [10].

На рис. 5 представлены данные рис. 3, обработанные в предположении об автоэмиссионной природе ЭЭЭ при трении вышеуказанных материалов.

Они свидетельствуют о присутствии на поверхности ПТФЭ центров ЭЭЭ двух видов, существенно различающихся по величине работы выхода: $\phi_1 = 0,29 \pm 0,03$ эВ и $\phi_2 = 2,2 \pm 0,3$ эВ. Можно полагать, что природа центров ϕ_1 связана с энергетическими уровнями, обусловленными созданными трением дефектами решетки в кристаллических блоках ПТФЭ, и/или с поверхностными уровнями Тамма-Шокли [14].

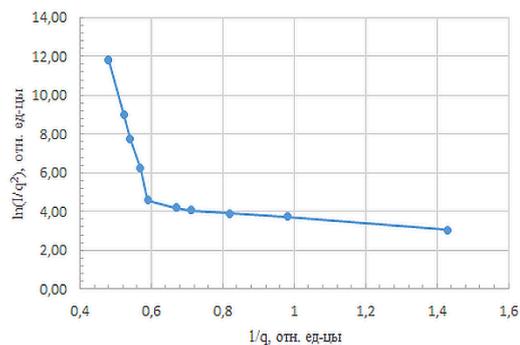


Рис. 5. Зависимость характеристик ЭЭЭ для трибопары ПТФЭ/фетр в координатах Фаулера - Нордгейма [13]

Значение работа выхода электронов для центров ϕ_2 достаточно близко к энергии сродства к электрону фторуглеродного комплекса C_xF_y [15], который является повторяющейся структурной единицей (олигомером) макромолекулы ПТФЭ.

Заключение

Полученные при трении трибопары ПТФЭ/фетр количественные характеристики процесса ЭЭЭ позволяют успешно прогнозировать поведение аналогичных полимерных трибосопряжений, применяемых в промышленных приборах и устройствах.

[1] Евдокимов В.Д., Семов Ю.И. Экзоэлектронная эмиссия при трении. – М.: Наука, 1973. – 184 с.
 [2] Постников С.Н. Электрические явления при трении и резании. – Горький: Волго-Вятское кн. Из-во, 1975. – 280 с.
 [3] Луцкейкин Г.А. Полимерные электреты. – М.: Химия, 1976. – 224 с.
 [4] Nakayama, K. Triboemission, triboelectricity, and tribochemistry. /In: Wang, Q.J., Chung, Y.W. (eds). Encyclopedia of Tribology. Boston, MA: – Springer, 2013. – С. 3750-3760.
 [5] Zou H., Guo L., Xue H. et al. Quantifying and understanding the triboelectric series of inorganic non-metallic materials. //Nature Communications. – 2020. – №. 11:2093. – С. 1-7.
 [6] Крылова И.В. Экзоэмиссия. Химический аспект. // Успехи химии. – 1976. – Т. 45. – Вып. 12. – С. 2138–2167.
 [7] Bochu L. et al. Innovative integration of triboelectric nanogenerators into signature stamps for energy harvesting, self-powered electronic devices, and smart applications //Eng. – 2024. – Т. 5. – №. 2. – С. 958-966.
 [8] Панин Ю.А., Малкевич С.Г., Дунаевская Ц.С. Фторопласты. – Л.: Химия, 1978. – 238 с.
 [9] Бараночников М.Л. Приемники и детекторы излучений. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 640 с.
 [10] Вершина Г.А., Жарин А.Л., Тьяловский А.К. Исследование накопления заряда статического электричества на поверхности изделий из фторопласта-4 методом вибрирующего конденсатора. // Наука и техника. – 2012. – № 1. – С. 26-32.
 [11] Дерягин Б.В., Кротова Н.А., Смилга В.П. Адгезия твердых тел. – М.: Наука, 1977. – 280 с.
 [12] Xu C. et al. On the electron-transfer mechanism in the contact-electrification effect //Advanced materials. – 2018. – Т. 30. – №. 15. – С. 1706790.
 [13] Fursey G.N. Field emission in vacuum microelectronics. – NY.: Kluwer AP. 2005. – 205 с.
 [14] Davison S.G.; Steslicka M. Basic Theory of Surface States. – N.Y.: Clarendon Press, 1996. – 223 с.
 [15] Гурвич Л.В., Карачевцев Г.В., Кондрагьев В.Н., Лебедев Ю.А. и др. Энергии разрыва химических связей. Потенциалы ионизации и сродство к электрону. – М.: Наука, 1974. – 351 с.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЖИРНОКИСЛОТНОГО СОСТАВА НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИРОВ

Ковалева И.Н.

innakov2@mail.ru

Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь.

Исследованы триботехнические и физико-механические свойства растительных масел и животных жиров. Показано, что корреляция между жирнокислотным составом объектов исследования и их триботехническими характеристиками наблюдается только для олеиновой кислоты.

Ключевые слова: жирнокислотный состав, триботехнические характеристики, коэффициент трения, растительные масла, животные жиры, биологические жиры.

Введение

В последние 30 лет вернулся интерес исследователей к вопросу разработки и применения смазочных материалов из биологических жиров, рассматриваемых как экологический и возобновляемый ресурс [1]. Большой практический потенциал биологические жиры имеют при их использовании в качестве жидких смазочных материалов, консистентных смазок и технических консервирующих составов [2]. Расширения номенклатуры используемых для этого растительных масел требует проведения соответствующих исследований [3]. В частности, влияние жирнокислотного состава биологических жиров на их триботехнические характеристики изучено недостаточно и не ограничивается только областью трибологии [4].

Цель работы оценить влияние жирнокислотного состава биологических жиров на их триботехнические характеристики.

Материалы и методы исследований

В качестве объектов исследований выбраны масла наиболее распространенных сельскохозяйственных культур средневропейских стран, Беларуси и центральной части России (оливковое, рапсовое, соевое, пальмовое масла) и жиры животных, выращиваемых для пищевых целей (говяжий и свиной жиры). Исследования триботехнических характеристик в режиме граничной смазки проводились на микротрибометре МТУ-2К7 при скорости скольжения 5 мм/с, длина

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF FATTY ACID COMPOSITION ON TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF BIOLOGICAL FATS

Kavaliova I.N.

Tribotechnical and physical-mechanical properties of vegetable oils and animal fats have been investigated. It is shown that correlation between fatty acid composition of the objects of research and their tribotechnical characteristics is observed only for oleic acid.

Keywords: fatty acid composition, tribotechnical properties, friction coefficient, vegetable oils, animal fats.

хода 10 мм, количество двойных проходов 1000, температура окружающей среды 20 °С, относительной влажности 55%. При минимальной силе прижима 100 мН и максимальной 1000 мН. Образец - пластина из стали 45, индентор - шарик диаметром 3,5 мм из стали ШХ15.

Исследования растительных масел и животных жиров на жирнокислотный состав и наличие примесей проводились на газовом хроматографе Хроматек 5000.2 (Россия) в соответствии с ГОСТ 30418-96. В табл. 1 представлены данные физико-химических свойств объектов исследований.

Табл. 1. Жирнокислотный состав объектов исследования

Образец	Жирнокислотный состав, %		
	Олеиновая	Линолевая	Линоленовая
Рапсовое масло	54,60	20,60	10,00
Оливковое масло	77,30	4,80	0,20
Соевое масло	20,00	50,00	12,00
Пальмовое масло	15,50	10,00	0,50
Свиной жир	45,00	4,50	0,90
Говяжий жир	34,30	2,01	0,47

Результаты исследований и их обсуждение

На рис.1. показано, что при моделировании режима граничной смазки (рис.1, а), когда сила прижима равна 100 мН, отмечается линейная зависимость коэффициента трения от содержания олеиновой кислоты, а вклад других кислот не коррелируется с их содержанием. При увеличении

нагрузки до 1000 мН (рис.1, б) коэффициент трения для всех видов масел снижается от 30 до 100 %, при этом линейная зависимость от содержания жирных кислот наблюдается только для жиров с высоким содержанием олеиновой кислоты, которая является мононенасыщенной жирной кислотой.

В случае нагрузки 100 мН контактные напряжения соответствуют значениям 293 МПа, что не превышает модуль упругости метиленовой цепи [5], при этом реализуется механизм упругого контакта при трении, где смазочный слой выступает разделительной средой между контактирующими телами и на триботехнические свойства оказывает влияние смазочная способность масла.



Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от содержания жирных кислот: а – нагрузка 100 мН; б – нагрузка 1000 мН

При нагрузке 1000 мН реализуется механизм упругопластического деформирования, где мультислой смазки вытесняется из зоны контакта до уровня выступов шероховатости контактирующих поверхностей и за разделение поверхностей отвечает оставшийся монослой, адсорбированный на контактирующих поверхностях. За реакционную способность смазочного материала с поверхностью

в данном случае отвечает наличие ненасыщенных и насыщенных связей в масле, которые способны вступать в реакцию с кислородом, находящимся как на поверхности тел, так и в окружающей среде.

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента трения от общего количества насыщенных и ненасыщенных связей в исследуемых биологических жирах. Анализ представленных данных на рис. 1, б и рис. 2 показывает, что при увеличении нагрузки для масел с большим содержанием ненасыщенных кислот коэффициент трения снижается на 20-30 %, а для пальмового масла, где содержание насыщенных кислот больше чем ненасыщенных увеличивается на 20 %.

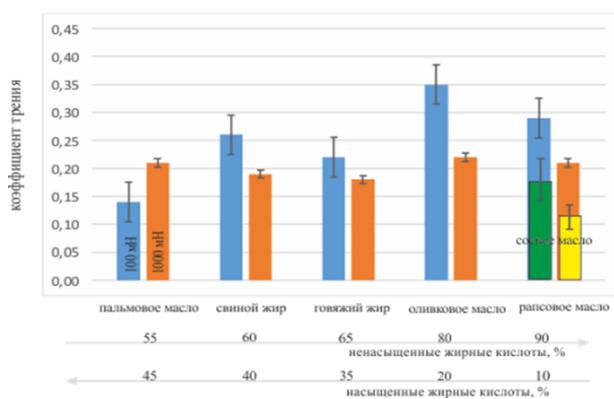


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от общего содержания насыщенных и ненасыщенных жирных кислот: 1 – нагрузка 100 мН; 2 – нагрузка 1000 мН

Выводы

По результатам исследований отмечена линейная зависимость коэффициента трения от содержания олеиновой кислоты при нагрузке 100 мН. По всей видимости, в данном случае реализуется механизм граничной смазки с образованием монослоя из олеиновой кислоты и мультислоев триглицеридов, которые смещаются относительно друг друга, обеспечивая скольжение контртела по плоскости. При нагрузке 1000 мН для биологических жиров с ненасыщенными жирными кислотами более 50 % в составе, коэффициент трения снижается на 20-30 %. В этом случае можно сделать следующие предположение, что количество слоев жирных кислот, входящих в разделяющий смазочный слой уменьшилось в несколько раз, и их влияние на коэффициент трения оказывает реакционная способность ненасыщенных связей.

Учет наличия реакционных связей в биологических жирах позволит применять жирные кислоты в качестве присадок для регулирования как свойств смазочного материала, так и его триботехнических характеристик.

Благодарности

Работа выполнена в рамках ГПНИ «8. Материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограммы «8.4. Многофункциональные и композиционные материалы» задания № 4.2.3 НИР 1.

[1] Фукс И.Г., Евдокимов А.Ю., Джамалов А.А. Экологические аспекты использования топлив и смазочных материалов растительного и животного происхождения // Химия и технология топлив и масел. - 1992. - №6. - С. 36-40.

[2] Бугаев А.М. О влиянии рапсового масла на износ деталей гидросистем сельскохозяйственной техники // Международный научный журнал. - 2008. - № 1. - С. 23-25

[3] Григорьев А.Я., Ковалева И.Н., Крейвайтис Р., Купчинскас А., Падгурскас Ю. Влияние жирнокислотного состава и структуры алкильных радикалов триглицеридов растительных масел на их триботехнические характеристики // Трение и износ. - 2016. - Т. 37. - №. 6. - С. 755-759.

[4] Bouchet M. I. D. B. et al. Tribochemistry of unsaturated fatty acids as friction modifiers in (bio) diesel fuel // RSC advances. - 2017. - Т. 7. - №. 53. - С. 33120-33131.

[5] Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. - Л.: Изд-во «Наука», Ленингр. отд., - 1975. - 592 с.

ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛОПЛАКИРУЮЩЕЙ ПРИСАДКИ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОТОРНОГО МАСЛА

¹Коноплев В.Е.*, ¹Лапсарь О.М., ²Баранов Е.А.

* techmash@rgau-msha.ru

¹Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия;

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», Москва, Россия.

Разработана технология синтеза металлоплакирующей присадки. Проведена оптимизация концентрации присадки в моторном масле на основании сравнительной оценки трибологических характеристик штатным маслом. В результате проведенных комплексных исследований получена оценка влияния присадки на физико-химические и эксплуатационные свойства моторного масла, а также на эксплуатационные характеристики силовой установки.

Ключевые слова: металлоплакирующая присадка, моторное масло, смазочные материалы.

THE EFFECT OF A METAL-COATING ADDITIVE ON THE PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF ENGINE OIL

Konoplev V.E., Lapsar O.M., Baranov E.A.

The technology of synthesis of a metal-coating additive has been developed. The concentration of the additive in the engine oil was optimized based on a comparative assessment of the tribological characteristics of the standard oil. As a result of the conducted comprehensive studies, an assessment of the effect of the additive on the physico-chemical and operational properties of the engine oil as well as on the operational characteristics of the power plant was obtained.

Keywords: metal coating additive, engine oil, lubricants.

Введение

Долговечность и эффективность использования сельскохозяйственной техники в большой степени зависит от физико-химических и эксплуатационных свойств применяемых смазочных материалов. В связи с увеличением количества используемых машин с большим сроком службы (свыше 8-12 лет), зависимость работы тракторов, автомобилей и комбайнов от качества применяемых

горючесмазочных материалов значительно возрастает. С их качеством неразрывно связаны эксплуатационные расходы, затраты на техническое обслуживание, ремонт и запасные части. Повышение качества моторных масел позволяет в 1,5-2 раза снизить износ деталей подвижных сопряжений и нагарообразование, увеличит в 2 раза срок службы двигателей и снизить общий расход масла и топлива.

Материалы и методы

В качестве смазочной композиции было использовано моторное масло Лукойл Genesis 5W-30 и металлоплакирующая присадка МПП. Базовое моторное масло было использовано как контрольный образец. В качестве сырья для синтеза МПП были выбраны порошок меди, диэтаноламин и олеиновая кислота. Метод оценки трибологических свойств смазывающих масел и присадок к ним заключается в использовании роликовых испытательных установок, предусматривающих синхронное измерение скорости изнашивания и момента сил трения в течение всего опыта без разъединения зоны трения. Зона трения (испытательный контакт) образована циклическими поверхностями ролика Ст. 45 HR_c 50 с R=35,0±0,1 мм и колодки, прошедшей гомогенизацию с R=35,0±0,1 мм и габаритами (в плане) – 2,01 мм (вдоль скольжения) и 7,27 мм (поперек скольжения), площадь зоны трения $S = 0,1461 \text{ см}^2$. Ряд нормальных сил (P): 73,15; 94,15; 115,15 кгс определен экспериментально из условия гарантированного отсутствия признаков заедания.

Частота вращения вала – 100 об/мин (линейная скорость – 0,37 м/сек) выбирается экспериментально из условия гарантированного отсутствия гидродинамического режима смазки, т. е. левее значения частоты вращения ролика, соответствующего $M_{тр. min}$, на экспериментальной зависимости Штрибека. В отдельных опытах испытания проводили при $n = 50$ и 150 об/мин, при которых также удовлетворялось условие отсутствия полного разделения трущихся поверхностей сплошной гидродинамической смазочной пленкой. Температура в конце опыта устанавливалась синхронно со скоростью изнашивания ($V_{изн}$) и моментом сил трения ($M_{тр}$).

В результате двух серий испытаний получены экспериментальные зависимости, большая часть которых имеет аномальный характер.

Результаты и обсуждение

Контрольный образец и смазочная композиция, как показали результаты эксперимента, показали различия по уровню взаимодействия контактов трущихся поверхностей ролика и колодки. Так как металлоплакирующие присадки влияют на трибологические процессы в режиме граничного трения, то, следовательно, наибольший интерес представляет уменьшение износа поверхностей пар трения. В меньшей мере представляет интерес снижение момента трения влияющего на рабочую температуру смазочного масла в узле трения. Повышение температуры может привести к

ухудшению физико-химических показателей смазочных масел в процессе эксплуатации.

Результаты эксперимента показали значительных эффект влияния металлоплакирующей присадки на интенсивность износа в диапазоне нормальной силы от 73,15 до 115,15 кгс 3,2-7,5 раз при незначительном влиянии на момент трения и температуру смазочной среды.

Температура смазочной среды, как оказалось, незначительно влияет на скорость износа для смазочной композиции в отличие от контрольного образца.

Для момента трения влияние температуры незначительно, как для смазочной композиции, так и для контрольного образца. Не выражено влияние трения в зоне контакта на температуру смазочной среды обоих образцов смазки. Смазочная композиция дает положительный эффект уменьшения скорости износа при увеличении температуры до 105 °С, причем износ не увеличивается при увеличении нормальной нагрузки, что нельзя сказать о контрольном образце. Максимальное значение уменьшения износа за счет применения МПП составило 7 раз.

Некоторые важнейшие эксплуатационные свойства масел, в первую очередь их стойкость к окислению, не аддитивны соответствующим свойствам компонентов, входящих в состав этих масел, и могут резко меняться даже при незначительных изменениях химического состава масла.

Оценка влияния металлоплакирующей присадки на процесс окисления моторного масла по методу ВО-4. Метод характеризует уровень антиокислительных свойств моторных масел и присадок. Сущность метода заключается в окислении масел в лабораторной установке в присутствии медного катализатора в течение 15 ч при температуре 180 °С и подаче воздуха 300 см³/мин с последующим определением изменения вязкости и фотометрического коэффициента загрязненности масел.

Такие показатели, как изменение вязкости и фотометрический коэффициент, характеризуют накопление в масле маслорастворимых и нерастворимых продуктов окисления. При высокотемпературном окислении масел, кроме образования смол и карбенов, происходит образование кислот, подтверждением чего является снижение щелочного числа.

Высокотемпературное окисление масел приводит к образованию значительных количеств продуктов глубокого уплотнения, к которым относятся смолы, асфальтены и карбены.

Таким образом, металлоплакирующая присадка не повышает склонность моторных масел к высокотемпературному окислению. Моторное масло с МПП имеет более высокую термоокислительную стабильность, о чем свидетельствует уменьшение вязкости на 3,3%. Повышение термоокислительной стабильности можно объяснить склонность МПП подавлять каталитический эффект металлов.

Заключение

Лабораторные испытания показали значительный эффект влияния МПП на интенсивность износа в диапазоне нормальной силы от 73,15 до 115,15 кгс - уменьшение износа в 3,2-7,5 раз при незначительном влиянии на момент трения и температуру смазочной среды.

Испытания, проведенные в термовлагокамере на коррозионную стойкость металлических образцов показали, стойкость смазочной композиции базового моторного масла с присадкой не ниже базового масла.

Термоокислительная стабильность смазочной композиции выше базового масла, что свидетельствует уменьшение вязкости масла на 3,3%.

Применение МПП в составе моторного масла не ухудшили эксплуатационные показатели ДВС:

- крутящий момент увеличился на 0,33%
- удельный расход топлива снизился на 3,15%
- выбросы вредных веществ в отработавших газах двигателя за период испытаний уменьшились: CO – 1,4%; CH – 1,5%; NOx – 4%.

[1] Гайдар С.М. Консистентные смазки с наномодифицированным дисульфидом молибдена // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2010. – № 4. – С. 27-29.

[2] Гайдар С.М. Защита сельскохозяйственной техники от коррозии // диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. М.: МГАУ. – 2011.

[3] Карелина М.Ю., Гайдар С.М. Исследование эффективности триботехнических препаратов на основе наноматериалов // Грузовик. – 2015. – № 4. – С. 17-29.

[4] Гайдар С.М. Характеристика и показатели наноматериалов для снижения износов деталей сельхозмашин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2009. – № 12. – С. 20-22.

[5] Гайдар С.М. Применение нанотехнологий для повышения надежности машин и механизмов // Грузовик. – 2010. – № 10. – С. 38-41.

[6] Гайдар С.М., Карелина М.Ю., Петровская Е.А., Зиятдинов Э.А. Повышение износостойкости узлов трения // Труды ГОСНИТИ. – 2016. – Т. 122. – С. 40-47.

[7] Карелина М.Ю., Гайдар С.М. Технология повышения износостойкости поверхностей трибосопрежений физико-химическим методом // Грузовик. – 2015. – № 3. – С. 12-16.

[8] Карелина М.Ю., Гайдар С.М., Пыдрин А.В. Исследование влияния наноструктурирования поверхностей трибосопрежений на эксплуатационные характеристики двигателей // Грузовик. – 2015. – № 2. – С. 29-37.

[9] Гайдар С.М., Волков А.А., Карелина М.Ю. Адсорбция фтор-ПАВ и ее влияние на смазку трибосопрежений в условиях граничного и гидродинамического трения // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т. 118. – С. 113-124.

[10] Гайдар С.М., Свечников В.Н., Усманов А.Ю., Иванов М.И. Использование наноматериалов в качестве присадок к маслам для уменьшения трения в трибосопрежениях // Техника и оборудование для села. – 2013. – № 1. – С. 35-37.

[11] Жерновников Д.Н. Защита стали от атмосферной коррозии летучим ингибитором коррозии ИФХАН-114 // Державинский форум. – 2019. – Т. 3. – № 9. – С. 105-112.

[12] Бекназаров Х.С., Джалилов А.Т., Останов У.Ю., Эркаев А.М. Ингибирование коррозии углеродистой стали олигомерными ингибиторами коррозии в различных средах // Пластические массы. – 2013. – № 8. – С. 36-39.

[13] Гайдар С.М., Коноплев В.Е., Петровский Д.И., Посушко И.А., Пикина А.М. Исследование синергетического эффекта контактных ингибиторов анодного и катодного действия при защите стали от коррозии // Коррозия: материалы, защита. – 2021. – № 12. – С. 10-14.

[14] ГОСТ 15171-78. Присадка АКОР-1. Технические условия. Введ. 01.01.1980.

[15] Пыдрин А.В. Повышение коррозионной стойкости низкоуглеродистых сталей применением полифункциональных ингибиторов // Вестник ФГОУ ВПО "МГАУ имени В.П. Горячкина". – 2016. – Т. 74. – № 4. – С. 46-50.

[16] ГОСТ 23216-84. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов на трение и изнашивание при смазывании маслохладоновыми смесями. Введ. 01.01.1986.

[17] Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки служебных свойств смазывающих масел и присадок к ним с использованием роликовых испытательных установок: Метод. указания / Госстандарт СССР. – 1980. – 59 с.

[18] Посушко, И. А. Влияние внутренних и внешних факторов на коррозионно-механическое изнашивание деталей топливной системы / И. А. Посушко, 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.

ФТОРСОДЕРЖАЮЩАЯ ПРИСАДКА К МОТОРНОМУ МАСЛУ

¹Коноплев В.Е.*, ¹Лапсарь О.М., ²Сытьков Е.С.

* techmash@rgau-msha.ru

¹Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева. Москва, Россия.

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство)», Москва, Россия.

Синтезирована фторсодержащая присадка к моторному маслу. Эта присадка улучшает фрикционно-износные и эксплуатационные характеристики узлов трения. Разработанная модель исследований позволяет учитывать нагрузочные режимы и факторы внешней среды при движении транспортного средства и формировать базу данных для стендовых испытаний. Кроме того, данная физическая модель позволяет определять фрикционно-износные характеристики узлов трения с использованием законов подобия, учитывающих процессы контактного взаимодействия твердых тел.

Ключевые слова: присадка, моторное масло, смазочные материалы.

Введение

Поверхностно-активные вещества (ПАВ) обладают способностью адсорбироваться на поверхностях раздела фаз и понижать их поверхностное натяжение (поверхностную энергию). ПАВ обладают свойствами понижать поверхностное натяжение (энергию) на границе раздела фаз жидкость – жидкость (жидкость – твердое тело). ПАВ – это, как правило, органическое соединение, молекулы которых содержат атомные группы, сильно различающиеся по силе взаимодействия с растворителем. Так, в молекулах ПАВ имеются лиофильные и лиофобные группы. Полярные группы обеспечивают адсорбцию молекул на твердой поверхности в результате чего, формируется молекулярная пленка, улучшающая смазочное действие – снижение трения и износа.

Большой интерес представляют фторированные ПАВ, в которых неполярная часть молекул содержит фторуглеродный радикал.

Свойства ПАВ с фторированным радикалом существенно отличаются от ПАВ с углеводородным радикалом. Это обусловлено тем, что атомы F образуют вокруг углеродной цепи более плотную и одновременно более объемную оболочку, чем атомы H. Высокая энергия связи C-F, а также защитный «экран» из атомов F, «изолирующий» углеродную цепь от внешних химических воздействий,

FLUORINE-CONTAINING ADDITIVE TO ENGINE OIL

Konoplev V.E., Lapsar O.M., Sytkov E.S.

A fluorine-containing additive to engine oil has been synthesized. This additive improves the friction-wear and performance characteristics of friction units. The developed research model allows taking into account the load conditions and environmental factors when driving a vehicle and forming a database for bench tests. In addition, this physical model makes it possible to determine the friction and wear characteristics of friction units using similarity laws that take into account the processes of contact interaction of solids.

Keywords: additive, engine oil, lubricants.

определяют высокую термодинамическую и химическую стойкость и чрезвычайно низкую когезию F- ПАВ. Это обуславливается слабым межмолекулярным взаимодействием, проявляющимся, в низком поверхностном натяжении растворов F-ПАВ и низкой поверхностной энергией смачиваемых твердых поверхностей.

Материалы и методы

Определение влияния антифрикционной присадки к моторному маслу на характеристики двигателя транспортного средства класса 5, а также состояние деталей двигателя и надежности его работы были проведены путем сравнительных испытаний двигателя с моторным маслом без антифрикционной присадки и с ней. Объект испытаний: двигатель ВАЗ-11194 № 000094 в комплектации «ЕВРО-5».

Материалы: антифрикционная присадка, моторное масло Лукойл Genesis 5W-30 производства ООО «ЛЛК-Интернешнл» (далее моторное масло).

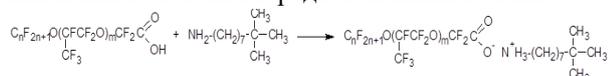
Результаты и обсуждение

Для получения F-ПАВ, обладающих растворимостью в маслах и хладагентах используют фторангидрид перфторполиоксаалкиленкарбоновых кислот. Полученное F-ПАВ растворяется в хладоне и эмульгируется в углеводородах. Такие соединения

дают возможность широко их использовать в качестве основы антифрикционных, противозадирных присадок в различных смазочных композициях и гидравлических жидкостях с широким спектром действия (противоизносные, антикоррозионные), в широком диапазоне температур (-35 – 450 °С) и с большим сроком их действия.

F-ПАВ, адсорбируясь на твердых поверхностях, снижают их поверхностную энергию с 1800-6000 мН/м до 4-6 мН/м, коэффициент трения в 10-20 раз, момент трения покоя в 100-104 раз, повышают тенгенциональное усилие сдвига масла или углеводородной жидкости на твердой поверхности в 70-75 раз, они имеют высокую упругость пара, равную 10^{-13} - 10^{-14} торр, термостабильны до температуры 450 °С, не горючи, взрыво-пожаробезопасно и не токсичны (4 кл. опасности).

Для получения маслорастворимого ПАВ перфторированную карбоновую кислоту смешивают с первичным алифатическим амином в эквимолярном соотношении (1:1). При этом происходит перенос протона из карбоксильной группы кислоты на свободную пару электронов азота амино-группы. В результате образуется соль, в которой аммониевый катион связан с анионом кислотного остатка посредством ионной связи:



$$n = 1-3; m = 10-24.$$

В результате образуется гибридная молекула с углеводородным и фторуглеродным радикалом. Полученные ПАВ позволяет получить на поверхности трения молекулярную пленку решающую компромиссную задачу по уменьшению гидродинамического трения и трения при граничной смазке.

Важным достоинством заявляемых соединений является их доступность и возможность получения их производных с различной растворимостью и эмульгирующей способностью в смазочных маслах.

После применения присадки при работе двигателя с полностью открытым дросселем по внешней скоростной характеристике зафиксировано:

- увеличение крутящего момента (Mk) в среднем на 4,1%;
- увеличение мощности (Ne) в среднем на 3,0%;
- снижение удельного расхода топлива (ge) в среднем на 3%.

После пятидесятичасовых испытаний значения Mk, Ne, ge изменились на 1,6%; 0,6; 0,6% соответственно и наблюдалась стабилизация результатов до 100-часовых испытаний.

Расход топлива G цикл за цикл (1 час) при добавлении присадки в моторное масло в среднем снизился на 5,6% (0,67 кг/ч для данного ДВС) относительно расхода топлива за цикл, полученного за период испытаний двигателя с базовым моторным маслом.

При осмотре двигателей после испытаний в течение 100 ч установлено, что дефекты (задиры, натирки, царапины и др.) на деталях отсутствуют. Поршни и кольца работоспособны, кольца свободны. Общая загрязненность двигателей (поддон, головка и др.) отложениями нагаров, лаков и шламов, одинакова.

Заключение

Проведен анализ факторов влияющих на надежность силовых установок и передач в условиях сельскохозяйственного производства. Отмечены основные направления улучшения фрикционно-износных и эксплуатационных характеристик трибосистем.

Разработана рецептура антифрикционной присадки, представляющая собой поверхностно-активное вещество гибридного строения. Наличие углеводородного и фторуглеродного радикала в структурной формуле позволяет уменьшить гидродинамическое и граничное трение.

Разработаны модель исследований, формирующая базы данных для стендовых испытаний, позволяющая учитывать нагрузочные режимы и факторы внешней среды при движении транспортного средства, а также физическая модель определения фрикционно-износных характеристик узлов трения с использованием законов подобия, учитывающих процессы контактного взаимодействия твердых тел.

- [1] Гайдар С.М. Консистентные смазки с наномодифицированным дисульфидом молибдена // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2010. – № 4. – С. 27-29.
- [2] Гайдар С.М. Защита сельскохозяйственной техники от коррозии // диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: МГАУ. – 2011.
- [3] Карелина М.Ю., Гайдар С.М. Исследование эффективности триботехнических препаратов на основе наноматериалов // Грузовик. – 2015. – № 4. – С. 17-29.
- [4] Гайдар С.М. Применение нанотехнологий для повышения надежности машин и механизмов // Грузовик. – 2010. – № 10. – С. 38-41.
- [5] Гайдар С.М., Карелина М.Ю., Петровская Е.А., Зиятдинов Э.А. Повышение износостойкости узлов трения // Труды ГОСНИТИ. – 2016. – Т. 122. – С. 40-47.

- [6] Карелина М.Ю., Гайдар С.М. Технология повышения износостойкости поверхностей трибосопряжений физико-химическим методом // Грузовик. – 2015. – № 3. – С. 12-16.
- [7] Карелина М.Ю., Гайдар С.М., Пыдрин А.В. Исследование влияния наноструктурирования поверхностей трибосопряжений на эксплуатационные характеристики двигателей // Грузовик. – 2015. – № 2. – С. 29-37.
- [8] Гайдар С.М., Волков А.А., Карелина М.Ю. Адсорбция фтор-ПАВ и ее влияние на смазку трибосопряжений в условиях граничного и гидродинамического трения // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т. 118. – С. 113-124.
- [9] Гайдар С.М., Свечников В.Н., Усманов А.Ю., Иванов М.И. Использование наноматериалов в качестве присадок к маслам для уменьшения трения в трибосопряжениях // Техника и оборудование для села. – 2013. – № 1. – С. 35-37.
- [10] Жерновников Д.Н. Защита стали от атмосферной коррозии летучим ингибитором коррозии ИФХАН-114 // Державинский форум. – 2019. – Т. 3. – № 9. – С. 105-112.

- [11] Гайдар С.М., Коноплев В.Е., Петровский Д.И., Посулько И.А., Пикина А.М. Исследование синергетического эффекта контактных ингибиторов анодного и катодного действия при защите стали от коррозии // Коррозия: материалы, защита. – 2021. – № 12. – С. 10-14.
- [12] 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 2. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2020. – С. 339-344.

РАЗРАБОТКА МАШИНЫ ТРЕНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ИЗ СТЕКЛОЭПОКСИДНОГО АНТИФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

Константинов Е.О.*, Прожега М.В.

* egorkonst1228@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия.

Приведены преимущества использования стеклоэпоксидного антифрикционного материала перед древесным слоистым пластиком и бронзой. Также указаны основные параметры проведения испытаний на разрабатываемой машине трения. Приведены основные параметры и схема разрабатываемой машины трения для испытаний подшипников скольжения

Ключевые слова: трение, подшипник скольжения, стеклоэпоксидный материал, антифрикционный материал.

Введение

Основная особенность функционирования узлов трения в лопатках направляющего аппарата гидротурбины состоит в том, что втулки опорных поверхностей подвергаются изменяющемуся давлению в диапазоне от 0 до 25 МПа при невысоких скоростях скольжения, достигающих 0,003 м/с.

Применение бронзы в качестве материала втулки требует использования смазочных материалов, которые в конечном итоге попадают в

DEVELOPMENT OF A FRICTION MACHINE FOR SLIDING BEARING MADE OF FIBER-GLASS EPOXY MATERIAL

Konstantinov E.O., Prozhega M.V.

The advantages of using fiber-glass epoxy antifriction material over wood laminated plastic and bronze are presented. The main parameters of testing on the friction machine are also indicated. The main parameters and the scheme of the developed friction machine for testing sliding bearings are given.

Keywords: friction, sliding bearing, fiber-glass epoxy material, antifriction material.

поток воды, что в свою очередь ведет к нарушению норм в области охраны природы. Повышенная гигроскопичность втулок из древесного слоистого материала вызывает трудности при их изготовлении, транспортировке, установке и эксплуатации. Ввиду вышеперечисленных причин материалы данных узлов трения должны обладать низким влагопоглощением, минимальным коэффициентом трения, повышенной износостойкостью [1].

Материалы и методы

Для подшипников скольжения был разработан стеклоэпоксидный антифрикционный материал, который имеет высокую прочность на сжатие (147,1 МПа), низкое водопоглощение и высокие антифрикционные свойства [2]. Последнее обеспечивается за счет наличия в составе этого композитного материала частиц фторопласта Ф-4 размером от 0,5 до 1,5 мм. Ниже представлены втулки 3, 4 и 5 из вышеупомянутого материала на рис. 1 [2,3].

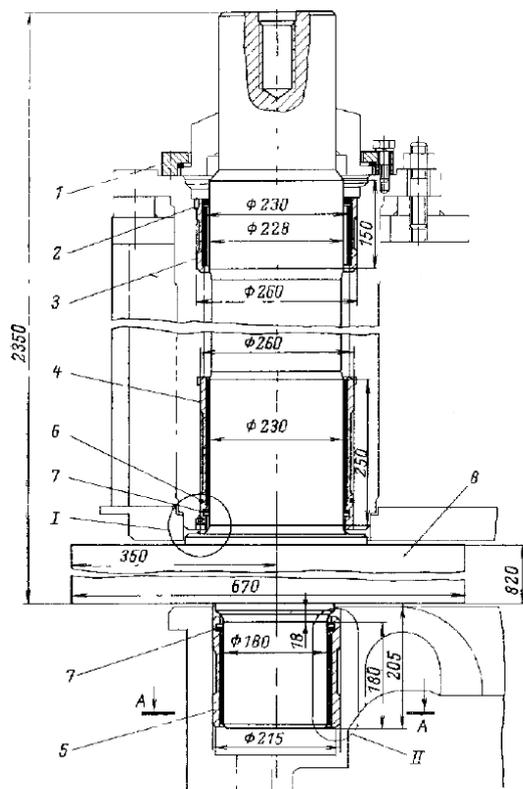


Рис. 1. Опорные узлы лопаток направляющего аппарата турбины

Предлагаемая методика испытания втулок из стеклоэпоксидного материала имеет следующие параметры:

- средняя скорость скольжения – 0,1 м/с;
- давление в узле трения – 25 МПа;
- материал цапфы – нержавеющая сталь 12X18Н10Т ГОСТ 5632-2014 с шероховатостью поверхности Ra 0,8 мм;
- угол возвратно-вращательного движения – $\leq 52^\circ$;
- смазочный материал – вода;
- критерий остановки – превышение заданного коэффициента трения ($f = 0,15$).

Результаты и обсуждение

Для моделирования условий трения подшипника скольжения лопатки направляющего аппарата турбины в данной работе приведены

основные параметры (табл. 1) при принятых значениях внутреннего диаметра и длины втулки $d = L = 30$ мм и удельном давлении 25 МПа.

Табл. 1. Основные параметры разрабатываемой машины трения

№	Параметр	Значение
1	Максимальный момент трения	50 Н·м
2	Нагружающее усилие	$\geq 22\ 050$ Н

В соответствии с расчётными параметрами в качестве нагружающего узла выбрана пневматическая система нагружения, реализующая усилие в 1 кН.

Ниже приведена схема предложенной машины трения (рис. 2).

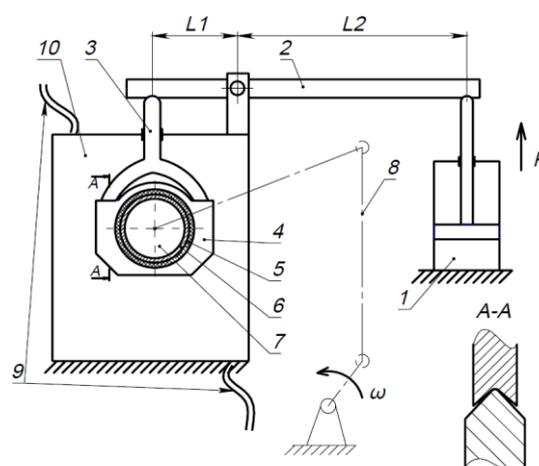


Рис. 2. Схема разрабатываемой машины трения:

- 1 – пневмоцилиндр; 2 – рычаг; 3 – вилка; 4 – обойма;
5 – стеклоэпоксидная втулка; 6 – втулка из стали 12X18Н10Т;
7 – вал; 8 – четырехшарнирный механизм; 9 – подвод и отвод смазочного материала(воды); 10 – камера рабочего узла

Нагружение осуществляется пневмоцилиндром 1 через рычаг 2 с плечами $L1$ и $L2$. Через вилку 3 на обойму 4 с закрепленной в ней стеклополимерной втулкой 5 происходит нагружение узла трения. Стальная втулка 6 установлена неподвижно на вал 7, который приводится во вращение мотор-редуктором через четырехшарнирный механизм 8. В рабочую камеру 10 производится подвод и отвод воды 9.

Заключение

Приведены преимущества использования стеклоэпоксидного антифрикционного материала перед древесным слоистым пластиком и бронзой, заключающиеся в минимальной гигроскопичности и высоких антифрикционных свойствах.

Также указаны основные параметры проведения испытаний на разрабатываемой машине трения: смазочный материал – вода, материал цапфы – нержавеющая сталь 12X18Н10Т и т.д.

Приведены основные параметры и схема разрабатываемой машины трения для испытаний подшипников скольжения, основными узлами которой являются рычаг, пневмоцилиндр, обойма, стеклоэпоксидная втулка и вал.

[1] Демьянов В.А. Расчетно-экспериментальное обоснование конструкции экологичных поворотных гидротурбин: специальность 05.04.13 "Гидравлические машины и гидропневмоагрегаты": автореферат диссертации на соискание

ученой степени кандидата технических наук / Демьянов Владимир Александрович. – Санкт-Петербург, 2013. – 26 с.

[2] Авторское свидетельство № 411748 А1 СССР, МПК С08L 63/00, F16C 33/26. Слоистый пластик: № 1272201: заявл. 17.08.1968: опубл. 30.11.1988 / Н.И. Пылаев, В.Я. Пономарев; заявитель ЛЕНИНГРАДСКИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ЗАВОД ИМ.ХХП СЪЕЗДА КПСС.

[3] Штерн Е.П. Справочник по эксплуатации и ремонту гидротурбинного оборудования / Е.П. Штерн, М.И. Гальперин, А.Ф. Дмитрухин и др.; под ред. Штерн Е.П. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 368с

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА АВТОМАТИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА ИЗНОСА НА ГАЗОПРОВОДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРЕЖЕННОЙ ОЦЕНКИ СИГНАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛНОВОДОВ

Корнеев Р.В., Скотникова М.А.

elmic@yandex.ru

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

В данной работе предложен метод обнаружения и локализации повреждений в конструкциях трубопроводов. Он основан на разреженной оценке измеряемых сигналов опорными сигналами. Исследуется упрощенная форма этой оценки с использованием неотрицательного метода наименьших квадратов.

Ключевые слова: разреженная оценка, обнаружение и локализация повреждений, мониторинг состояния конструкций, экологические и эксплуатационные условия, психические и эксплуатационные условия, трубопровод.

Введение

Трубопроводы являются очень важными конструкциями, особенно те, которые используются для транспортировки нефти, газа и других химических веществ. Чтобы обеспечить лучшие условия работы этих конструкций, их необходимо постоянно контролировать. Для решения этой проблемы были предложены системы мониторинга состояния конструкции (SHM). Они направлены на обнаружение, локализацию и оценку степени серьезности повреждения конструкции. Обнаружение повреждений выполняется путем сравнения опорных сигналов, полученных из исправного состояния, и текущего сигнала. Для

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF AUTOMATION OF WEAR MONITORING ON A GAS PIPELINE USING SPARSE EVALUATION OF ULTRASONIC WAVEGUIDE SIGNALS

Korneev R. V., Skotnikova M. A.

In this paper, a method for detecting and localizing damage in pipeline structures is proposed. It is based on a sparse estimate of the measured signals by reference signals. A simplified form of this estimate is investigated using the non-negative least squares method.

Keywords: sparse estimation, damage detection and localization, structural health monitoring, environmental and operational conditions, mental and operational conditions, pipeline.

конструкции трубопровода сигналы обычно получаются с помощью техники ультразвуковых направляемых волн (UGW). UGW — это волны напряжения, которые распространяются через среду и направляются границей конструкции. Эти волны могут распространяться во всех направлениях, обеспечивая, таким образом, объемное покрытие, и они взаимодействуют с разрывами конструкции (повреждения, сварные швы, концы конструкции и т. д.).

Задача сравнения опорного сигнала с текущим сигналом нелегка, поскольку работоспособное состояние конструкции может меняться из-за изменений в условиях окружающей среды и

эксплуатации (ЕОС) (например, температуры, влажности, вибрационных нагрузок и т. д.).

Цель работы, это достигнуть лучшей оценки повреждений с использованием разреженной оценки данных *Задачей* работы стало, для локализации повреждения, применить разреженную оценку на скользящем окне над поврежденным сигналом. Это мотивируется тем фактом, что при работе с UGW влияние повреждения на сигнал является только локальным.

Материалы и методы

Метод наименьших квадратов основан на том факте, что полученные сигналы УГВ (ультразвуковые направленные волны) сильно коррелированы. Разреженность помогает повысить обнаруживаемость повреждений, поскольку поврежденный сигнал будет иметь большую ошибку оценки по сравнению с исправным сигналом. Кроме того, он может столкнуться с проблемой вариации ЭОС (окружающих и эксплуатационных условий) при условии, что база данных опорных сигналов содержит большие вариации этих ЭОК.

Обнаружение дефекта обеспечивалось путем расчета квадратичной ошибки оценивания $J(\theta)$ на всем токовом сигнале. При этом локализация повреждения была установлена путем реализации рекурсивной версии разреженной оценки по скользящему окну над поврежденным сигналом.

В перспективе этой работы можно рассмотреть обновление базы данных эталонных сигналов в случае, если эти сигналы представляют собой ограниченные вариации ЕОС. Этого можно достичь, добавив в эту базу данных новые здоровые сигналы с неизвестными вариациями ЕОС. Кроме того, предлагаемый метод должен быть проверен на действующих трубопроводах в различных ЕОС.

Результаты и обсуждение

По результатам данного исследования были сделаны следующие выводы:

Разреженная оценка

Идея использования разреженной оценки текущего сигнала заключается в том, что неповрежденный сигнал должен быть хорошо оценен с помощью опорных сигналов, которые имеют аналогичные ЕОС. Первоначально оценка текущего сигнала $xx \in Rmt$ по матрице эталонных сигналов $CC \in Rmt \times nn$ может быть обеспечена путем минимизации квадратичной ошибки, приведенной ниже:

$$\begin{aligned} J(\theta) &= \|C\theta - x\|_2^2 \\ \hat{\theta} &= \arg \min_{\theta} J(\theta) \end{aligned} \quad (1)$$

где $\theta \in Rnn$ — вектор коэффициентов регрессии, mt и nn — количество выборок и количество опорных сигналов соответственно.

Индикаторы повреждений

Для обнаружения наличия повреждения необходимо получить показатель из разреженной оценки текущего сигнала. Если сигнал поврежден, мы ожидаем, что ошибка оценки будет очень высокой по сравнению с ошибкой неповрежденного сигнала. Следовательно, в качестве индикатора повреждения можно выбрать квадратичную ошибку оценки $J(\theta)$, заданную решением задачи NNLS, описанной уравнением (6).

Разреженность коэффициентов регрессии (Sr) также можно использовать в качестве индикатора ущерба. Он определяется как отношение количества нулевых коэффициентов в θ к общему количеству опорных сигналов:

$$Sr = \frac{n - \text{card}(P)}{n} \times 100 \quad (2)$$

где $\text{card}(P)$ обозначает кардинал последнего набора пассивных ограничений P . Фактически поврежденный сигнал будет характеризоваться очень малым количеством пассивных коэффициентов.

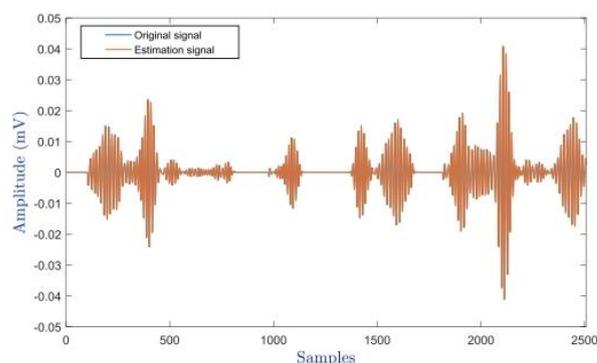


Рис. 1. Исходный неповрежденный сигнал и его оценка

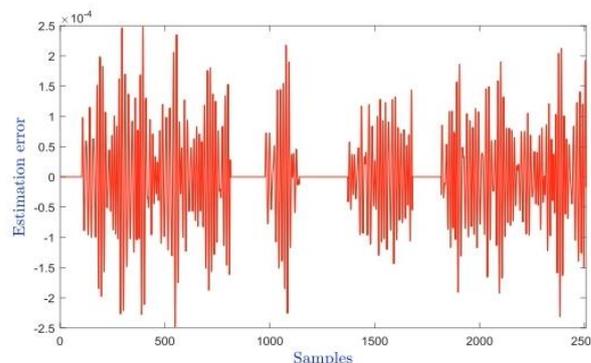


Рис. 2. Погрешность оценки опорного сигнала показанного на рис. 1

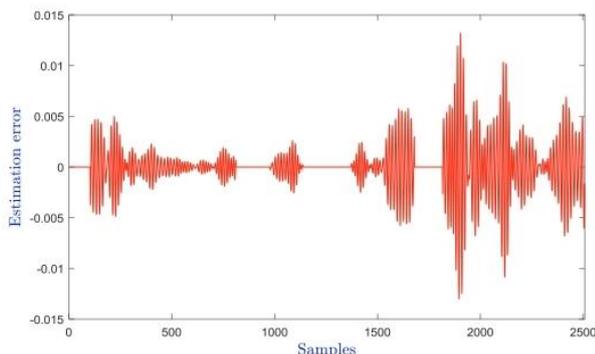


Рис. 3. Погрешность оценки поврежденного сигнала

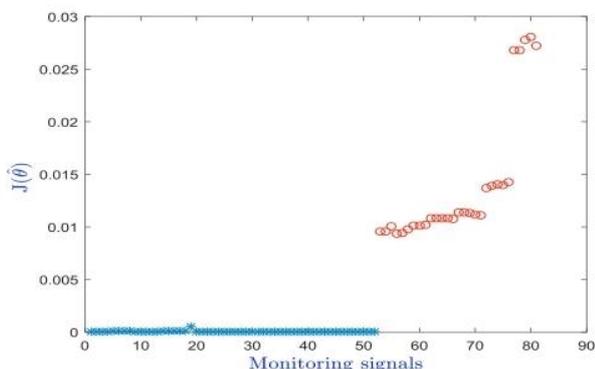


Рис. 4. Квадратичная оценка ошибки $J(\theta)$ неповрежденных и поврежденных сигналов

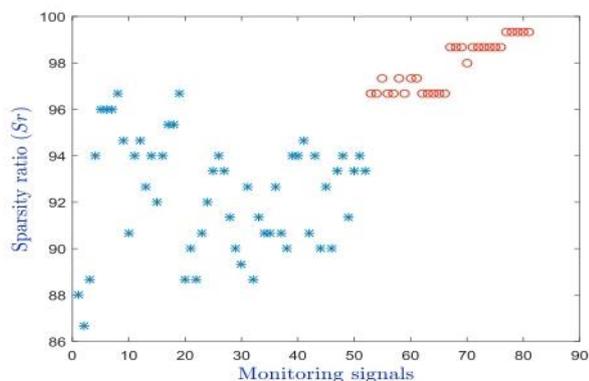


Рис. 5. Коэффициент разреженности неповрежденных и поврежденных сигналов

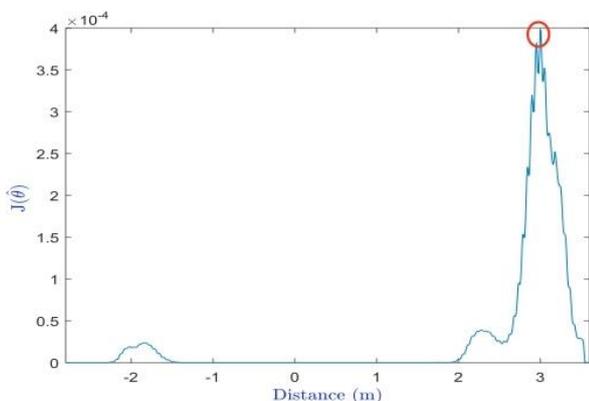


Рис. 6. Квадратичная оценка ошибки $J(\theta)$ поврежденного сигнала, показывающая повреждение положения

Заключение (Выводы)

Погрешность оценки используется как показатель наличия повреждения. Фактически сигнал повреждения будет характеризоваться высокой погрешностью оценки на скользящем окне над поврежденным сигналом. Этот метод был протестирован на сигналах, собранных на малогабаритном трубопроводе, размещенном в лабораторных условиях. Результаты показали, что созданное повреждение было успешно обнаружено и локализовано.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00178, <https://rscf.ru/project/22-19-00178/>.

- [1] Медведева М.Л. Основы электрохимической коррозии и защиты оборудования при транспорте и хранении нефти и газа – М.: Российский гос. унив-т нефти и газа им ИМ Губкина. – 2004.
- [2] Герасимов, Валентин Владимирович. Прогнозирование коррозии металлов. – М.: Металлургия, 1989. – 151с.
- [3] Мустафин Ф. М. Защита трубопровода от коррозии: учеб. пособие для вузов. – СПб.: Недра, 2005.
- [4] Воробьева Г.Я. Коррозионная стойкость материалов в коррозионных средах химических производств. – М.: Химия, 1975.
- [5] Шумайлов А.С., Гуменов А.Г., Молдованов О.И. Диагностика магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1992. – 251 с.
- [6] Анализ аварий и несчастных случаев на трубопроводном транспорте России: учеб. пособие для вузов/ Под ред. Б.Е. Прусенко, В.Ф. Мартынюка. – М.: Анализ опасностей, 2003. – 351 с.
- [7] Шумайлов А.С., Гуменов А.Г., Молдованов О.И. Диагностика магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1992. – 251 с.
- [8] Lucà F. et al. Automatic detection of real damage in operating tie-rods //Sensors. – 2022. – Т. 22. – №. 4. – С. 1370.
- [9] Awadallah O., Sadhu A. Automated multiclass structural damage detection and quantification using augmented reality //Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience. – 2023. – Т. 2. – №. 1. – С. 100024.
- [10] El Mountassir M. et al. Damage detection and localization in pipeline using sparse estimation of ultrasonic guided waves signals //IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Т. 51. – №. 24. – С. 941-948.
- [11] Eybpoosh M., Berges M., Noh H. Y. Sparse representation of ultrasonic guided-waves for robust damage detection in pipelines under varying environmental and operational conditions //Structural Control and Health Monitoring. – 2016. – Т. 23. – №. 2. – С. 369-391.
- [12] Eybpoosh M., Berges M., Noh H. Y. An energy-based sparse representation of ultrasonic guided-waves for online damage detection of pipelines under varying environmental and operational conditions //Mechanical Systems and Signal Processing. – 2017. – Т. 82. – С. 260-278.
- [13] Farrar C. R., Worden K. An introduction to structural health monitoring //Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2007. – Т. 365. – №. 1851. – С. 303-315.
- [14] Davis J., Goadrich M. The relationship between Precision-Recall and ROC curves //Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning. – 2006. – С. 233-240.
- [15] Lowe M. J. S., Alleyne D. N., Cawley P. Defect detection in pipes using guided waves //Ultrasonics. – 1998. – Т. 36. – №. 1-5. – С. 147-154.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА АВТОМАТИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА ИЗНОСА НА ГАЗОПРОВОДЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Корнеев Р.В., Скотникова М.А.

elmic@yandex.ru

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

В этой статье предлагается основа многоклассовой системы идентификации и количественной оценки повреждений стареющих структур, с использованием AR (augmented reality – дополненной реальности). Данная технология может быть применима в трубопроводе и может быть полезна в трибологии оборудования энергетической инженерии, а также является инновационным взглядом на методы обнаружения повреждений, в данной области, и открывает новые возможности, для создания технологий будущего в энергетической логистике, информационных технологиях и трибологии.

Ключевые слова: дополненная реальность, классификация повреждений, количественная оценка повреждений, глубокое обучение, многоклассовая идентификация, мониторинг состояния конструкций, трубопровод.

Введение

Магистральным газопроводом называется трубопровод, предназначенный для транспортировки газа из района добычи в районы его потребления. Движение газа по магистральному газопроводу обеспечивается компрессорными станциями, сооружаемыми по трассе через определенные расстояния.

Для управления потоками газа, транспортируемого по газопроводам, используется трубопроводная арматура. В качестве газоперекачивающих агрегатов применяются поршневые газомоторные компрессоры в котором объединены силовая часть (привод) и компрессор для сжатия газа.

К основным причинам сбоев в работе деталей оборудования, относятся четыре механизма износа: коррозия, усталость, адгезия и абразивное изнашивание.

Поэтому, для обнаружения повреждений в газопроводе, скрытых под землей, разрабатываются современные автоматизированные технологии мониторинга износа труб в режиме реального времени с применением неразрушающих методов контроля.

Целью работы является усовершенствование методов обнаружения повреждений в газопроводе, с помощью современных технологий.

Задачами работы стали анализ технологий дополненной реальности, применение их в

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF AUTOMATION OF WEAR MONITORING ON A GAS PIPELINE USING AUGMENTED REALITY

Korneev R.V., Skotnikova M.A.

This paper proposes a framework for a multi-class system for identifying and quantifying damage to aging structures using AR (augmented reality). This technology can be applied in pipelines and can be useful in tribology of energy engineering equipment, and is an innovative look at damage detection methods in this field, and opens up new possibilities for creating future technologies in energy logistics, information technology and tribology.

Keywords: augmented reality, damage classification, damage quantification, deep learning, multiclass identification, structural health monitoring, pipeline.

инженерных целях, применение их для трибологии и обнаружении повреждений и применение этой технологии для газопровода.

Материалы и методы

Система оценки разработана для работы с гарнитурой HL2 (виртуальные очки HoloLens 2).

Предлагаемая схема состояла из трех этапов: получение изображения, идентификация ущерба и количественная оценка ущерба. На первом этапе пользователю предлагалось сделать снимок интересующей области в режиме реального времени.

После того, как изображение было получено, оно было отправлено в модель идентификации повреждений в облаке. После того, как повреждение было идентифицировано и результаты были представлены пользователю, пользователю было предложено разместить точки сегментации для количественной оценки ущерба и расчета длины или площади и периметра. Модель идентификации повреждений была обучена с использованием архитектуры YOLOv5s и набора данных SDNET2018. Доступ к модели осуществлялся на HL2 через приложение Unity после того, как она была преобразована в формат ONNX и развернута в облаке.

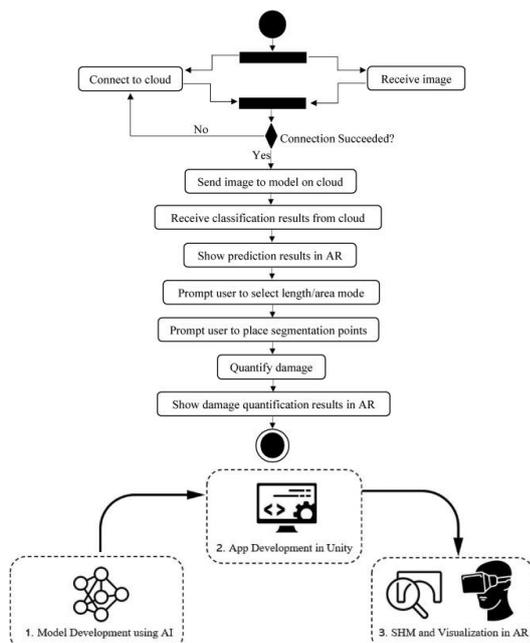


Рис. 1. Блок схема технологии передачи данных, с помощью очков HL2 (HoloLens 2), в Unity, в формат ONNX

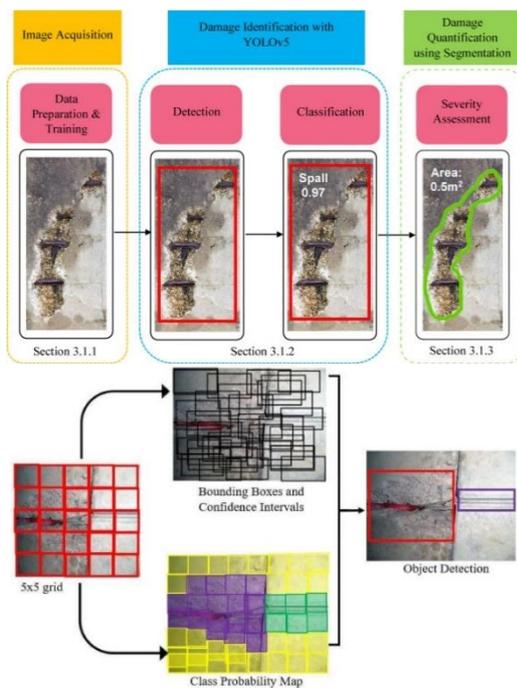


Рис. 2. Процесс сканирования объекта, для построения его виртуальной модели

Система количественной оценки ущерба использовала функцию пространственного картографирования в HL2 для получения реальных координат точек сегментации. После получения координат длина, площадь и периметр были рассчитаны предложенным методом. Система была протестирована в помещении и на открытом воздухе, чтобы оценить ее работу. Графики mAP и потерь были построены для наблюдения за эффективностью модели идентификации повреждений.

Модель количественной оценки ущерба была оценена путем измерения фактических значений вручную и с использованием программного обеспечения ImageJ, а затем сравнения фактических значений с экспериментальными значениями, полученными с помощью HL2.

Система была протестирована на предмет того, насколько далеко пользователь находится от повреждения, чтобы убедиться в ее удобстве использования.

Результаты и обсуждение

По результатам данного исследования были сделаны следующие выводы:

1. Система может обнаруживать и классифицировать трещины, сколы, питтинги и стыки бетона с точностью более 90% на расстоянии до 2 м, а система количественного определения может рассчитывать длину, площадь и периметр с погрешностью менее 2%. Идентификация и количественная оценка ущерба может проводиться как в помещении, так и на открытом воздухе с приемлемыми характеристиками; это расширяет возможности использования системы.

2. Было замечено, что точность модели идентификации повреждений обратно пропорциональна тому, насколько далеко пользователь находится от повреждения. Точность снижалась с увеличением расстояния; это может быть связано с меньшим количеством функций, извлеченных моделью ML, поскольку качество изображения ухудшается с увеличением расстояния. В будущем производительность модели можно улучшить за счет использования более сложной архитектуры, содержащей больше сетей извлечения признаков, таких как YOLOv5l и YOLOv5x.

3. Точность количественного определения увеличивалась при увеличении точек сегментации; однако время расчета не изменилось. Кроме того, точность количественного определения существенно не менялась при увеличении расстояния от места повреждения. Однако подход к количественной оценке позволил количественно оценить ущерб только с максимального расстояния 3 м из-за ограничения расстояния функции пространственного картирования HL2 в 3,1 м. В будущем использование более совершенной AR-гарнитуры с более длительным пределом пространственного отображения может улучшить производительность HL2.

Предлагаемое исследование показало, как можно улучшить визуализацию методов контроля конструкций и как можно использовать искусственный интеллект и дополненную реальность,

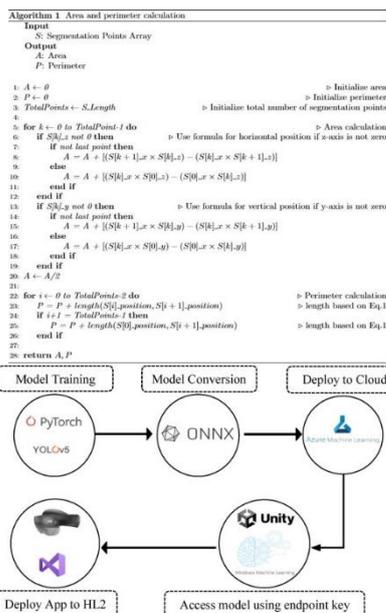


Рис. 3. Процесс развертывания модели идентификации повреждений в HL2

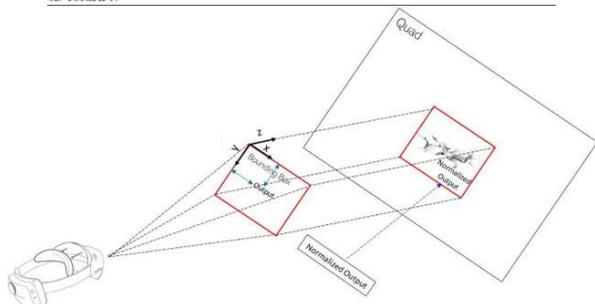
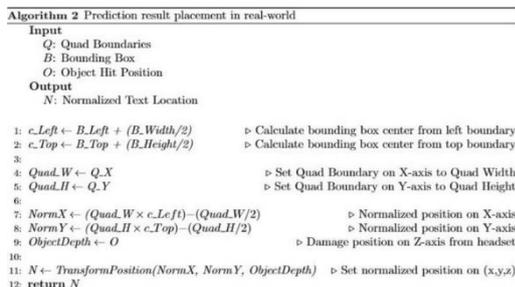


Рис. 4. Иллюстрация проекции информации реального мира с использованием HL2

чтобы сделать проверки более безопасными, быстрыми и экономически эффективными. Это исследование улучшило существующую работу, включив многоклассовую модель идентификации повреждений, которая предоставила инспекторам более инклюзивную систему, которая позволяет им оценивать больше повреждений в сфере строительства, а также в сфере энергетики и, в частности, в трубопроводах; он также предложил более быстрый подход к количественной оценке ущерба, чем существующие методы, который исключил использование графического процессора, это уменьшило время расчета для количественной оценки ущерба и снизило стоимость оборудования.

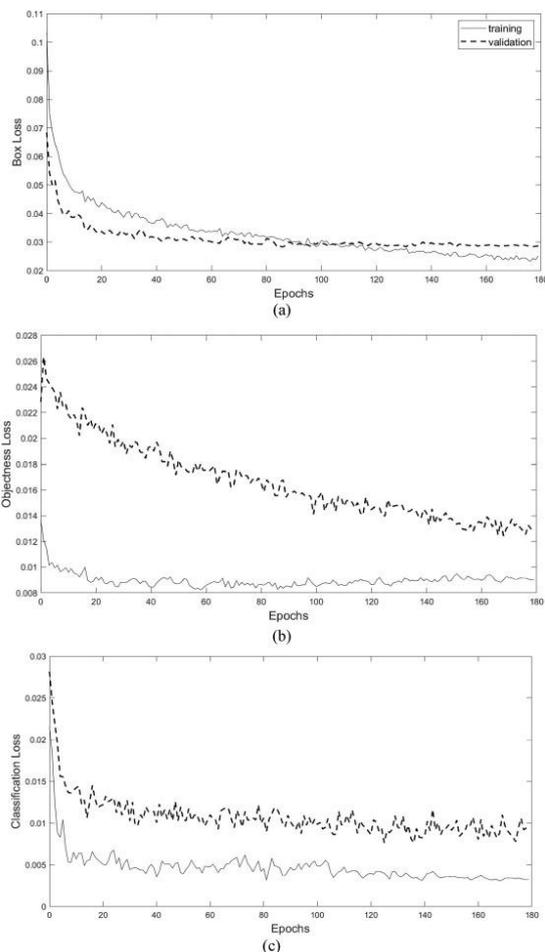


Рис. 5. Кривые потерь для наилучших параметров: (а) потеря ящика, (б) потеря объектности, (с) потеря классификации

Заключение (Выводы)

Хотя результаты этого исследования являются многообещающими и были достигнуты результаты, описанные выше, которые я подробнее опишу в своей научной работе, необходимо провести дальнейшие исследования в этой области для смягчения наблюдавшихся ограничений. Наличие шума, яркости, размытости изображений и удаленность инспектора от повреждений на реальных объектах проверки часто вносят значительную неточность в работу AR-устройств, которую необходимо детально изучить. Будущие исследования также будут включать визуализацию глубины повреждений и удаленное сотрудничество с несколькими инспекторами для дальнейшего улучшения структурных проверок с использованием AR.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00178, <https://rscf.ru/project/22-19-00178/>.

[1] Awadallah O., Sadhu A. Automated multiclass structural damage detection and quantification using augmented reality //Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience. – 2023. – Т. 2. – №. 1. – С. 100024.

ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЫ НА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК

^{1,2}Корнеев С.В., ²Бакулина В.Д., ³Мачехин Н.Ю., ²Анисимов Д.С.

* ver-bakulina81@mail.ru

¹Сибирский автомобильно-дорожный университет, Омск, Россия;

²Омский государственный технический университет, Омск, Россия;

³Омский авто-бронетанковый институт, Омск, Россия.

Пластичные смазки широко используются в технике для смазывания различных узлов трения. Особенно актуально применение пластичных смазок в условиях низких температур, т.к. температура влияет на изменение их основных свойств. В работе представлены направления улучшения низкотемпературных свойств пластичных смазок.

Ключевые слова: пластичные смазки, дисперсионная среда, низкотемпературные характеристики, гидродинамическое давление.

Введение

Пластичные смазки состоят из нескольких компонентов: дисперсионная среда (базовое масло), дисперсная фаза (загуститель) и вводимые присадки и добавки [1]. Все эти компоненты в разной степени влияют на низкотемпературные свойства конечного продукта.

Пластичные смазки относятся к вязкопластичным жидкостям, которые в диапазоне их предела прочности ведут себя как твердые тела [2]. Предел прочности смазки определяет энергетические затраты на сдвиг и проворачиваемость смазываемого узла. Для оценки низкотемпературных свойств рассматривается вязкое течение жидкости. За модель вязкого течения жидкости взято уравнение Френкеля, которое позволяет рассчитывать вязкость пластичной смазки при разных температурах [3]. Результатом эксперимента должны быть построенные вязкостно-температурные характеристики, благодаря чему можно судить о влиянии дисперсионной среды и дисперсной фазы на пластичные смазки в области низких температур.

Материалы и методы

В основу методики эксперимента был взят метод определения гидродинамического давления пластичных смазок, который приобретает все большую актуальность. Решающим фактором в

INFLUENCE OF THE PROPERTIES OF THE DISPERSION MEDIUM ON THE LOW-TEMPERATURE CHARACTERISTICS OF GREASES

Korneev S.V., Bakulina V.D., Machehin N.Y., Anisimov D.S.

Greases are widely used in engineering to lubricate various friction units. It is especially important to use greases at low temperatures, because temperature affects the change in their basic properties. The research present ways to improve the low-temperature properties of greases.

Keywords: greases, dispersion medium, low temperature characteristics, hydrodynamic pressure.

выборе данного метода для определения низкотемпературных свойств пластичных смазок стала постоянная скорость сдвига. Таким образом, можно от вязкости перейти к давлению при расчетах.

Результаты и обсуждение

Около 80% выпускающихся смазок в мире являются литиевыми, 20% из них являются комплексными [4]. Поэтому в работе рассматриваются литиевые смазки. Группа образцов для сравнения были взяты по очередям в зависимости от влияния компонентов:

А) Очередь, которая иллюстрирует на графике зависимость низкотемпературных свойств от типа дисперсионной среды, а это смазки: premium grease EP 2, Synth LX EP 2 и LX EP 2

Б) Влияние типа дисперсной фазы: L EP 2, LX EP 2, LTS 2, AIX 2

В) Влияние содержания дисперсной фазы (класса NLGI): L EP 3, L EP 2, L EP 1, L EP 0

Г) Влияние вязкости дисперсионной среды: L EP 2, EP-2.

Полученные данные сведены в таблицу 1.

Оценка влияния дисперсной фазы на низкотемпературные свойства проводилась для смазок консистенции NLGI 2 при использовании идентичной дисперсионной среды, но с различной

Табл. 1 Результаты анализа определения гидродинамического давления смазки по методу Кестерниха

Тип смазки	Flow Pressure, mbar									Энергия активации, кДж/моль
	-50	-40	-35	-30	-25	-20	-15	-10	-5	
L EP 2				1475	925	600	400	250		46,7
LX EP 2					1100	675	425	275		50,2
LTS 2					1275	750	475	275		54,9
ALX 2					1525	875	475	300		59,6
Synth LX EP 2	1350	825		475		325		275		20,2
Premium Grease EP 2				1200	850	575	400	300		37,5
EP-2				1350	875	575	325	250		46,4
L EP 3					1650	1125	775	575	425	37,5
L EP 1				625	400	250	150			49,6
L EP 0			900	500	300	175				54,4

дисперсной фазой. Можно расположить типы смазок по достигаемой температуре:

- комплексная алюминиевая смазка (смазка лабораторного приготовления, минус 24 °С, $E_{акт.} = 59,6$ кДж/моль);
- литий-кальциевая смазка (минус 25 °С, $E_{акт.} = 54,9$ кДж/моль);
- комплексная литиевая смазка (минус 27 °С, $E_{акт.} = 50,2$ кДж/моль);
- литиевая смазка (минус 29 °С, $E_{акт.} = 46,7$ кДж/моль).

Установлено, что чем меньше значение эффективной энергии активации, тем в меньшей мере изменяются свойства смазок при низких температурах. То есть, в данном случае наилучшие результаты показала смазка L EP 2, в то время как самый худший результат у комплексной алюминиевой смазки ALX 2. Причиной может послужить предположение, что алюминиевая комплексная смазка образует гораздо более плотную узловую структуру, в результате чего затруднено течение масла в данных узлах.

Определены зависимости от температуры для смазок консистенции NLGI 3-0 при использовании дисперсной фазы (12-гидрооксистеарат лития) в разных концентрациях и аналогичной дисперсионной средой. Можно расположить типы смазок по достигаемой температуре:

- литиевая смазка NLGI 3 (минус 22 °С, $E_{акт.} = 37,5$ кДж/моль);
- литиевая смазка NLGI 2 (минус 29 °С, $E_{акт.} = 46,7$ кДж/моль);
- литиевая смазка NLGI 1 (минус 38 °С, $E_{акт.} = 49,6$ кДж/моль);
- литиевая смазка NLGI 0 (минус 39 °С, $E_{акт.} = 54,4$ кДж/моль).

Из полученных данных можно сделать вывод, что изменением класса NLGI можно значимо

улучшить низкотемпературные свойства пластичных смазок. Разность между энергиями активации и низкотемпературными пределами эксплуатации смазок NLGI 3 и NLGI 0 весьма большая. От литиевой смазки консистенцией NLGI 3 до литиевой смазки с консистенцией NLGI 0 содержание загустителя уменьшается, и смазка имеет меньший предел прочности. Установлено, что при увеличении энергии активации низкотемпературные свойства (подвижность смазки при низких температурах) улучшаются. Это связано с уменьшением прочности структурного каркаса пластичной смазки из-за уменьшения концентрации загустителя.

- Также установлено, что уменьшение содержания мыла (%) сопровождается уменьшением эффективной вязкости смазок, что напрямую связано с последующим улучшением текучести при низких температурах.

- Для оценки влияния типа дисперсионной среды были выбраны следующие смазки:

- LX EP 2 на базе минерального масла,
- Premium Grease EP 2 на базе полусинтетического масла
- Synth LX EP 2 с синтетической базой.

Получены зависимости от температуры для смазок консистенции NLGI 2 при использовании одной дисперсной фазы (комплексная литиевая смазка), но с различной дисперсионной средой. Полученные результаты представлены ниже:

- комплексная литиевая смазка на минеральной базе (минус 27 °С, $E_{акт.} = 50,2$ кДж/моль);
- комплексная литиевая смазка на полусинтетической базе (минус 32 °С, $E_{акт.} = 37,5$ кДж/моль);
- комплексная литиевая смазка на синтетической базе (минус 52 °С, $E_{акт.} = 20,2$ кДж/моль).

Подбором типа дисперсионной среды можно улучшить низкотемпературные свойства пластичных смазок в широком диапазоне.

Заключение

Установлено, что на низкотемпературные свойства пластичных смазок влияют многие факторы расположенные ниже в порядке важности:

- кинематическая вязкость дисперсионной среды;
- тип дисперсионной фазы (загуститель);
- содержание дисперсионной фазы (класс NLGI);
- тип дисперсионной среды (переход на синтетическое масло).

Сильно изменяя кинематическую вязкость, чтобы добиться какого-то положительного эффекта, существуют риски сильно навредить остальным эксплуатационным свойствам (низкий предел прочности, плохая коллоидная стабильность и т.п.). Изменяя тип загустителя, можно улучшить низкотемпературные свойства в пределах 5 °С. Но нужно учитывать, что при замене загустителя поменяются и прочие свойства пластичной смазки. При изменении (уменьшения) содержания дисперсионной фазы можно улучшить низкотемпературные свойства на 10-15 °С, но вместе

с тем ухудшаются коллоидная стабильность и прочностные свойства смазок. При выборе дисперсионной среды, лучшие показатели по низкотемпературным свойствам имеют синтетические масла четвертой группы (ПАО). Но нужно учитывать, что ПАО (неполярные) плохо взаимодействуют с полярными загустителями, поэтому необходимо будет снижать концентрацию загустителя, что ведет к понижению предела прочности, а при высокой концентрации ухудшается коллоидная стабильность.

[1] Манг Т., Дрезел У. (ред.). Смазочные материалы. Производство, применение, свойства. Справочник пер. с англ. 2-го изд. / под ред. В.М. Школьников – СПб.: ЦОП «Профессия», 2012. – 944 с.

[2] Забиров Ф.Ш. Изучение классификации пластичных смазок: учеб. пособие. — Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2017 – 20 с.

[3] Мелешко А. В. и др. Влияние температуры карбонатации на качество высокощелочных сульфонов //Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2022. – №. 10. – С. 128-135.

[4] Капустин В.М., Тонконогов Б.П., Фукс И.Г. Технология переработки нефти: Учеб. пособие. В 4-х частях. Часть третья. Производство нефтяных смазочных материалов. – М.: Химия, 2014. – 328 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ ОКСИДА ГРАФЕНА НА АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЛИТИЕВЫХ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ

¹Коровушкин В.В.*, ²Шилов М.А., ²Усольцева Н.В., ¹Прожега М.В.

* Korovushkin00@mail.ru

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия;

²НИИ наноматериалов ИвГУ, Иваново, Россия.

В данной работе исследовано влияние трения качения на поведение противозносных присадок литиевой пластичной смазки. Проведены испытания пластичного смазочного материала на износ в условиях трения качения в составе подшипника качения. Для оценки износа подшипника разработана методика, позволяющая с высокой точностью оценить износ колец. Приведен анализ результатов испытаний опытных образцов смазок и влияния смазочного материала на подшипник качения.

Ключевые слова: пластичные смазочные материалы, противозносные добавки, смазывающие свойства, трение качения, графен.

Введение

Для решения одной из важнейших задач трибологии, а именно уменьшение потерь энергии на трение был разработан и применяется широкий ассортимент антифрикционных и противозносных добавок, включающий: дисульфид молибдена, наноалмазы, тальк, графит, графен, металлические порошки алюминия, меди, свинца, олова, их оксиды и соли и др. [1].

Широкое применение в качестве материала, улучшающего триботехнические характеристики серийных смазок, находит графит (одна из разновидностей углерода). Вследствие особенностей своей структуры графит позволяет снизить силу трения между деталями и повысить противозносные свойства смазок. Однако в основном в смазках используется графит грубого помола (например, графитная смазка ГОСТ 3333 – содержит до 10 % графита), который недостаточно эффективен.

Одним из перспективных направлений улучшения смазывающих свойств пластичных смазочных материалов (далее ПСМ) является применение наноразмерных добавок [3-4]. Особое внимание уделяется изучению графена в качестве

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF GRAPHENE OXIDE ADDITIVES ON THE ANTIFRICTION PROPERTIES OF LITHIUM GREASE UNDER ROLLING FRICTION CONDITIONS

Korovushkin V.V., Shilov M.A., Usoltseva N.V., Prozhhega M.V.

In this paper, the effect of rolling friction on the behavior of anti-wear additives of lithium grease is investigated. Tests of a lithium grease for wear under rolling friction conditions as part of a rolling bearing have been carried out. To assess the wear of the bearing, a technique has been developed that allows to evaluate the wear of the rings with high accuracy. The analysis of the test results of test samples of lubricants and the effect of the lubricant on the rolling bearing is given.

Keywords: grease, anti-wear additives, lubricating properties, rolling friction, graphene.

элемента смазочных материалов. Графен представляет собой монослой атомов углерода, расположенных в двумерной решетке. Его уникальные механические свойства и высокая теплопроводность открывают новые горизонты в различных областях, включая автомобилестроение и машиностроение. В условиях стремительного роста высоких технологий, исследование потенциала графена как эффективной смазки становится актуальным и приоритетным направлением в научных кругах. Снижение трения, достигаемое при наличии слоя графена, изучается различными методами как теоретически, так и практически.

Цель работы.

Целью работы является исследование антифрикционных свойств литиевых пластичных смазочных материалов, работающих в условиях трения качения, при введении добавок на основе графена. Исследование влияния графена на коэффициент трения.

Материалы и методы

Для отработки методики испытаний смазывающей способности ПСМ, заправленного испытуемыми ПСМ в ИМАШ РАН разработали

стенд для испытаний ПСМ на воздухе при комнатной температуре [2]. Внешний вид оборудования приведен на рисунке 1.



Рис. 1. Испытательное оборудование

Для исследований используется упорный подшипник качения 8104 (ГОСТ 7872), на одно из колец которого наносят фиксированное количество смазочного материала. Испытания проводили при частоте вращения подшипника 50 об/мин, силе на подшипник 2910 Н, при комнатной температуре. Режимы испытаний на воздухе приведены в табл. 1.

Табл.1. Режимы испытаний ПСМ

Параметр	Значение
Частота вращения подшипника, об/мин	50
Осевая сила на подшипник, Н	2910
Удельное давление по Герцу, ГПа	1,34
Температура окружающей среды, °С	+23
Среда	Воздух

Критерием остановки опыта было резкое повышение коэффициента трения или остановка после 240 часов работы.

Для каждого образца ПСМ провели испытания. На основе полученных результатов определяли значение коэффициента трения и относительного ресурса. Для исследований выбрано 2 образца ПСМ:

1. Базовый ПСМ (состоит из масла И-20А (86 % масс.) загущенного литиевым мылом стеариновой кислоты (14 % масс.))

2. Базовый ПСМ + оксид графена (0,5%), полученный методом эксфолиации и дополнительным окислением

Результаты и обсуждение

Испытания литиевых пластичных смазок, содержащих добавки в виде графена, проводились с целью оценки их эффективности при работе в упорных подшипниках, при нагрузке 2910 Н (давление 1,34 ГПа по Герцу) и частоте вращения 50 об/мин в режиме трения качения. Результаты испытаний продемонстрировали значительные различия в свойствах исследуемых образцов.

График коэффициента трения, представленный на рисунке 2, иллюстрирует эти различия наглядно. Он показывает, как коэффициент трения варьируется в зависимости от смазочного материала.

Табл. 2. Результаты испытаний ПСМ в условиях трения качения

Номер образца ПСМ	Коэффициент трения f
1	0,00183
2	0,00135

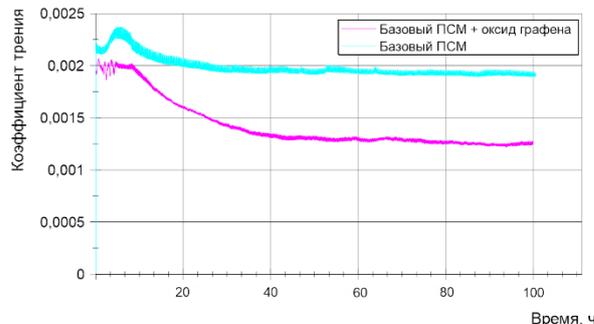


Рис. 2. Результаты испытаний образцов

В условиях трения качения внедрение графена в литиевый ПСМ приводит к снижению коэффициента трения по сравнению с базовым ПСМ.

На протяжении первого часа испытания коэффициент трения с использованием смазочного материала на основе графена демонстрирует высокие значения.

Такое поведение коэффициента трения можно объяснить процессом приработки. При этом явлении происходит адаптация поверхности, что приводит к установлению оптимальной шероховатости, которая позволяет более эффективно распределять нагрузку и уменьшать сопротивление.

Также это может быть связано с дискретным нанесением смазочного материала по поверхности контакта, на размазывание которого и получения графеновой пленки требуется время.

Заключение

Результаты испытаний показали, что добавление оксида графена к литиевой пластичной смазке снижает коэффициент трения в условиях трения качения на 26 %.

[1] Докшанин С.Г., Трошин С.И. Определение влияния концентрации добавки ультрадисперсного алмазографита на свойства пластичных смазочных материалов //Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2012. – Т. 14. – №. 1-2. – С. 547-549.

[2] 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 //Трение и износ. – 2021. – Т. 42. – №. 6. – С. 660-669.

[3] Оганесова Э.Ю., Лядов А.С., Паренаго О.П. Наноразмерные присадки к смазочным материалам (обзор) //Журнал прикладной химии. – 2018. – Т. 91. – №. 10. – С. 1371-1387.

[4] Berman D., Erdemir A., Sumant A. V. Graphene: a new emerging lubricant //Materials today. – 2014. – Т. 17. – №. 1. – С. 31-42.

ПРИНЦИП НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ В ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

¹Короткевич С.В.*, ²Буяновский И.А., ³Плескачевский Ю.М.

* korotsv@tut.by

¹РУП «Гомельэнерго», Гомель, Республика Беларусь;

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия;

³БелГУТ, Гомель, Республика Беларусь.

Кинетика движения дислокаций и формирование границ структурных элементов их эволюция и разрушение подчиняется энергетической выгоды или в более широком понимании принципу наименьшего действия. На конкретных примерах показано действие данного универсального принципа.

Ключевые слова: субмикроструктурные структуры, наноструктуры, дислокации, трибологическая система, энергетическая выгода, инварианты.

Введение

Принцип наименьшего действия определяет (ПНД) движение тела (материальной точки) в поле внешних сил по определённой траектории, где интеграл по времени от разности кинетической и потенциальной энергии принимает минимальное значение [1]. Размерность величины действия [Дж·с]. Действие есть совершённая работа во времени – это физический смысл. Существование законов сохранения, инвариантов доказывает правомерность использования ПНД.

Целью настоящей работы является осмысление использования энергетической выгоды и принципа наименьшего действия для изучения кинетики формирования, эволюции и разрушения структурных элементов поверхностного слоя металлов при локализованном внешнем воздействии трибонапряжением.

Материалы и методы

Исследовался поликристаллический никель чистотой 99,99%. Испытание на трение пары Ni – Mo проводилось на машине АЕ-5 с точной установкой площади контактирования при удельной нагрузке ≈ 84 кПа и линейной скорости $\approx 0,5$ м/с. Электронно-микроскопические исследования никеля осуществлялись на микроскопе ЭВМ-100АК и Hitachi-N800 методом тонких фольг на «просвет». Методика препарирования образцов никеля для просвечивающей электронной микроскопии, а также

PRINCEPLE OF LEAST ACTION IN TRIBOLOGICAL SYSTEMS

Korotkevich S.V., Buyanovsky I.A., Pleckachevskij Yu.M.

The kinetics of dislocation motion and the formation of boundaries of structural elements, their evolution and destruction are subject to the energy advantage or, in a broader sense, to the principle of least action. The action of this universal principle is shown on specific examples.

Keywords: submicrocrystalline structures, nanostructures, dislocations, tribological systems, energetic favorability, invariants.

полное описание материалов, методов исследований и полученных результатов с полным списком статей приведены в автореферате [2]. Исследования природы разрушения поверхности металлов при трении описаны в работах [3-5].

Результаты

Экспериментально установлена осцилляционная зависимость изменения интенсивности изнашивания (I), кривая 1, контактного сопротивления (R_c), кривая 2, и плотности дислокаций ρ , кривая 3, от времени трения t . Контактного сопротивления R_c и изнашивания (I) от времени t (рис. 1).

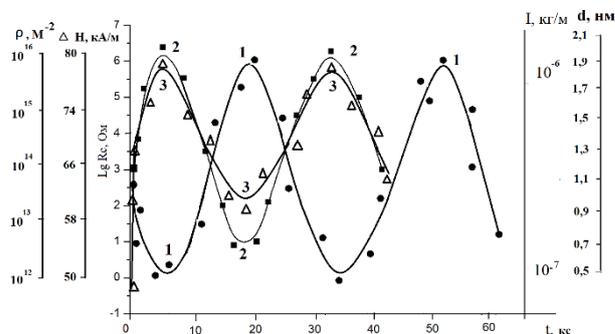


Рис. 1. Зависимость интенсивности изнашивания I (кривая 1), контактного сопротивления R_c (кривая 2) и плотности дислокаций ρ (кривая 3) от времени трибонапряжения t , где d – толщина граничного смазочного слоя

Известно, что движение дислокации будет осуществляться в наиболее плотноупакованных

направлениях кристаллической решётки металлов в соответствии с ПНД. Направление движения дислокаций с наибольшей упаковкой атомов является предпочтительным [6]. На рис. 2 стрелками показаны направления движения потоков дислокаций в глубь поверхности металла, так и наружу (рис. 2).

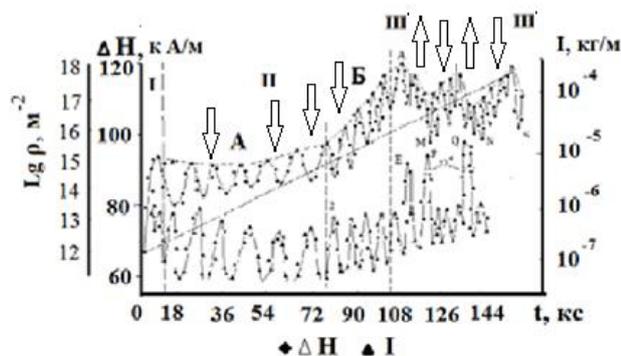


Рис. 2. Зависимость уширения линии ферромагнитного резонанса (ΔH), плотности дислокаций (ρ), интенсивности изнашивания (I) от времени (t) трибонагружения

Накопление дислокаций до некоторой критической величины определяет перекрытие их упругих полей, что обуславливает изменение направления движения потока дислокаций (область III, рис. 2, стрелки) [7].

Обсуждение

Взаимодействие потоков дислокаций и их упругих полей, кинетика формирования границ различных структурных образований осуществляется в соответствии с ПНД (рис. 3) [6].

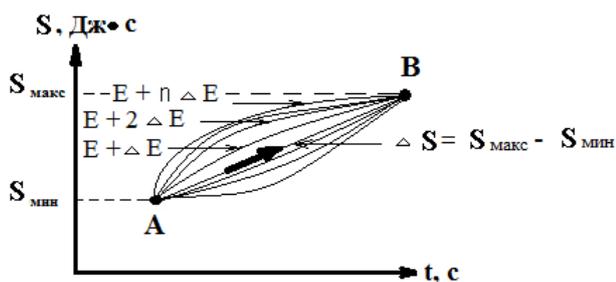


Рис. 3. Принцип наименьшего действия (ПНД): а) кинетика перехода системы из одного структурного состояния (А) в другое (В) в соответствии с ПНД, где S – действие, t – время

Известно, что сила взаимодействия между атомами трансляционного инвариантного кристалла направлена на возвращение их в узлы кристаллической решётки в ответ на внешнее воздействие. При этом потенциальная энергия системы принимает минимально возможное энергетическое состояния [8]. В ответ на внешнее воздействие силы и поля кристаллической решётки тела совершают работу, направленную против

внешнего воздействия. При этом величина данной работы в соответствии с ПНД будет минимальной и соразмерна по величине внешнему воздействию.

Расщепление дислокаций является энергетически выгодным, так как в результате этого энергия системы понижается [6], так как, например, для кубической решётки при расщеплении дислокации $a/\sqrt{2} \rightarrow a/\sqrt{6} + a/\sqrt{6}$ в соответствии с правилом Франка энергия системы оценивается в соответствии с выражением:

$$a^2/2 > a^2/6 + a^2/6 = a^2/3 \quad (1)$$

Пластическая деформация в металлах с ГЦК решёткой осуществляется за счёт перехода атомов из узлов кристаллической решётки в межузельные состояния с формированием бифуркационных состояний [9], которые являются более энергетически выгодными. Формирование атом-вакансионных состояний, двойников, полос скольжения, НК и СМК структурных состояний, границ структурных элементов и их распад, т.е. вся кинетика формирования, эволюции и разрушения является энергетически выгодным процессом, который протекает в соответствии с ПНД. Известно, что выполняется энергетический баланс [10]:

$$E_{\text{внеш}} - E_{\text{накоп}} = H + M, \quad (2)$$

где $E_{\text{внеш}}$ – энергия внешнего воздействия, $E_{\text{накоп}}$ – энергия, накопленная материалом в результате этого воздействия, H – энтропия, M – энергия, определяемая массой частиц изнашивания и продуктами разрушения.

Для области II рис. 1 равновесной деформации использование ПНД означает, что величина разницы энергий между внешним воздействием и накопленной материалом является минимальной. Величина $H+M$ при увеличении интенсивности изнашивания является минимальной, что подтверждает рис. 1. В области сильно-неравновесной деформации (область III, рис. 1) величина $H+M$ принимает как минимальные значения при наступлении селективного механизма разрушения (минимальное значение энтропии) и увеличении интенсивности изнашивания на 2–3 порядка, так и максимальные значения при упрочнении поверхности [10]. Энтропия принимает как максимальные, так и минимальные значения в области сильнонеравновесной деформации в зависимости от энергетической выгоды кинетики структурообразования [10]. В этом выражается самоорганизация сильнонеравновесной структуры. Работа во времени или поток энергии, (отклик материала или самоорганизующегося поля)

при переходе из одного состояния в другое будет принимать в соответствии с ПНД минимальное значение. Установление механизмов таких переходов и соответственно свойств является актуальной проблемой, решение которой будет способствовать управлением наступления бифуркационных состояний в соответствии с ПНД.

Заключение

Существование инвариантов в области сильнонервновесной деформации определяет использование ПНД для описания процессов самоорганизации при формировании самосогласованного поля при взаимодействии сформировавшихся структурных элементов в трибологических системах.

[1] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика в десяти томах. Т. 1 Механика. – М.: Наука, 1988. – 215 с.

[2] 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.

[3] Марченко Е.А. О природе разрушения поверхности металлов при трении – М.: Наука, 1979. – 118 с.

[4] Костецкий Б.И., Натансон М.Э., Бершадский Л.И. Механо-химические процессы при граничном трении – М.: Наука, 1972. – 170 с.

[5] Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ – М.: Машиностроение, 1977. – 525 с.

[6] Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов / Р. Хоникомб; под ред. Б.Я. Любова. – М.: Мир, 1972. – 408 с.

[7] Фридель Ж. Дислокации / Ж. Фридель; под ред. А.Л. Ройтбурда. – М.: Мир, 1967. – 643 с.

[8] Котрелл А. Теория дислокаций / А. Котрелл; под ред. А.Л. Ройтбурда. – М.: Мир, 1969. – 95 с.

[9] Панин В.Е. и др. Структурные уровни пластической деформации и разрушения / Ин-т физики прочности и материаловедения; отв. ред. В. Е. Панин. – Новосибирск: Наука: Сиб. отд-ние, 1990. – 255 с.

[10] Короткевич С.В. Принцип наименьшего действия и инварианты кинетики упрочнения и разрушения поверхностного слоя металлов / Актуальные проблемы прочности / В.А. Андреев [и др.], под. ред. В.В. Рубаника. – Мн.: Изд. «ИВЦ Минфина», 2024, 470 с.

ОЦЕНКА МИКРОТВЕРДОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ НА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ

¹Кузнецов Ю.А., ²Кравченко И.Н.*, ¹Грибакин А.А.

* kravchenko-in71@yandex.ru

¹Орловский государственный аграрный университет им. Н.В. Парахина, Орел, Россия;

²Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия.

Микродуговое оксидирование является одним из перспективных методов получения тонкослойной керамики на деталях, изготовленных из алюминиевых сплавов, позволяющих существенно повысить их долговечность. В работе дана оценка микротвердости и износостойкости тонкослойных покрытий, сформированных микродуговым оксидированием на литейных и деформируемых алюминиевых сплавах в различных типах электролитов. На основании комплекса проведенных исследований прогнозируется увеличение срока службы упрочненных деталей по сравнению с серийными.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, алюминиевый сплав, покрытие, микротвердость, износостойкость, ресурс.

Введение

Среди различных способов формирования упрочненных слоев на рабочих поверхностях деталей, изготовленных из алюминиевых сплавов, особый интерес представляет микродуговое оксидирование (МДО) [1–4].

Сущность данного метода заключается в формировании на поверхности детали под воздействием микроплазменных разрядов тонкослойного высокопрочного износостойкого керамического покрытия, состоящего преимущественно в основном из твердофазных оксидов алюминия [4–7].

К основным преимуществам МДО можно отнести [5–8]:

- возможность формирования покрытий на поверхностях сложно-профильных изделий;
- возможность получения упрочненных слоев толщиной до 0,3 мм с адгезией, сопоставимой с прочностью материала основы;
- дешевизну и доступность химических реактивов и материалов;
- экологичность процесса.

Однако, в настоящее время нет исчерпывающих сведений о влиянии внутренних и

EVALUATION OF MICROHARDNESS AND WEAR RESISTANCE OF COATINGS OBTAINED BY MICROARC OXIDATION ON ALUMINUM ALLOYS

Kuznetsov Yu.A., Kravchenko I.N., Gribakin A.A.

Microarc oxidation is one of the promising methods for producing thin-layer ceramics on parts made of aluminum alloys, which allows for a significant increase in their durability. The paper provides an assessment of the microhardness and wear resistance of thin-layer coatings formed by microarc oxidation on cast and deformable aluminum alloys in various types of electrolytes. Based on a set of conducted studies, an increase in the service life of hardened parts compared to serial ones is predicted.

Keywords: microarc oxidation, aluminum alloy, coating, microhardness, wear resistance, resource.

внешних факторов на этот процесс, не апробированы многие электролиты.

Цели и задачи исследования

Основной целью настоящей работы является количественная оценка микротвердости и износостойкости тонкослойных оксидно-керамических покрытий, полученных микродуговым оксидированием на литейных и деформируемых сплавах.

В соответствии с целью, поставлены следующие задачи исследования:

- провести сравнительные исследования анализируемых характеристик покрытий, полученных в электролитах типа «KOH-Na₂SiO₃» и «KOH-H₃BO₃»;
- спрогнозировать увеличения ресурса рабочих поверхностей деталей, изготовленных из алюминиевых сплавов, упрочненных микродуговым оксидированием.

Материалы и методы исследований

Для изготовления образцов использовали сплавы марок: АК7ч, АМг2, АД1, Д16 и бронза БрА5.

Покрытия на литейном алюминиевом сплаве АК7ч формировали в электролите типа «KOH-Na₂SiO₃» со следующей концентрацией

компонентов на литр дистиллированной воды: гидроксид калия – 2 г/л, жидкое стекло – 10 г/л.

Для формирования покрытий на деформируемых алюминиевых сплавах АК7ч, АМг2, АД1 и Д16 применяли электролит типа «KOH-H₃BO₃» с концентрацией компонентов: KOH – 5 г/л, H₃BO₃ – 20 г/л., крахмал – 10 г/л.

Продолжительность микродуговой обработки образцов составляла 100 мин.

Микротвердость покрытий измеряли на приборе ПМТ-3М. Сравнительную износостойкость поверхностей образцов исследовали в условиях граничной смазки на машине трения ИИ 5018 по схеме «колодка-ролик». Условия граничной смазки при испытаниях покрытий на сплаве АК7ч обеспечивали равномерной подачей к поверхности трения веретенного масла. Для ускорения процесса изнашивания в рабочую жидкость добавляли абразив, приготовленный из кварцевого песка с дисперсностью 3 мкм. Концентрация абразивного материала составляла 0,14% по массе масла.

В качестве рабочей среды при испытаниях покрытий, полученных на деформируемых алюминиевых сплавах, использовали трехпроцентный раствор молочной кислоты.

Значения износа колодки и ролика определяли гравиметрическим методом.

Результаты и обсуждение

В ходе исследований установлено, что среднее значение микротвердости упрочненных слоев, полученных микродуговым оксидированием на деформируемых алюминиевых сплавах, составляет 14–17 ГПа, на литейном сплаве АК7ч – 6–8 ГПа. При этом микротвердость сплавов без покрытий находится в пределах – 0,86–0,99 ГПа.

Следует отметить, что микротвердость по толщине формируемых покрытий была неоднородна (рис. 1). Максимальное значение микротвердости приходится на определенный слой покрытия, выше или ниже которого ее значения уменьшаются. Область с наивысшими значениями микротвердости находится на расстоянии 30–50 мкм от номинального размера оксидируемого образца. По всей толщине внешнего упрочненного слоя покрытия, начиная от номинального размера, наблюдается снижение микротвердости.

Высокую микротвердость тонкослойных оксидно-керамических покрытий, полученных микродуговым оксидированием и ее неоднородность по толщине упрочненного слоя, подтверждают и другие исследователи [3–7]. Это объясняется тем, что во внутреннем слое покрытия твердофазной α - фазы оксида алюминия больше,

чем во внешнем слое из-за более высокой температуры в каналах пробоя покрытия. Микротвердость покрытий также во многом зависит и от химического состава оксидируемого сплава [9].

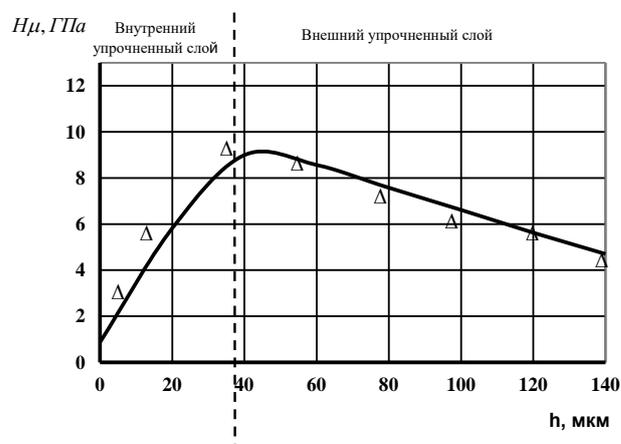


Рис. 1. Изменение микротвердости по толщине покрытия полученного в электролите типа «KOH-Na₂SiO₃» на алюминиевом сплаве АК7ч

Исследования показали, что скорость изнашивания оксидно-керамического покрытия, полученного в электролите типа «KOH-Na₂SiO₃» в 3–4 раза ниже скорости изнашивания не упрочненных алюминиевых поверхностей рис. 2.

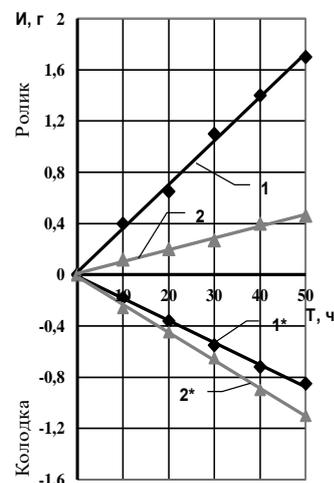


Рис. 2. Влияние продолжительности испытаний на износ пар трения: 1 – ролик из сплава АК7ч без покрытия; 2 – ролик из сплава АК7ч с покрытием; 1*, 2* – колодки (Сталь 18 ХГТ, HRC 58-62)

После испытаний рабочие поверхности образцов без покрытий были покрыты множеством глубоких продольных борозд и царапин – следов изнашивания, возникших в результате воздействия на металл абразивных частиц. Рабочие поверхности пар трения с упрочненными образцами в меньшей степени подвергались влиянию абразивных частиц.

На роликах с покрытиями фактически отсутствовали царапины и риски, что является подтверждением их высокой твердости и износостойкости. Общий вид рабочих поверхностей после испытаний на изнашивание представлен на рис. 3.

Определенный интерес представляли испытания износостойкости покрытий, полученных микродуговым оксидированием на алюминиевых деформируемых сплавах в электролите типа «KOH-H₃BO₃». В данном случае за эталон сравнения принимались образцы, изготовленные из бронзы.

Результаты исследований показали, что интенсивность изнашивания эталонной поверхности была в 2–3 раза выше, чем интенсивность изнашивания алюминиевых деформируемых сплавов, упрочненных МДО (рис. 4).

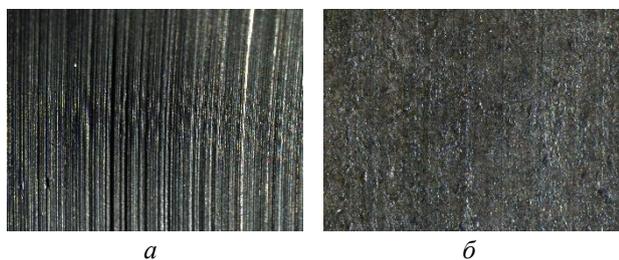


Рис. 3. Общий вид поверхностей образцов после испытаний на изнашивание:
a – образец без покрытия; *б* – образец с покрытием

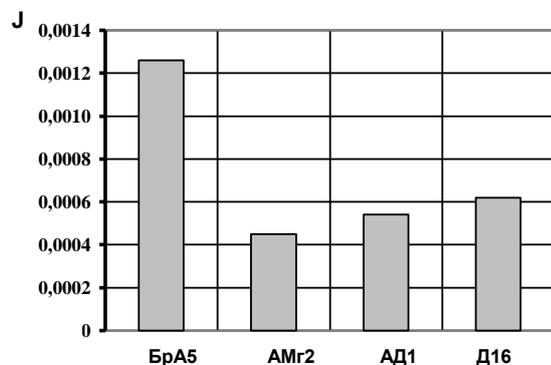


Рис. 4. Интенсивность изнашивания *J* образцов из алюминиевых сплавов с покрытиями в сравнении с BrA5

Причины высокой износостойкости полученных покрытий, следует связывать с их структурным состоянием. Очевидно, что структурные модификации оксида алюминия в покрытиях образуют между собой наиболее прочный тип межмолекулярной связи [8, 10]. При этом, формируемые покрытия характеризуются достаточно высокой твердостью. Таким образом, можно отметить, что покрытие, полученное микродуговым оксидированием, по сути, является композиционным материалом, а его износостойкость сопоставима с

износостойкостью композиционных материалов на основе карбида вольфрама, которые традиционно применяются против абразивного изнашивания.

Заключение

Проведенные исследования показали, что оксидно-керамические покрытия, полученные микродуговым оксидированием на алюминиевых сплавах, обладают высокой микротвердостью и износостойкостью. Данный способ упрочняющей обработки может быть рекомендован к внедрению на машиностроительных и ремонтно-технических предприятиях, занимающихся изготовлением, восстановлением и упрочнением деталей. Прогнозируемое увеличение ресурса рабочих поверхностей деталей, изготовленных из алюминиевых сплавов, после их микродуговой обработки составит не менее 150–200% по отношению к серийным деталям, без покрытий.

[1] 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.

[2] Зоренко Д.А. О формировании износостойких микродуговых керамических покрытий на поверхностях деталей сложной формы // Journal of Advanced Research in Technical Science. – 2020. – № 21. – С. 19–21.

[3] Рамазанова Ж.М., Замалитдинова М.Г., Киргизбаева К.Ж. и др. Исследование защитных свойств покрытий, полученных методом микродугового оксидирования в щелочных растворах электролитов // Перспективные материалы. – 2022. – № 5. – С. 58–68.

[4] Kuznetsov Y., Kravchenko I., Gerashchenkov D. et al. The Use of Cold Spraying and Micro-Arc Oxidation Techniques for the Repairing and Wear Resistance Improvement of Motor Electric Bearing Shields // Energies. – 2022. – Т. 15. – №. 3. – С. 912.

[5] Сергеев С.В., Аль-Бдейри М.Ш.Х., Дубровина Н.А. Модификация алюминиевого сплава АК12ММГН методом микродугового оксидирования с целью повышения эксплуатационных показателей // Вестник Московского авиационного института. – 2020. – Т. 27. – № 1. – С. 217–223.

[6] Shuaixing Wang, Xiaohui Liu Xiaole, Yin Nan Du. Influence of electrolyte components on the microstructure and growth mechanism of plasma electrolytic oxidation coatings on 1060 aluminum alloy // Surface and Coatings Technology. – 2020. – Т. 381. – С. 125214.

[7] Simchen F. et al. Introduction to plasma electrolytic oxidation—An overview of the process and applications // Coatings. – 2020. – Т. 10. – №. 7. – С. 628.

[8] Markov M. A. et al. Development of a method for evaluating alumina ceramic material the wear resistance // Refractories and Industrial Ceramics. – 2020. – Т. 60. – С. 614–617.

[9] Kuznetsov Yu.A., Markov M.A., Krasikov A.V. et al. Formation of wear- and corrosion-resistant ceramic coatings by combined technologies of spraying and micro-arc oxidation // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2019. – Т. 92. – №. 7. – С. 875–882.

[10] Kuznetsov Yu.A., Kravchenko I.N., Goncharenko V.V., Glinkii M.A. Machining of the ceramic oxide coating formed by plasma electrolytic oxidation // Russian metallurgy (Metally). – 2018. – Т. 2018. – №. 13. – С. 82–86.

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ УЗЛОВ ТРЕНИЯ, СОДЕРЖАЩИХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫЕ СМАЗОЧНЫЕ СРЕДЫ

^{1,2}Куксенова Л.И.*, ²Савенко В.И.

* lkukc@mail.ru

¹Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия;

²Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук, Москва, Россия.

Сформулированы представления о роли смазочной среды в создании пластифицирующего и упрочняющего трибозффекта в антифрикционных материалах. С позиций способов реализации положительного градиента механических свойств по глубине деформированного слоя, определяющего оптимальный режим работы трибопары, проанализирована связь феноменологических и микроструктурных характеристик эксплуатационных слоев сопряжения. Приведены примеры влияния эволюции структурно-механических показателей этих слоев на работоспособность трибосопряжений, функционирующих в поверхностно-активных смазочных средах.

Ключевые слова: трение, износ, микроструктура, антифрикционные материалы, поверхностно-активные среды, эффект Ребиндера.

Введение

В реальном скользящем нагруженном контакте все явления, происходящие при внешнем трении на всем цикле испытаний, связаны как с взаимодействием твердых тел между собой, так и с процессами, обусловленными влиянием смазочного материала. В этих условиях непосредственный контакт, приводящий к износу или повреждаемости трибопары, минимизируется образованием на поверхностях трения тонких слоев различного происхождения. Эти слои являются продуктами физического или химического взаимодействия компонентов смазочного материала с материалом зоны деформации несущих элементов трибосопряжений. Опыт эксплуатации реальных машин и агрегатов показывает, что в решении многоплановой проблемы работоспособности узлов трения особое место принадлежит структурно-фазовым превращениям, протекающим при деформации антифрикционного материала, что приводит к изменению его механических и, следовательно, эксплуатационных свойств. Природа смазочного действия оказывает

EVOLUTION OF STRUCTURAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF SURFACE LAYERS OF FRICTION UNITS CONTAINING SURFACE-ACTIVE LUBRICANT

Kuksenova L.I., Savenko V.I.

The concepts of the role of the environment in the creation of plasticizing and strengthening triboeffect are formulated. From the standpoint of the methods for implementing a positive gradient of mechanical properties along the depth of the deformed layer, which determines the optimal operating mode of the tribo-pair, the relationship between the phenomenological and structural characteristics of the operational layers of the conjugation is analyzed. Examples are given of the influence of the evolution of the structural and mechanical characteristics of the surface layers on the performance of the tribo-conjugation in surface-active lubricating environments.

Keywords: friction, wear, structure, metals, surface-active environments, Rebinder effect.

определяющее влияние на реализацию этих превращений, а в основе этого влияния лежит формирование износостойкой структуры в приконтактной зоне трибоматериала. Наибольший положительный триботехнический эффект имеет место при наличии в смазочных материалах поверхностно-активных веществ (ПАВ), компоненты которых в процессе контактной деформации вызывают адсорбционное пластифицирование тонкого поверхностного слоя (эффект Ребиндера) [1].

В данной работе представлены результаты исследований структурно-механических характеристик поверхностных слоев пары трения с позиций критериальных подходов, основанных на сопоставительном анализе временной эволюции макроскопического интегрального критерия (интенсивности изнашивания) и изменений микроструктурных характеристик трибоматериала (физического уширения рентгеновских линий зоны контактной деформации, периода кристаллической решетки, элементного состава поверхностного деформированного слоя трибопары) с целью

установления их совместного влияния на работоспособность узлов трения, содержащих поверхностно-активные смазочные среды.

Материалы и методы исследования

Испытывали достаточно распространенную пару реверсивного трения «медный сплав– сталь» при номинальном давлении 20 МПа и средней скорости относительного скольжения 0,1 м/с; использовали схему трения плоскость – плоскость. Интенсивность изнашивания трибообразцов оценивали по потере массы образца на фиксированном пути трения $L \approx 35$ км путем усреднения данных, полученных в результате испытаний 3 – 5 трибопар в идентичных условиях эксперимента. Испытания проводили в разных смазочных средах: в глицерине, минеральных маслах, модельных смазочных средах, в состав которых входили ПАВ. Испытывались также базовые дисперсионные синтетические среды и присадки к ним, применяемые для работы в трибосопряжениях промышленного производства в широком диапазоне температур и давлений.

Микроструктурные исследования антифрикционного материала, представлявшего собой α -твердый раствор на основе меди, проводили после трибоиспытаний с помощью рентгеноструктурного анализа. Применяли метод неразрушающего послыйного рентгеновского облучения зоны контактной деформации в диапазоне толщин 0,5 – 10 мкм в Co-K α излучении (метод скользящего пучка). Определяли физическое уширение рентгеновских линий $\beta_{(311)}$ и период a кристаллической решетки поверхностного слоя трибоматериала. Физическое уширение $\beta_{(hkl)}$ рентгеновских линий отражает влияние размера областей когерентного рассеяния – микроблоков D в кристалле, а также усредненных по микрообъему микродеформаций кристаллической решетки ($\langle \epsilon \rangle = \langle \frac{\Delta d}{d} \rangle$). Относительное изменение величины периода кристаллической решетки $\Delta a/a$, оцениваемое по смещению дифракционных пиков на рентгенограмме, определяет сумму главных напряжений (напряжений I рода). Кроме того, величина a зависит от элементного состава сплава (для твердых растворов замещения выполняется закон Вегарда: $a_{AB} = C_A a_A + (1 - C_A) a_B$, где a_{AB} , a_A и a_B – параметры кристаллических решеток раствора, растворителя и растворенного элемента, соответственно, C_A – атомная концентрация растворителя в сплаве). Изменение величины a_{AB} позволяло анализировать диффузионное перераспределение легирующих элементов в зоне механического или любого другого воздействия на сплав.

Результаты и обсуждение

Анализ изменений физического уширения $\beta_{(311)}$, периода кристаллической решетки a до и после трибоконтактного воздействия в совокупности с вариациями микротвердости образцов по толщине зоны контактной деформации для трибообразцов, испытанных в разных смазочных средах, с позиций функциональных взаимосвязей показателей $S = f(\gamma, \delta)$, $\delta = f(\beta_{(hkl)})$, $H_\mu = f(\delta)$, $H_\mu = f(\beta_{(hkl)})$ [2], характеризующих структуру и механические свойства металла, свидетельствует о том, что активная добавка в смазочной среде заметно влияет на деформационные процессы в приконтактной зоне трибоматериала и вызывает формирование в нем модифицированного эксплуатационного слоя. При этом одновременно реализуются два процесса: *первый процесс* – формирование стационарного макроскопического диффузионного потока атомов примесных элементов и их переход в смазочную среду (изменение величины a), что приводит к созданию поверхностной пленки меди, и *второй процесс* – понижение плотности неподвижных (сидячих) дислокаций в материале зоны деформации (уменьшение величины $\beta_{(hkl)}$), что указывает на эффект пластифицирования материала (снижение предела его текучести). В результате этих процессов трибоматериал, выходящий из приконтактной зоны, будет существенно отличаться от исходного по характеристикам напряженного состояния, структуры и физико-механических свойств.

В наиболее распространенных трибосопряжениях антифрикционный материал, как правило, представляет собой двойной или многокомпонентный медный сплав замещения. Рассмотрены изменения элементного состава его приповерхностного слоя при трении под действием смазочной среды. После первых циклов контактного взаимодействия и деформирования в активной смазочной среде любого модифицирующего типа в приповерхностном слое трибоматериала возникают диффузионные потоки вакансий, атомов примесных и/или легирующих элементов, наблюдается «восходящая диффузия» [3]. Показано, что только за счет восходящей диффузии может быть достигнуто пятидесятипроцентное изменение предела текучести приповерхностного трибоматериала, что для случая поверхностно-пластифицирующей среды обеспечивает условия реализации положительного градиента его механических характеристик.

Проанализированы стратиграфические и временные изменения микро- и макроскопических характеристик поверхностного слоя бронзы БрА5

после трения в среде масла М9С и в его смеси с загустителем 12-LioSt. Анализ зависимостей $\beta = f(h)$, где h – толщина анализируемого приповерхностного слоя, указывают на три основных процесса, одновременно происходящих при деформации трибоматериала. Во-первых, плотность дислокаций в микрослоях, прилегающих к свободной поверхности трибообразцов, возрастает примерно в 1,6 раза при трении в масле М9С по сравнению с исходным состоянием. Это значит, что при трибодформации образцов в инактивной смазочной среде в условиях, когда плотность подвижных дислокаций много меньше, чем сидящих, наблюдается упрочняющий эффект. Во – вторых, присутствие дисперсионной фазы 12-LioSt в смазочной системе обеспечивает систематическое понижение плотности деформационных (в основном неподвижных) приповерхностных дислокаций (примерно в 1,7 раза по сравнению с чистой дисперсионной средой и в 1,1 раза по сравнению с исходным состоянием). Таким образом, в результате воздействия загустителя смягчаются энергосиловые граничные условия в трибоконтакте, и в приповерхностном слое трибоматериала реализуется пластифицирующий эффект. В – третьих, снижение величин $\Delta\beta_{(311)}(h) = \beta_{(311)}^{M9C+LioSt}(h) - \beta_{(311)}^{M9C}(h)$ и $\Delta\beta_{(311)}(h)/\beta_{(311)}^{M9C}(h) \approx 0.1$, полученных путем сопоставления значений $\beta_{(311)}(h)$ при $h = idem$, указывает на локализацию эффекта влияния среды в слоях трибоматериала достаточно малой толщины, не превышающих 10 мкм.

Обнаружено, что в процессе временной трибодформации антифрикционного материала в масле М9С величина периода решетки сравнительно слабо осциллирует по всей глубине поверхностного деформированного слоя и в среднем составляет $\langle a_a \rangle = 0,3632$ нм, что достаточно близко к исходному стандартному значению периода решетки бронзы БрА5. Введение в смазочную систему загустителя 12-LioSt приводит к тому, что в процессе трибодформации в зоне деформации формируется нормальный к рабочей поверхности образца интенсивный диффузионный поток атомов алюминия, направленный с одной стороны к выходу из образца, а с другой - в его внутриобъемную зону. Таким образом, в

приповерхностном слое трибообразца вблизи межфазной границы «металл/смазка» создается положительный концентрационный градиент атомов алюминия и, соответственно, положительный градиент механических свойств трибоматериала в целом, являющийся предпосылкой для формирования режима повышенной износостойкости такого материала. Есть основания полагать, что процессы диффузии атомов алюминия одновременно как в смазку, так и в глубину трибоматериала обеспечивают снижение уровня упрочняющего эффекта в приповерхностном слое бронзовых образцов при их трибоиспытаниях в масле, содержащей загуститель. Однако наблюдающееся при этом увеличение концентрации атомов алюминия в относительно более глубоко залегающих подповерхностных слоях трибоматериала (наличие максимума концентрации алюминия на глубине $h \approx 5$ мкм) приводит к формированию в глубине зоны деформации сплава пластинчатых концентрационных неоднородностей с повышенным содержанием алюминия. В соответствии с лепестковой моделью механизма износа [4] это может являться причиной снижения износостойкости антифрикционного материала в целом.

Заключение

Представлены результаты экспериментально-теоретического анализа структурного состояния поверхностных слоев антифрикционных материалов - латуней и бронз, при их трении по стали в инактивной (индустриальное масло М9С) и включающей добавку поверхностно-активного загустителя (12-LioSt) смазочных средах. Сформулированы основополагающие представления о роли смазочной среды в создании в материалах узлов трения пластифицирующего и упрочняющего трибозффекта.

- [1] Шукин Е.Д., Савенко В.И., Малкин А.И. Лекции по физико-химической механике. – М.: Нобель пресс, 2015. – 680 с.
- [2] Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И. Структура и износостойкость металла. – М.: Машиностроение, 1982. – 212 с.
- [3] Kuksenova L.I., Savenko V.I. Physicochemical Tribomechanics of Antifriction Materials Operating in Heavy-Loaded Friction Pairs in Active Lubricating Media // Journal of Friction and Wear. – 2023. – Т. 44. – №. 6. – С. 333-345.
- [4] Suh N.P. An overview of the delamination theory of wear. // Wear. – 1977. – Т. 44. – №.1. – С. 1-16.

МОДЕРНИЗАЦИЯ МАШИНЫ ТРЕНИЯ СМЦ

Кулаков О.И.*, Бирюков В.П.

* kulakov@imash.ru

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия.

В данной работе описано проведение модернизации машины трения СМЦ-2 для её соответствия современным требованиям. С помощью схемы выпрямления сигнала с датчика момента трения, усилителя и АЦП сигнал с датчика передаются на компьютер для дальнейшей обработки. Проведённая модернизация позволяет отказаться от использования комплектной стойки управления и проводить измерения трибологических свойств испытуемых материалов в цифровом виде с большей точностью и удобством.

Ключевые слова: трение, машина трения, модернизация.

Введение

Машина трения СМЦ-2 предназначена для испытания материалов и изучения процессов трения и износа металлов, сплавов, жёстких конструкционных пластмасс и композитов как в условиях смазки, так и сухого трения. Машина СМЦ-2 комплектуется аналоговым устройством регистрации типа КСП-2 для записи сигналов с датчика момента трения на бумажный носитель. Устройства типа КСП не отвечают современным требованиям и не позволяют обрабатывать регистрируемые параметры в удобном виде. Замена самописцев этого типа на более современное решение является актуальной задачей.

Подходы к модернизации

Одним из вариантов модернизации устаревших машин трения типа Амслер (ИИ 5018, 2070 СМТ-1, СМЦ-2) заключается в оцифровке показаний датчика момента трения с помощью схемы на современных компонентах, при этом остальная часть электрической схемы остается практически неизменной [1].

Известен ещё один путь модернизации машины трения этого типа – полное сохранение функциональности комплектного блока управления с преобразованием измеряемых параметров во внешних блоках нормирования и АЦП [2].

Также сообщалось о способе модернизации машины трения СМЦ-2, заключающегося в сохранении штатного шкафа управления для обработки и усиления сигнала с помощью усилителя, входящего

MODERNIZATION OF SMC FRICTION TEST MACHINE

Kulakov O.I., Biryukov V.P.

This paper proposes a method for modernization of SMC-2 friction test machine to comply with current requirements. A special rectification circuit, differential amplifier and DAC are used for friction moment signal conditioning. The factory control rack is no longer used. This modernization enables the tribological properties of specimen to be measured with higher precision and convenience.

Keywords: friction, friction machine, modernization.

в комплект самописца КСП-2. Усиленный сигнал далее поступает на 14-битный АЦП [3].

В данной работе авторами предложен ещё один способ модернизации – полный отказ от комплектной приборной стойки с переносом силовой части установки и новой системы нормирования сигналов в саму машину трения, что позволило значительно сократить длину сигнальных и силовых линий и освободить пространство вокруг установки.

Силовая часть установки

Контакторная аппаратура и блок предохранителей, обеспечивающие пуск-останов двигателя, а также нулевую защиту и защиту от коротких замыканий, перенесены в станину установки. На переднюю панель установки выведена контрольная лампа наличия питания. Внутри станины установки смонтирован стабилизатор переменного напряжения, питающий обмотки индуктивного датчика момента.

Измерительная часть установки

Машина СМЦ-2 оснащена бесконтактным индуктивным датчиком момента трения. Штатная электрическая схема предусматривает вывод сигнала момента трения с узла сравнения на самописец КСП-2, при этом величина сигнала на входе самописца составляет 0-10 мВ. Заводская схема предусматривает установку нуля и регулировку диапазона измерения момента трения с помощью проволочных переменных резисторов типа ППБ. В предложенной схеме сигнал с датчика поступает напрямую на новый узел выпрямления и

сравнения, при этом обмотки датчика включены встречно. Балансировка схемы выполняется подстроечным многооборотным резистором при тарировке. На выходе схемы установлен супрессор. Также реализована искусственная средняя точка. Выпрямленный сигнал поступает на вход дифференциального усилителя ZETLAB ZET 412. Оцифровка усиленного сигнала выполняется 16-битным АЦП ZETLAB ZET 211 в дифференциальном включении. Величина сигнала на входе в АЦП составляет 0–10 В. Принципиальная схема узла выпрямления и сравнения приведена на рис. 1. Весь комплект обработки сигналов с датчика момента помещён в корпус со степенью защищённости IP 65 для защиты электроники от масла, продуктов износа и пыли. Корпус с электронными блоками закреплён на задней крышке станины установки.

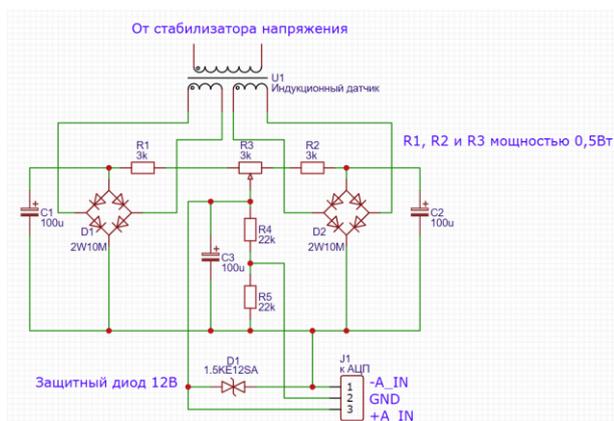


Рис. 1. Принципиальная схема платы выпрямления и сравнения

Для защиты от электромагнитных помех все сигнальные кабели между машиной трения, схемой выпрямления, усилителем и АЦП выполнены экранированными.

Для измерения пути трения вместо электромеханического счётчика типа СИ-206 используется счётчик ОВЕН СИ-8 в комплекте с индуктивным датчиком, отсчитывающим число оборотов нижнего вала машины трения.

Счётчик установлен на передней части станины. Также для удобства управления на панель выведена отдельная кнопка сброса показаний счётчика.

При необходимости возможно подключение нормирующего усилителя для термопар к одному из незадействованных каналов АЦП.

Общий вид модернизированной установки приведён на рис. 2.

Обработка данных

Комплектное программное обеспечение АЦП ZETLAB позволяет отображать сигнал с датчика в

реальном времени, оценивать его величину и изменение в течение испытания. Интерфейс программного обеспечения показан на рис. 3.



Рис. 2. Модернизированная машина трения СМЦ

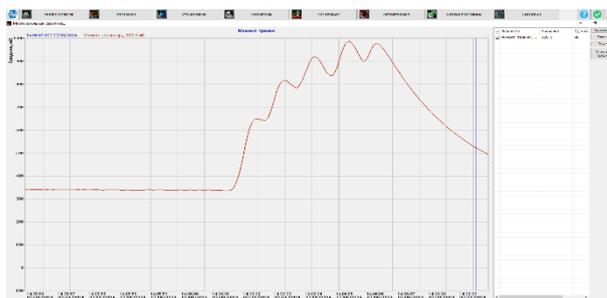


Рис.3. Интерфейс ПО ZETLAB с графиком момента трения

Средняя погрешность измерения момента трения в диапазоне 0-15 Нм при тарировке составила 0,94%.

При необходимости все данные эксперимента сохраняются в табличный файл для дальнейшей обработки.

Выводы

Проведённая модернизация повышает эффективность использования машины трения СМЦ-2 обеспечивает большую точность и скорость измерения трибологических свойств, позволяет заметно упростить обработку результатов эксперимента.

[1] Даровской Г.В., Буракова М.А., Поляков В.Н., Кротов В.Н. Исследование фрикционных свойств высокотяговых масел. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2017. – 88 с.

[2] Кулаков О.И., Албагачиев А.Ю. Модернизация машины трения ИИ 5018 // Научные труды VI Международной научной конференции "Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении", Москва, 26–27 ноября 2019 года. – М: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, 2019. – С. 244-245.

[3] Федосов А.В., Иванов О.А., Галышев А.А., Безпальчук С.Н. Модернизация испытательного оборудования для проведения трибологических испытаний пар трения применяемых в судостроении // Повышение износостойкости и долговечности машин и механизмов на водном транспорте: труды V Международного симпозиума по транспортной триботехнике «Транстрибо-2013», Санкт-Петербург, 10–11 октября 2013 года. – Санкт-Петербург: ФГБОУ ВО ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова, 2013. – С. 116-139.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КРИВОЙ ГИЛЬБЕРТА НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОЛИЛАКТИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

Кулаков О.И.*, Иванов Г.Ю., Фролов А.Д.

* kulakov@imash.ru

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия.

В данной работе исследуется влияние применения кривой Гильберта к процессу 3D-печати на износостойкость получаемых изделий. Кривая Гильберта, представляющая собой фрактальную геометрическую структуру, была использована в качестве стратегии заполнения при аддитивном производстве. Показано, что при сохранении износостойкости, использование кривой Гильберта позволяет значительно сократить расход материала.

Ключевые слова: 3D-печать, кривая Гильберта, износостойкость, стратегия заполнения, долговечность, фрактальная структура.

Введение

Кривая Гильберта – это фрактальная заполняющая пространство кривая, предложенная немецким математиком Давидом Гильбертом в 1891 году. Кривая Гильберта используется для отображения одномерного интервала на двумерное пространство, так что результатом является кривая, которая проходит через каждую точку сетки в двумерном пространстве.

Кривая Гильберта является фракталом, что означает, что она имеет самоподобную структуру на разных масштабах. Это означает, что каждая ее часть может быть масштабирована и повернута, чтобы она напоминала всю кривую. Она заполняет пространство, что означает, что с увеличением числа итераций кривая покрывает все больше точек в двумерном пространстве. Кривая строится рекурсивно, начиная с простейшей фигуры, которая с каждой итерацией усложняется, пока не станет очень сложной и заполнит все доступное пространство.

Построение кривой Гильберта начинается с простейшего случая — квадрата, который соединяется в один непрерывный путь. На каждой следующей итерации каждый квадрат заменяется на четыре меньших квадрата, и путь через них проводится так, чтобы он был непрерывным и пересекал каждую точку.

THE EVALUATION OF HILBERT CURVE INFLUENCE ON WEAR RESISTANCE OF POLYLACTIDE MATERIALS FOR 3D PRINTING

Kulakov O.I., Ivanov G.Yu., Frolov A.D.

This paper presents the evaluation of influence of the Hilbert curve on 3D printing process on the wear resistance of the resulting products. The Gilbert curve, which is a fractal geometric figure, has been used as a measure of reinforcement in additive manufacturing. It has been shown that while maintaining durability, the use of Gilbert curve can significantly reduce material consumption.

Keywords: 3D printing, Gilbert curve, wear resistance, infill pattern, fractal structure.

В 3D-печати кривая Гильберта используется как один из методов заполнения, создавая внутреннюю структуру объекта. В исследовании Янга и др. (2003) [1] были рассмотрены методы реализации траекторий движения инструмента, а также проведен анализ механических свойств деталей, напечатанных с линейными и фрактальными траекториями. Их результаты показали значительное улучшение физических характеристик у деталей, изготовленных с фрактальными траекториями, по сравнению с линейными. Джейн и др. (2009) [2] изучали влияние времени задержки на прочность образцов, напечатанных с различными временными интервалами, и выяснили, что этот параметр оказывает существенное влияние на прочность изделий. В более позднем исследовании Кумара и др. (2015) [3] было установлено, что образцы, созданные с использованием траектории, основанной на кривой Гильберта, требуют больше времени на заполнение по сравнению с растровыми траекториями. Это объяснялось наличием множества коротких сегментов линий, характерных для кривой Гильберта, что приводит к более частым ускорениям и замедлениям сопла в процессе печати. Исследователи пришли к выводу, что большое количество сегментов линий существенно увеличивает время заполнения из-за постоянных изменений скорости движения инструмента.

Заполнение оказывает влияние на прочность, устойчивость и расход материала при 3D-печати. Благодаря достижениям в аддитивных технологиях, современные 3D-принтеры могут эффективно использовать кривую Гильберта, устраняя негативные последствия времени задержки, которые влияют на свойства полимеров. Такая структура не только увеличивает жесткость деталей, но и обеспечивает изотропные свойства, что подтверждается механическим анализом методом конечных элементов (FEA), как указано в работе Папахаралампопулоса и др. (2018) [4]. Кривая Гильберта, являясь фракталом, обеспечивает равномерное распределение материала, способствуя однородности прочности и стабильности конструкции.

Поскольку кривая Гильберта имеет непрерывный путь, она минимизирует количество перемещений печатающей головки, что может сократить время печати и уменьшить износ оборудования.

Заполнение на основе кривой Гильберта сохраняет близость между соседними участками, что полезно для поддержания целостности структуры при печати сложных форм.

В данной работе изучается влияние заполнения кривой Гильберта на износостойкость изделий, изготовленных методом 3D-печати с целью определения, как использование такой кривой влияет на износостойкость напечатанных изделий.

Материалы и оборудование

Для испытаний были напечатаны образцы с плоской рабочей поверхностью из материала eSun PLA+ на 3D принтере Anycubic Kobra 2 Pro при 100% заполнении.

Испытания проводились на горизонтальной возвратно-поступательной машине трения ПРУ с цифровой регистрацией силы трения и температуры подвижного образца (рис. 1). Для обеспечения максимального сопряжения поверхностей трения подвижный образец устанавливался в тензометрический держатель под углом 90° к поверхности отшлифованного неподвижного образца, изготовленного фрезерованием из Стали 40. Площадь рабочей поверхности подвижного образца составляла $2,25 \text{ см}^2$.

Испытания проводились в режиме сухого трения в следующем режиме при температуре окружающего воздуха 19°C :

- амплитуда движения подвижного образца: 80 мм;
- число циклов в минуту: 50;
- общее число циклов: 10000;
- скорость движения подвижного образца: 13,3 см/с;
- нагрузка на подвижный образец: $7,18 \text{ кгс/см}^2$.



Рис. 1. Машина трения ПРУ

Результаты и обсуждение

До и после проведения испытаний в вышеуказанном режиме были проведены измерения массы напечатанных образцов с помощью аналитических весов. Результаты измерения массового износа образцов приведены в таблице 1

Табл. 1. Массовый износ образцов (кривая Гильберта)

Образец	m0, мг	m1, мг	Износ, мг
1	1697,40	1675,50	21,90
2	1680,60	1654,85	25,75
3	1693,70	1670,25	23,45
Средний износ			23,70

Также были проведены испытания образцов, напечатанных с заполнением прямыми линиями ($0^\circ - 90^\circ$) и под углами ($45^\circ - 45^\circ$). Результаты измерения массового износа этих образцов приведены в таблицах 2, 3.

Табл. 2. Массовый износ образцов (прямые линии)

Образец	m0, мг	m1, мг	Износ, мг
1	1804,70	1776,75	27,95
2	1719,65	1701,00	18,65
3	1730,10	1707,60	22,50
4	1727,80	1702,25	25,55
5	1745,00	1722,50	22,50
6	1725,75	1707,05	18,70
Средний износ			22,64

Табл. 3. Массовый износ образцов (линии под углом)

Образец	m0, мг	m1, мг	Износ, мг
1	1725,00	1689,55	35,45
2	1730,60	1702,75	27,85
3	1717,15	1678,80	38,35
Средний износ			33,88

Измерения показали, что износ образцов, изготовленных с использованием метода заполнения кривой Гильберта, сопоставим с показателями износа, наблюдаемыми при применении других методов полного заполнения, таких как заполнение прямыми линиями или под углом 45 градусов. Однако существенным преимуществом метода кривой Гильберта является более экономное использование материала при производстве образцов. Этот фактор делает кривую Гильберта не только эффективной в плане скорости изготовления, но и ресурсосберегающей стратегией заполнения в аддитивном производстве, что может быть особенно важно для промышленных применений, где оптимизация затрат играет ключевую роль.

Одним из возможных объяснений полученных результатов является наличие небольших пустот между слоями при использовании метода заполнения кривой Гильберта (рис. 2). Эти пустоты могут позволять материалу слегка смещаться под действием внешних нагрузок, что способствует равномерному распределению напряжений и снижению концентрации локальных деформаций. Вследствие этого эффекта процесс изнашивания может происходить медленнее, что положительно сказывается на общей износостойкости изделий. Такая способность структуры адаптироваться к нагрузкам может быть фактором, объясняющим улучшенные показатели износа при использовании данной стратегии заполнения.

Выводы

Исследование показало, что метод заполнения кривой Гильберта в 3D-печати обеспечивает сопоставимые результаты по износостойкости с традиционными методами полного заполнения. Однако использование кривой Гильберта позволяет значительно сократить расход материала, что делает этот метод более экономически эффективным. Эти результаты подчеркивают перспективность применения кривой Гильберта для оптимизации эксплуатационных характеристик и снижения затрат в аддитивном производстве.

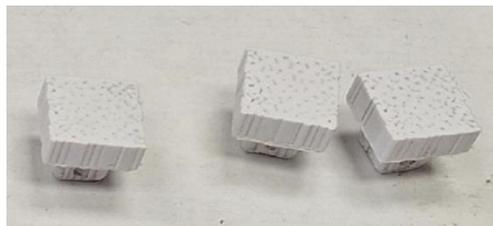


Рис. 2. Пустоты в образцах, полученных методом заполнения кривой Гильберта

Благодарности

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

- [1] Yang J. et al. Fractal scanning path generation and control system for selective laser sintering (SLS) //International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2003. – Т. 43. – №. 3. – С. 293-300.
- [2] Taufik M., Jain P.K. Role of build orientation in layered manufacturing: a review //International Journal of Manufacturing Technology and Management. – 2013. – Т. 27. – №. 1-3. – С. 47-73.
- [3] Kumar N. et al. Effect of fractal curve based toolpath on part strength in fused deposition modelling //International Journal of Rapid Manufacturing. – 2015. – Т. 5. – №. 2. – С. 186-198.
- [4] Papacharalampopoulos A., Bikas H., Stavropoulos P. Path planning for the infill of 3D printed parts utilizing Hilbert curves //Procedia Manufacturing. – 2018. – Т. 21. – С. 757-764.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ НЕРАВНОМЕРНО УПРОЧНЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ СМАЗКИ В ЗАЗОРЕ

Любичева А.Н.*, Мезрин А.М.

* lyubicheva@mail.ru

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

Рассмотрено изнашивание неоднородно упрочненной поверхности, при скольжении вдоль нее деформируемого тела с учетом влияния смазочного слоя. Предложено сравнение экспериментальных данных с аналитической моделью. В качестве неоднородного материала выбрана локально упрочненная сталь с периодической структурой, созданной при помощи лазера. Экспериментально показано, что смазочный слой вместе с абразивом и частицами износа влияет на формирование рельефа поверхности упрочненного тела при изнашивании. Влияние вязкости смазочного материала на форму изношенного профиля поверхности исследовано аналитически, показано качественное согласование с результатами экспериментов.

Ключевые слова: рельеф, износ, локальное лазерное упрочнение, смазка.

Введение

Для снижения трения и повышения износостойкости сопряжения используют различные технологии обработки, формирующие геометрию поверхности на разных масштабных уровнях. В условиях фрикционного взаимодействия со смазкой развитая текстура увеличивает маслоемкость поверхности; во впадинах могут концентрироваться частицы износа или абразива, не участвуя, таким образом, в подвижном контакте.

Вопросам взаимного влияния текстуры и свойств смазочного слоя посвящены работы [1-3]. В [1] исследовано влияние формы углублений, а также их плотности и распределения на трибологические характеристики. В [2-3] проведено экспериментальное исследование влияния текстуры поверхности, созданной лазером на трибологические характеристики контакта. Исследования [2] проведены на стальных образцах и во время тестов измеряется толщина пленки смазки. Показано, что наличие углублений в виде ямок способствовали снижению трения по сравнению с гладкими образцами, тогда как протяженные канавки оказывали менее благоприятное или негативное воздействие на снижение трения.

WEAR MODELING OF AN UNEVENLY HARDENED SURFACE TAKING INTO ACCOUNT THE EFFECT OF LUBRICATION IN THE GAP

Lyubicheva A.N., Mezrin A.M.

Wear of an uneven hardened surface is considered, in sliding contact with deformable body, taking into account the influence of a lubricating layer. A comparison of experimental data with an analytical model is proposed. Locally hardened steel with a periodic structure created by a laser is selected as a uneven material. It is experimentally shown that the lubricating layer together with the abrasive and wear particles affects the formation of the surface relief of the hardened body during wear. The influence of the viscosity of the lubricant on the shape of the worn surface profile is studied analytically, and qualitative agreement with the experimental results is shown.

Keywords: relief, wear, local laser hardening, lubrication.

В настоящей работе на основе модельного эксперимента по изнашиванию стальных образцов, подвергнутых локальному лазерному упрочнению, а также на основе моделирования изучается эффект влияния вязкого слоя на геометрию рельефа, образующегося в процессе изнашивания.

Материалы и методы

В качестве материала для исследований выбрана незакалённая сталь ШХ-15. Отшлифованная и отполированная поверхность диска диаметром 58 мм и толщиной 10 мм была подвергнута зональному лазерному упрочнению, упрочненные зоны в виде двенадцати радиальных отрезков шириной около 4 мм, расположены под углом 30° друг к другу. Локальная твердость определялась в точках окружности, захватывающей упрочненные (HV 900-1000) и неупрочненные (HV 450-500) зоны, вблизи границ закалённой области локализована зона отпуска с пониженной твердостью.

Эксперименты выполнены на трибометре UMT-2 (CETR, США) по схеме «кольцо-диск» с вращением пары трения в ванне, заполненной вязкой средой, контрообразец выполнен из уплотнительной резины. В качестве смазочной

среды использованы промышленные масла на основе полиметилсилоксана кинематической вязкостью 1000 сСт (ПМС-1000) и 200 сСт (ПМС-200). Для форсирования износа в масло добавлен порошок диоксида титана, массовая пропорция масла и порошка составила 3:1. Ванна снабжена лопастями для перемешивания абразива в масле. Для тестов выбраны следующие параметры: нагрузка на образец $P = 200$ Н, линейная скорость скольжения $V = 0,5$ м/с время испытания $t = 180$ мин. Проводились измерения температуры промежуточного слоя с помощью термопары.

Результаты экспериментов

Рельеф поверхности неоднородно упрочненного диска после изнашивания в вязкой среде имеет несимметричную форму (рис. 1). Перепад высоты профиля от впадины к выступу после испытаний в густом масле (1,6 мкм) меньше, чем после испытаний в жидком масле (2,5 мкм).

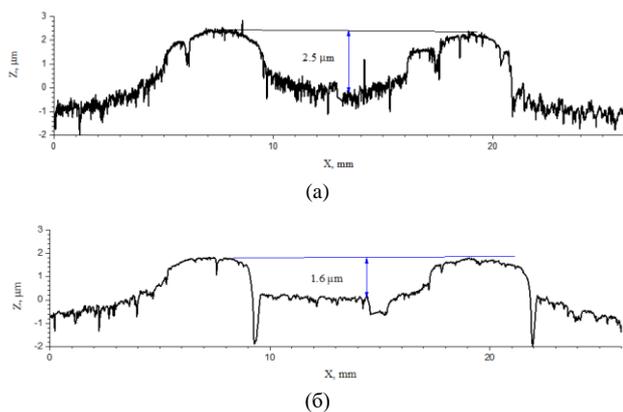


Рис. 1. Профиль поверхности образца по дуге вдоль траектории движения контртела с лазерным упрочнением после испытания в масле вязкостью 200 сСт (а) и 1000 сСт (б). Движение контртела слева направо

Можно предположить, что более вязкая среда образует более толстый промежуточный слой, а концентрация абразивных частиц, воздействующих на поверхность, больше для менее вязкой среды. Асимметрия профиля ожидаемо больше для среды с большей вязкостью. Менее очевидна причина более интенсивного износа в зонах отпуска при большей вязкости масла. Вероятно, чем более жидкой является среда, тем подвижнее в ней частицы абразива. Они могут, покидая среду, заполнять естественные карманы, образующиеся при износе зоны отпуска. Концентрация неподвижных частиц в этих зонах снижает интенсивность износа.

Измерения также показывают, что эволюция шероховатости поверхности зависит от вязкости среды.

Постановка задачи и метод решения

Рассмотрим задачу об изнашивании неоднородного тела, которое взаимодействует с вязким слоем на упругом основании. Свойства основания описываются модулем Юнга E , коэффициентом Пуассона ν , $C = 2(1-\nu^2)/\pi E$. Для периодических протяженных зон упрочнения будем искать решение в условиях плоской деформации для полуплоскости на периоде l , состоящем из одной упрочненной (a) и одной неупрочненной ($l-a$) зон, нормальная удельная нагрузка равна P/l . Поверхности неоднородно упрочненного полупространства и слоя скользят относительно друг друга с постоянной скоростью V в горизонтальном направлении.

Принимается во внимание изнашивание только жесткого полупространства, износ контртела не учитывается. Предполагается, что слой, состоящий из смазки и абразива, неотделим от упругого основания (выполняются условия полного сцепления). Неоднородность материала учитывается как зависимость коэффициента интенсивности изнашивания от координаты $K_w(x)$.

Система уравнений для решения износоконтактной задачи состоит из условия контакта, уравнения износа, соотношений, связывающих перемещение слоя и поверхности упругого полупространства с контактным давлением $p(x, t)$, а также условием равновесия. Эти выражения были приведены в работах, где рассматривались близкие задачи об износе неоднородно-упрочненного тела упругим и вязкоупругим полупространством [4, 5] в отсутствие промежуточного слоя. Решения задач получены в условиях установившегося режима изнашивания, при котором сближение тел во времени постоянно $D(t) = D_\infty = const$. Ранее показано, что для такого режима изнашивания контактное давление стремится к постоянному распределению [4].

Для описания деформации слоя используем одномерную модель материала, а именно стандартное вязкоупругое тело.

Нормальные перемещения на поверхности слоя $u_z^{(l)}(x, t)$ и контактное давление $p(x, t)$ связаны соотношением:

$$u_z^{(l)}(x, t) + T_\varepsilon \frac{\partial u_z^{(l)}(x, t)}{\partial t} = \kappa(p(x, t) + T_\sigma \frac{\partial p(x, t)}{\partial t}), \quad (1)$$

где T_σ и T_ε – времена релаксации и запаздывания ($T_\varepsilon > T_\sigma$); κ – податливость слоя.

Решение получено методом, изложенным в [4,5] с использованием перехода в подвижную систему координат, связанную с контртелом.

Переходя к анализу результатов моделирования, отметим, что он затруднен выбором параметров для расчета. При изменении вязкостных свойств промежуточного слоя изменяются сразу три характеристики модели слоя: отношение времени релаксации к времени запаздывания – γ , податливость слоя – κ , отношение времени прохождения периода к времени запаздывания – λ . Меняются коэффициенты закона изнашивания, определяющие параметр m . В связи с перечисленными выше обстоятельствами, в исследовании представлено качественное сравнение экспериментальных и аналитических результатов.

На рис. 2 представлена установившаяся форма изношенной поверхности в безразмерном виде. Сплошной линией, которая симметрична относительно вершин выступа и впадины, на рисунке показано решение для упругого полупространства. Впадины изношенной поверхности при наличии слоя имеют несимметричную форму, более выраженную для слоя с большей вязкостью. Этот результат хорошо коррелирует с экспериментом (рис. 1). Фактор вязкоупругого слоя является более существенным для относительно широкой упрочненной зоны.

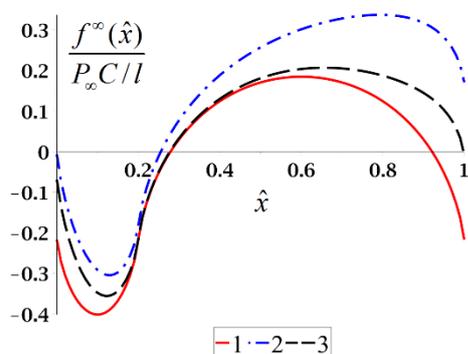


Рис. 2. Форма изношенной поверхности при $m = 0,4$, $\hat{a} = 0,2$;
1 – отсутствие слоя; 2 – более вязкий ($\kappa/C = 0,1$, $g = 0,1$, $\lambda = 3$);
3 – менее вязкий ($\kappa/C = 0,005$, $g = 0,2$, $\lambda = 6$)

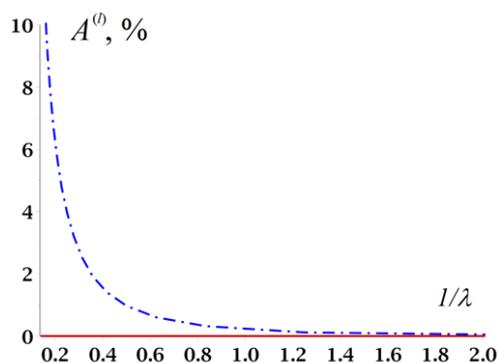


Рис. 3. Амплитуда волнистости A^0 [%] при $\kappa/C = 0,1$, $\gamma = 0,1$
как функция параметра $1/\lambda$, $m = 0,4$

На рис. 3 приведена зависимость амплитуды от безразмерной скорости (величина, обратная λ). Амплитуда максимальна при малых скоростях, рост скорости приводит к уменьшению амплитуды и выходу на асимптоту, соответствующую решению задачи без слоя.

Заключение

Разработана методика модельного эксперимента по изучению влияния вязкости промежуточного слоя на изнашивание локально упрочненного твердого тела. Получено, что свойства смазочного слоя оказывают влияние на формирование рельефа неоднородно упрочненной стали: волнистость профиля поверхности приобретает ассиметричную форму, более пологую со стороны набегания контробразца на упрочненную область. Ассиметрия является более выраженной для более вязкой смазки. Шероховатость поверхности после изнашивания для менее вязкого слоя развита сильнее, однако, сразу за зоной упрочнения возникают щелевые впадины, которые по глубине меньше для жидкого масла, чем для вязкого.

Предложена постановка задачи моделирования изнашивания локально-упрочненной поверхности при наличии вязкоупругого промежуточного слоя. Получено аналитическое решение для описания формы поверхности в установившемся режиме изнашивания. Фактор вязкости проявляется в ассиметрии профиля впадин и выступов, что качественно совпадает с результатами экспериментов. Амплитуда волнистости и маслосъемность поверхности зависят от свойств промежуточного слоя, причем это влияние более существенно при относительно низких скоростях скольжения.

Благодарности

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации 124012500437-9)

- [1] Galda L., Pawlus P., Sep J. Dimples shape and distribution effect on characteristics of Stribeck curve // Tribology International. – 2009. – Т. 42. – С. 1505-1512.
- [2] Boidi G. et al. Fast laser surface texturing of spherical samples to improve the frictional performance of elasto-hydrodynamic lubricated contacts // Friction. – 2021. – Т. 9. – С. 1227–1241.
- [3] Gaikwad A. et al. Tribological properties of Ti6Al4V titanium textured surfaces created by laser: effect of dimple density // Lubricants. – 2022. – Т. 10. – С. 138.
- [4] Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия – М.: Наука, 2001. – 478 с.
- [5] Lyubicheva A. Wear of composite materials in full contact with a viscoelastic body. The steady-state solution // Advanced Problem in Mechanics II. APM 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – Cham:Springer, – 2022.

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ РЕЗЬБЫ ЛЕГКОСПЛАВНЫХ НКТ

Малышев В.Н., Почес Н.С.*

* poch.es.n@gubkin.ru

ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина», Москва, Россия.

Основным ограничением применения легкосплавных насосно-компрессорных труб (ЛНКТ) является низкая износостойкость резьбы. Для решения данной задачи в работе рассмотрена технология формирования керамо-полимерного МДО-покрытия для повышения стойкости резьбы ЛНКТ, а также возможность применения данного покрытия совместно с экологически-безопасными смазочными материалами

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, керамо-полимерные покрытия, легкосплавные насосно-компрессорные трубы

Введение

Применение легкосплавных насосно-компрессорных труб (ЛНКТ) из алюминиевых сплавов при добыче нефти и газа является перспективным решением по ряду причин. Во-первых, благодаря высокой коррозионной стойкости ЛНКТ, возможно их применение при эксплуатации скважин с содержанием сероводорода и углекислого газа. Во-вторых, легкосплавные насосно-компрессорные трубы позволяют снизить вес лифтовых колонн, что снижает затраты на проведение периодических подземных ремонтов скважин, что имеет особое значение для скважин глубиной свыше 4000 м [1].

Однако существенным недостатком ЛНКТ является низкая износостойкость резьбового соединения, что требует применения технологических методов упрочнения, наиболее перспективным из которых является метод микродугового оксидирования (МДО). МДО представляет собой электрохимический процесс обработки металлов и сплавов вентильной группы (преимущественно алюминия) с широким набором функциональных свойств (износостойкость, коррозионная стойкость и теплостойкость и пр.) [2]. Также ранее проведенные исследования показывают, что МДО-покрытия, сформированные на алюминиевых сплавах способны выдерживать удельную нагрузку до 260 МПа [3].

Поскольку сборка резьбовых соединений НКТ проводится с использованием высоких значений крутящего момента до 7 кН·м [4], вследствие чего зачастую происходит выдавливание смазки из зоны

INCREASING THE THREAD DURABILITY OF LIGHT ALLOY TUBING PIPE

Malyshev V.N., Poches N.S.

The main limitation of the use of light alloy tubing is the durability of the thread. To solve the problem posed in the work, the technology of ceramic-polymer molding of MAO coatings to increase the cutting resistance of light alloy tubing was considered, as well as the possibility of using these coatings in conjunction with environmentally friendly lubricants

Keywords: micro-arc oxidation, ceramic-polymer coatings, light-alloy tubing.

трения. В связи с этим особый интерес представляет формирование МДО-покрытий с участием частиц фторопласта, выполняющего роль твердой смазки.

Исследование работоспособности резьбового соединения легкосплавных НКТ упрочненного методом МДО невозможно без учета вклада в процесс свинчивания-развинчивания смазочного материала. Применяемые в настоящее время для сборки НКТ резьбовые смазочные материалы имеют минеральную основу. Период биологического разложения таких смазок значителен и создает высокую экологическую нагрузку [5].

Целью работы являлось повышение стойкости резьбы легкосплавных насосно-компрессорных труб применением керамо-полимерных покрытий, сформированных методом микродугового оксидирования, и экологически безопасных смазочных материалов.

Материалы и методы

Для проведения испытаний формировали МДО-покрытия на двух алюминиевых сплавах Д16 и В95. Были сформированы два типа покрытий с использованием электролитов, представленных в табл. 1, для сравнительной оценки триботехнических характеристик. После формирования покрытий производился замер толщины и металлографический анализ керамо-полимерных покрытий.

Табл. 1. Тип покрытия и состав используемых электролитов

Тип покрытия	Состав электролита
Традиционное МДО-покрытие	2 г/л КОН + 6 г/л Na ₂ SiO ₃ + 2 г/л NaAlO ₂
Керамо-полимерное МДО-покрытие	2 г/л КОН + 6 г/л Na ₆ P ₆ O ₁₈ + 10 мл/л суспензии Ф4Д + 10 мл/л ПС-1

Сравнительная оценка триботехнических характеристик традиционных и керамо-полимерных МДО-покрытий проводилась на машине трения МТ-393 по схеме трения «кольцо-кольцо» с использованием следующих параметров испытаний: нагрузка – 700 Н; скорость вращения верхнего кольца – 750 об/мин; время испытания – 60 мин.

Верхнее кольцо изготавливалось с размерами Ø28x18x6 мм из алюминиевых сплавов, выбранных для исследования. Нижнее кольцо имело размеры Ø35x22x2,5 мм для стали ШХ15 и Ø35x22x8 мм для алюминиевых сплавов. В качестве смазочного материала использовались масла на основе полиальфаолефина (ПАО), диизотридецил адипата (ДИТА) и полиэтиленгликоля (ПЭГ).

Оценка возможности применения экологически безопасных смазочных материалов в резьбовых соединениях НКТ осуществлялась в два этапа.

На первом этапе были выполнены лабораторные испытания образцов с использованием схемы и оборудования по ГОСТ ISO 13678-2022 для определения возможности применения экологических смазочных материалов для резьбовых соединений ЛНКТ. Образец для испытаний представлял собой резьбовую пару и был выполнен из алюминиевого сплава Д16 со сформированным на них керамо-полимерным покрытием. При испытании резьбовой пары скорость завинчивания составляла 1 об/мин, предельный угол поворота 30°. После испытаний сопрягаемые поверхности образцов проверялись на наличие признаков задира.

На втором этапе исследований были выполнены стендовые испытания полноразмерных резьбовых соединений НКТ с экологическими смазочными материалами и сравнения их с традиционно применяемой эталонной резьбовой смазкой «РУСМА-1» (по ТУ 0254-001-46977243-2002). При проведении стендовых испытаний на свинчивание-развинчивание использовались резьбовые соединения патрубков М73хН73-К с применением рассматриваемых в работе экологически безопасных смазочных материалов. Момент свинчивания патрубков составил 1100 Нм. При этом момент развинчивания не должен был превышать момент свинчивания более чем на 30%, а на резьбовой части патрубка не должно быть истирания или задиры резьбы и уплотнений.

Результаты и обсуждение

Толщина сформированных керамо-полимерных покрытий составила 90-100 мкм. Металлографический анализ показал, что частицы фторопласта распределены по толщине покрытия

равномерно, не скапливаясь на поверхности (Рис. 1). При этом участки с частицами фторопласта в общей толщине покрытия, составили около 34 %, а их средний размер составил порядка 36 мкм



Рис. 1. Образцы для испытаний с использованием схемы и оборудования по ГОСТ ISO 13678-2022

Результаты испытаний по схеме «кольцо-кольцо» пар трения «МДО-покрытие – сталь ШХ15» представлены в табл. 2.

Табл. 2. Результаты испытаний по схеме «кольцо-кольцо» пар трения «МДО-покрытие – сталь ШХ15»

Масло	Коэффициент трения	Массовый износ, мг
Пара трения МДО-покрытие – ШХ15 (сплав Д16)		
ДИТА	0,036	1,30
ПАО	0,097	1,12
ПЭГ	0,195	2,30
Пара трения МДО-покрытие – ШХ15 (сплав В95)		
ДИТА	0,169	1,80
ПАО	0,098	0,83
ПЭГ	0,071	0,40
Пара трения керамо-полимерное покрытие – ШХ15 (сплав Д16)		
ДИТА	0,132	0,99
ПАО	0,119	0,58
ПЭГ	0,091	1,24
Пара трения керамо-полимерное покрытие – ШХ15 (сплав В95)		
ДИТА	0,052	1,22
ПАО	0,124	0,36
ПЭГ	0,111	1,18

Анализ полученных данных показал, что керамо-полимерные покрытия по сравнению с традиционными МДО-покрытиями имеют средние значения коэффициента трения для сплава Д16 ниже на 47 % в масле ПЭГ и для сплава В95 в масле ДИТА на 31 %. При этом керамо-полимерные покрытия показали лучшую износостойкость. Наименьший износ был получен при испытании керамо-полимерных покрытий на сплаве В95 в масле ПАО – 57%. В остальных случаях снижение износа керамо-полимерных покрытий относительно традиционных МДО-покрытий составило от 31 до 48%.

Результаты испытаний МДО-покрытий по одноименной поверхности (табл. 3) показали, что значения коэффициента трения керамо-полимерных

покрытий на 16-47 % ниже по сравнению с традиционными. Значение износа керамо-полимерных покрытий в целом находится на уровне традиционных МДО-покрытий. При трении в масле ПЭГ износ керамо-полимерного покрытия, сформированного на сплаве Д16 ниже на 46% для нижнего кольца и 37 % для верхнего кольца.

Табл. 3. Результаты стендовых испытаний резьбовых соединений патрубков.

Масло	Коэффициент трения	Массовый износ, мг	
		Верхнее кольцо	Нижнее кольцо
Пара трения МДО-покрытие – МДО-покрытие (сплав Д16)			
ДИТА	0,155	0,45	1,10
ПАО	0,211	15,10	99,50
ПЭГ	0,226	1,48	2,76
Пара трения МДО-покрытие – МДО-покрытие (сплав В95)			
ДИТА	0,169	1,12	2,34
ПАО	0,242	11,63	6,29
ПЭГ	0,159	0,65	1,17
Пара трения керамо-полимерное покрытие – керамо-полимерное покрытие (сплав Д16)			
ДИТА	0,128	2,88	3,59
ПАО	0,149	0,56	1,94
ПЭГ	0,120	0,93	1,48
Пара трения керамо-полимерное покрытие – керамо-полимерное покрытие (сплав В95)			
ДИТА	0,147	2,08	7,23
ПАО	0,142	1,84	2,39
ПЭГ	0,133	3,58	7,55

На рис. 2 представлены результаты стендовых испытаний по ГОСТ ISO 13678-2022.

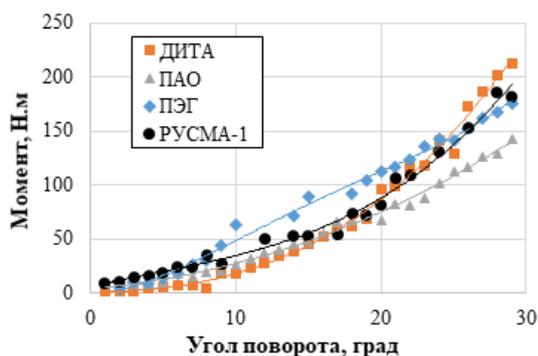


Рис. 2. Диаграмма закручивания образцов с использованием схемы и оборудования по ГОСТ ISO 13678-2022.

Полученные результаты показали, что при одном и том же угле затяжки, требуемый момент закручивания при использовании масла на основе ПАО ниже на 20% по сравнению с РУСМА-1. Осмотр образцов после развинчивания показал отсутствие каких-либо задиров и разрушения покрытия.

Полученные при испытаниях данные показали (табл. 4), что экологически безопасные смазочные материалы обеспечивают большие углы закручивания резьбы НКТ при затягивании и находятся в пределах 68-77°, что указывает на их более высокие триботехнические характеристики.

Табл. 4. Результаты стендовых испытаний резьбовых соединений патрубков.

Смазка	Момент закручивания, М _з	Момент развинчивания, М _{св}	Различие угла закручивания, град.
Русма-1	1100	1320	0*
ДИТА	1100	1386	77
ПАО	1100	1425	77
ПЭГ	1100	1060	68

*Примечание. сравнение угла закручивания производится с углом затяжки эталонного состава, поэтому угол закручивания резьбы с эталонной смазкой принимаем за 0.

Заключение

Результаты проведенных исследований показывают, что керамо-полимерные покрытия, сформированные методом микродугового оксидирования, в совокупности с применением экологически безопасных смазочных материалов могут найти применение в резьбовых соединениях легкосплавных насосно-компрессорных труб из алюминиевых сплавов. При этом существенно повысится стойкость резьбовых соединений ЛНКТ.

- [1] Ивановский В.Н., Дарищев В.И., Каштанов В.С. и др. Нефтегазопромысловое оборудование: учебник для подготовки дипломированных специалистов по специальности 090600 "Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений" нефтегазовых вузов. – Москва: ЦентрЛитНефтеГаз, 2006. – 719 с.
- [2] Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В. и др. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов / Под общей ред. И.В. Суминова. В 2-х томах. Т.2. М.: Техносфера. – 2011. – 512 с.
- [3] Malyshev V. N., Poches N. S., Dörr N. Tribological tests of micro-arc oxidation coatings in environmentally safe lubricants // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 862. – С. 022066. DOI: 10.1088/1757-899X/862/2/022066.
- [4] ГОСТ 633–80. Трубы насосно-компрессорные и муфты к ним. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1997. – 43 с.
- [5] Евдокимов А.Ю., Фукс И.Р., Облащикова И.Г. Экологические аспекты химмотологии смазочных материалов. – М.: ГУП Издательство "Нефть и газ" РГУ нефти и газа им. Губкина, 2001. – 198 с.

ИСПЫТАНИЯ ДИТИОФOSFATНЫХ ПРИСАДОК ТЕМПЕРАТУРНЫМ МЕТОДОМ В УСЛОВИЯХ ГРАНИЧНОЙ СМАЗКИ

Масько С.В.*, Самусенко В.Д.

* 19982703@list.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук, Москва, Россия.

В статье приведены результаты испытаний температурным методом дитиофосфатных присадок разных металлов, используемых при производстве смазочных материалов в России. В процессе испытаний измерялся коэффициент трения в зависимости от температуры, также после испытаний оценивался износ образцов по диаметру пятен износа. Полученные зависимости коэффициента трения от температуры имеют сложный характер изменения, что говорит о происходящих химических и трибохимических процессах.

Ключевые слова: масла, присадки, дитиофосфаты, трение, износ, температурный метод, граничная смазка.

Одним из наиболее эффективных способов обеспечения долговечности подвижных узлов различных машин и механизмов является использование смазочных материалов. Смазка обеспечивает снижение трения и износа, путём добавления различных присадок в смазочный материал можно дополнительно улучшить его эксплуатационные свойства [1]. Одним из наиболее распространенных типов присадок для смазочных материалов, используемых в современном машиностроении, являются дитиофосфаты цинка [2]. Дитиофосфаты являются важными компонентами в составе различных смазочных материалов [3]. Они активно используются в моторных маслах, где они выполняют функцию противоизносных и антиокислительных присадок [1].

Наибольшее распространение при производстве смазочных материалов в мировой практике получили дитиофосфаты цинка, однако активно ведутся исследования по изучению дитиофосфатов и других металлов [4]. Исследования, направленные на изучение свойств масел с дитиофосфатными присадками, являются актуальными в связи с растущими требованиями к эффективности и долговечности современных машин и механизмов. В условиях постоянного повышения эксплуатационных нагрузок,

TESTING OF DITHIOPHOSPHATE ADDITIVES BY METHOD OF TEMPERATURE STABILITY UNDER BOUNDARY LUBRICATION

Masko S.V., Samusenko V.D.

The article presents the results of temperature tests of dithiophosphate additives of different metals used in the production of lubricants in Russia. During the tests, the friction coefficient was measured depending on the temperature, and after the test, the wear of the samples was measured by the diameter of the wear scar. The obtained dependences of the friction coefficient on temperature have a complex nature of changes, which indicates that chemical and tribochemical processes are taking place.

Keywords: oils, additives, dithiophosphates, friction, wear, temperature stability, boundary lubrication.

ужесточения экологических стандартов и стремления к снижению энергопотребления, разработка и совершенствование смазочных материалов становятся критически важными задачами. Достижение этих целей невозможно без глубокого понимания механизма действия присадок и их взаимодействия между собой.

Таким образом, исследование трибологических свойств и механизма действия дитиофосфатных присадок различных металлов актуально не только с научной точки зрения, но и с практической, поскольку полученные результаты могут быть применены для улучшения эксплуатационных характеристик смазочных материалов применяемых в широком спектре машин и механизмов.

Материалы и методы

В качестве базового масла использовали SN-150 (СТО 00149765-003-2010) – продукт переработки нефтяного сырья посредством атмосферной и вакуумной перегонки, гидроочистки, депарафинизации селективными растворителями, деасфальтизации пропаном и селективной очистки (физико-химические свойства приведены в табл. 1). Оно используется в качестве сырья для производства товарных смазочных масел.

Табл. 1. Физико-химические свойства базового масла

Показатель	Значение
Вязкость кинематическая, при 40 °С, мм ² /с, в пределах	29-35
Плотность при 20 °С, кг/м ³ , не более	890
Температура застывания, °С, не выше	-15
Температура вспышки в открытом тигле, °С, не ниже	200
Кислотное число, мг КОН/г, не более	0,03
Цвет на колориметре ЦНТ, единиц, не более	2,0

Присадки добавлялись в базовое масло в концентрации 1% мас. В работе исследовались такие дитиофосфатные присадки российского производства, как:

1. Модифицированный бором диалкилдитиофосфат цинка А-22;
2. Безольная дитиофосфатная присадка АДТФ;
3. Диалкилфенилдитиофосфат цинка ВНИИ-НП 354;
4. Диалкилдитиофосфат цинка ДФ-11;
5. Диалкилдитиофосфат молибдена ПАФ-4.

Для трибологической оценки приготовленных образцов смазочных материалов использовался температурный метод оценки смазочной способности по ГОСТ 23.221-84 на четырёх-шариковой машине КТ-2, в которой реализована низкая скорость относительного перемещения трущихся тел (0,24 мм/с), что практически устраняет фрикционный нагрев, а температура в узле трения задаётся от внешнего источника тепла. Исследование проводили в диапазоне температур 30-300 °С. Температура узла трения ступенчато повышалась со скоростью ~4 °С в минуту. Коэффициент трения оценивался в течение 60 с через каждые 10 °С. Осевая нагрузка на узел трения составляла ~110 Н (то есть, контактная нагрузка на один шар была равна 44,2 Н, а давление в контакте верхнего и каждого из нижних шариков (по Герцу) составляет примерно 2 ГПа). Частота вращения шпинделя установки составляла 1 мин⁻¹. Для испытаний использовали стандартные подшипниковые шарики из стали ШХ15 диаметром 7,94 мм. В качестве регистрируемых параметров выступали температура смазочного материала и значение момента трения, на основе которого определяли коэффициент трения. После испытаний измерялся диаметр пятен износа и делались фотографии.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены результаты трибологических испытаний в виде зависимостей коэффициента трения от температуры по средним значениям трёх испытаний. Из полученных данных нельзя сделать однозначных выводов об эффективности испытанных присадок и механизме их действия. Смазочные композиции показали в

чём-то схожую динамику изменения коэффициента трения при повышении температуры, однако имеют сильную разницу по минимальным и максимальным значениям.

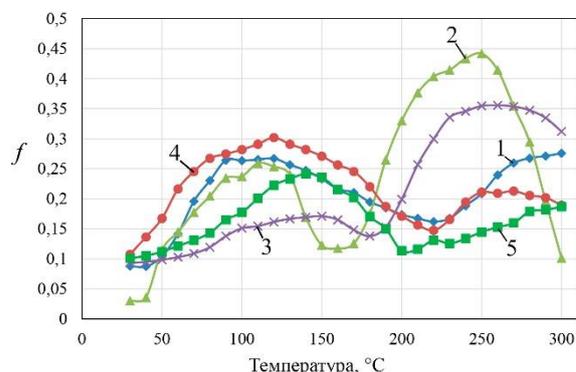


Рис. 1. Результаты испытаний дитиофосфатных присадок температурным методом: 1 – SN-150+1%А-22; 2 – SN-150+1%АДТФ; 3 – SN-150+1%ВНИИ-НП 354; 4 – SN-150+1%ДФ-11; 5 – SN-150+1%ПАФ-4

Безольная дитиофосфатная присадка АДТФ (кривая 2 на рис. 1) выделяется среди испытанных присадок, тем что показывает как самый низкий коэффициент трения при температуре 30-40 °С, так и самые высокие значения коэффициента трения в диапазоне температур 200-270 °С, после чего коэффициент трения резко снижается до 0,1 при максимальной температуре 300 °С.

Масло с диалкилфенилдитиофосфатом цинка ВНИИ-НП 354 (кривая 3 на рис. 1) показало наиболее низкий и стабильный коэффициент трения до температуры 190 °С, после этой температуры коэффициент трения начал резко увеличиваться.

Масло с диалкилдитиофосфатом молибдена ПАФ-4 (кривая 5 на рис. 1) показало наименьший коэффициент трения при высоких температурах 190-300 °С.

На рис. 2 приведены средние значения диаметров пятен износа после испытаний масел с присадками до 300 °С. Самый низкий износ показало масло с присадками ВНИИ-НП 354 и ДФ-11, износ при испытании присадки АДТФ немного выше.

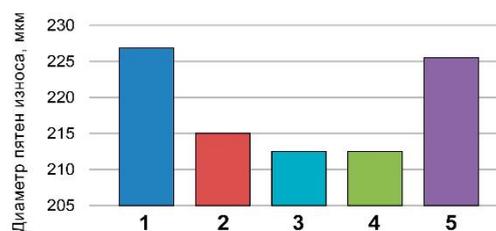


Рис. 2. Средние размеры пятен износа после испытания образцов: 1 – SN-150+1%А-22; 2 – SN-150+1%АДТФ; 3 – SN-150+1%ВНИИ-НП 354; 4 – SN-150+1%ДФ-11; 5 – SN-150+1%ПАФ-4

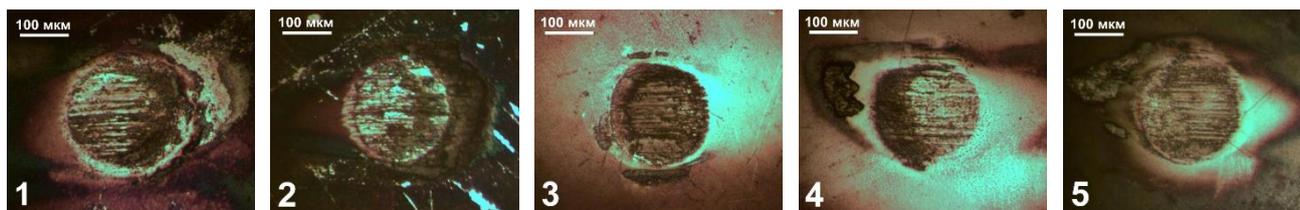


Рис. 3. Фотографии пятен износа после испытания образцов масел: 1 – SN-150+1%А-22; 2 – SN-150+1%АДФ; 3 – SN-150+1%ВНИИ-НП 354; 4 – SN-150+1%ДФ-11; 5 – SN-150+1%ПАФ-4

Заключение

Изменение коэффициента трения в зависимости от температуры при испытаниях исследуемых присадок носит неоднозначный и сложный характер. Стоит отметить, что присадки, по всей видимости, имеют различные температуры при которых происходит их разложение и взаимодействие с поверхностями трения. Таким образом при подборе присадок следует учитывать предполагаемые температурные режимы в узлах трения, для выбора оптимальных присадок с трибологической точки зрения.

В дальнейшем необходимо подробное исследование поверхностей трения, такими методами как электронная микроскопия для изучения образующихся слоёв, что может помочь в объяснении механизма действия дитиофосфатных присадок различных металлов.

[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] Bovington C.H. Friction, wear and the role of additives in controlling them // Chemistry and technology of lubricants. – 2010. – С. 77-105.

[4] Roache D.C., Devlin M., Li X. Mechanical properties of tribofilms formed by metal dithiodiphosphates //Tribology International. – 2024. – Т. 197. – С. 109794.

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА РЕЖУЩЕМ ИНСТРУМЕНТЕ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО ТЕКСТУРИРОВАНИЯ

Мигранов М.Ш.*, Гусев А.С., Оплеснин С.С., Тюрина Ю.А.

* migmars@mail.ru

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия.

В работе для повышения производительности фрезерования хромоникелевых сплавов рекомендуется осуществление лазерного текстурирования инновационных высокоэнтропийных покрытий на концевых фрезах при различных режимах нанесения и архитектуре. По результатам экспериментальных исследований установлено улучшение триботехнических свойств, в частности повышение износостойких свойств режущей кромки и снижения адгезионного взаимодействия за счет формирования при высоких температурах вторичных структур с повышенной износостойкостью и снижения температурно-силового нагружения контактных процессов. Экспериментальные испытания осуществлялись последовательными этапами: определялись наиболее эффективные марки многослойных наноструктурированных высокоэнтропийных покрытий с последующим лазерным текстурированием рабочей поверхности фрезы на двух типах лазерной установке «SharpMark™» и «Fiber»; проводились трибологические исследования на высоко-температурных трибометре и адгезиометре с последующими износостойкостными испытаниями и исследованием температуры и составляющих усилия резания при фрезерной обработке хромоникелевых сплавов при различных режимах резания

Ключевые слова: лазерное текстурирование; трибологические эксперименты; изнашивание концевых фрез; температурные и силовые зависимости.

Введение

Для дальнейшего развития машиностроительного производства в современных условиях применение инновационных процессов лезвийной обработки высокопрочных и жаропрочных обрабатываемых материалов, применяемых в деталях узлов (работающих в условиях повышенной температуры, силовых нагрузок, агрессивных сред), требует ужесточения технологических режимов работы металлорежущего инструмента. В таких условиях обрабатывающий инструмент должен обеспечивать выполнение жестких требований, в частности: повышенная

TRIBOTECHNICAL TESTS OF WEAR RESISTANT COATINGS ON CUTTING TOOLS AFTER LASER TREATMENT

Migranov M.Sh., Gusev A.S., Oplesnin S.S., Tyurina Yu.

In this work, the implementation of laser texturing of innovative high-entropy coatings on end milling cutters at different modes and architecture is recommended to increase the productivity of milling of chromium-nickel alloys. According to the results of experimental studies it was established the improvement of tribotechnical properties, in particular, the increase of wear-resistant properties of the cutting edge and reduction of adhesive interaction due to the formation at high temperatures of secondary structures with increased wear resistance and reduction of temperature-force loading of contact processes. Experimental tests were carried out in successive stages: the most effective grades of multilayer nanostructured high-entropy coatings were determined with the subsequent laser texturing of the milling cutter working surface on two types of laser equipment "SharpMark™" and "Fiber"; tribological studies were carried out on high-temperature tribometer and adhesionometer with the subsequent wear-resistance tests and investigation of temperature and components of cutting force during milling of chromium-nickel alloys at different temperatures.

Keywords: laser texturing; tribological experiments; end milling cutters wear; temperature and force dependence.

износостойкость на всех режимах обработки; высокая прочность при высоком давлении и повышенных температурах на режущем клине; а также экономичное и технологическое производство. Известно [1–3], что вопросы повышения эффективности обработки резанием при наличии современного высокопроизводительного металлорежущего оборудования, оснащенного дорогостоящими системами мехатронного, адаптивного и числового программного управления, с обязательным обеспечением качественных показателей обрабатываемой поверхности, в значительной степени зависят от эксплуатационных

свойств металлообрабатывающего инструмента, такие как износостойкость, термостойкость и трещиностойкость, устойчивость к ударным и вибрационным нагрузкам. В то же время работоспособность металлорежущего инструмента и его эффективность в условиях современного машиностроительного производства является актуальной и острой проблемой. При этом изучены и известны разные подходы по решению данной проблемы [3], основным и эффективным параметром эксплуатации металлорежущего инструмента является наличие комплекса исходных высоких прочностных свойств с обеспечением оптимальной обработки при условии уменьшения интенсивности изнашивания.

В настоящее время существуют различные способы повышения износостойкости режущего инструмента, и наиболее эффективным и наименее затратным является применение инновационных наноструктурированных многослойных композиционных высокоэнтропийных покрытий с последующей комбинированной обработкой поверхности с использованием различных электрофизических воздействий, в частности путем модификации поверхности лазерным излучением режущего клина инструмента. Исходя из вышеизложенного, целью данной работы является разработка инновационных наноструктурированных многослойных высокоэнтропийных покрытий на твердосплавных концевых фрезах для обработки труднообрабатываемых авиационных сплавов и исследование их эксплуатационных свойств, а также дальнейшее повышение износостойкости режущего инструмента за счет модификации его поверхности лазерной обработкой.

Теоретические и экспериментальные предпосылки

При резании металлов изменяется пространственная форма контактирующих поверхностей из-за износа материала инструмента. Такое явление место даже в случае лезвийной обработки резанием с постоянными элементами режима с использованием высокоэффективных смазочно-охлаждающих технологических средств и современных износостойких покрытий приводит к повышенным температурно – силовым нагрузкам и напряженно – деформированному состоянию контактной зоне режущей части инструмента с последующим значительным снижением его триботехнических характеристик. Известно [1], что контактное взаимодействие и изнашивание, повышенный градиент температурно – силовой нагруженности режущего клина инструмента

являются естественным и обязательным процессами, что их необходимо изучать и рассматривать в процессе разработки методов интенсификации процесса резания лезвия, в частности при разработке и нанесении износостойких покрытий. При этом в отмеченных работах практически отсутствуют данные, обосновывающие практическую и эффективность применения дополнительной лазерной обработки поверхности инновационных многослойных наноструктурированных износостойких покрытий на режущем клине твердосплавного инструмента с целью улучшения триботехнических характеристик при лезвийной обработке резанием хромоникелевых сплавов, за счет:

- получение наноструктурированных многослойных высокоэнтропийных покрытий с дополнительным слоем диборида титана на твердосплавных резцах;

- формирование такой текстуры на поверхности фрезы с износостойким покрытием методом лазерной обработки, что позволило бы, во-первых, улучшить адгезию между покрытием и подложкой инструментального материала; во-вторых, снизить температуру и силовую нагрузку контактного взаимодействия; в-третьих, способствовать образованию прочных аморфоподобных твердых и смазывающих образований на контактной поверхности при воздействии высоких температур и больших нагрузок.

Материалы, оборудование и технология экспериментальных исследований

В работе для дальнейшего повышения износостойкости концевых фрез с износостойкими покрытиями режущие кромки фрезы были обработаны многофункциональным лазерным комплексом «SharpMark™ Fiber» при различных значениях мощности и схемах упрочняющей обработки.

Экспериментальные исследования проводились при фрезеровании жаропрочного сплава ЭИ – 437БУВД твердосплавными четырехперьевыми концевыми фрезами диаметром 12 на твердосплавном инструменте BK10 OM с различными покрытиями и схемами лазерной обработки и с разными параметрами, в частности: обработка вдоль режущей кромки с шагом между лазерными линиями $b = 100, 125, 150$ мкм, а также при ширине $h = 30, 40, 50$ мкм; с разным направлением относительно режущей кромки (рис.1).

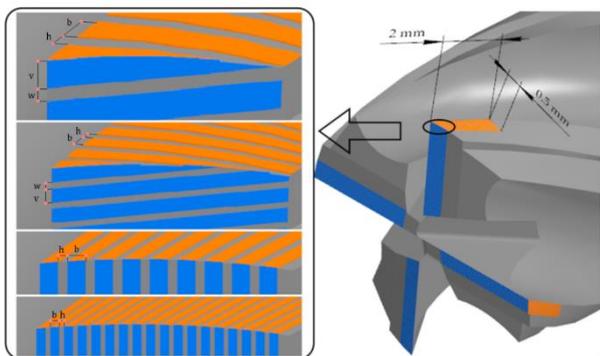


Рис. 1. Схемы лазерного текстурирования $h = 20\text{--}50$ мкм, $b = 80\text{--}200$ мкм («оранжевый» и «синий» цвета — это соответственно тыльная поверхность радиальной и торцевой режущих кромок)

По аналогичной технологии лазерной обработке подвергались твердсплавные инденторы (рис. 2) из аналогичного твердсплавного материала для последующих триботехнических испытаний на трибометре «Nanovea TRB» и адгезионной установке.

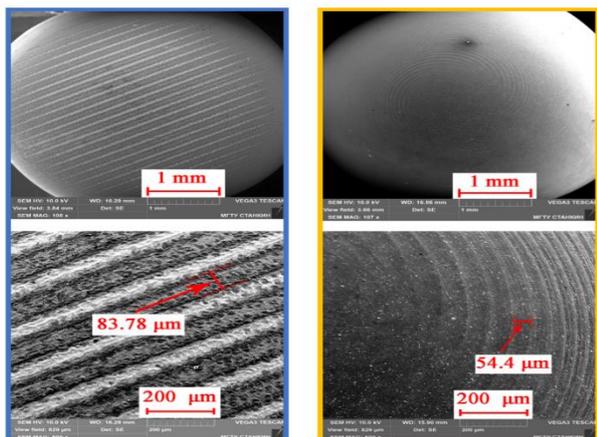


Рис. 2. Твердсплавные инденторы после лазерного текстурирования

Результаты экспериментов и их обсуждение

По результатам экспериментальных исследований установлено, что:

- наименьший коэффициент трения при испытаниях, как на высокотемпературном трибометре «Nanovea TRB» и адгезионной установке соответствует для пары «ЭИ 437БУ–ВД – ВК10 ОМ» при нанесении высокоэнтропийного износостойкого покрытия « $\text{Al}_{20}\text{-Ti}_{20}\text{-Zr}_{15}\text{-V}_{15}\text{-Cr}_{15}\text{-Nb}_{15}$ » по сравнению с покрытиями: « $\text{Al}_{20}\text{-Ti}_{20}\text{-Zr}_{15}\text{-V}_{15}\text{-Cr}_{15}\text{-Nb}_{15}$ »; « $\text{Al}_{20}\text{-Hf}_{15}\text{-Mo}_{15}\text{-Co}_{15}\text{-Ta}_{10}\text{-W}_{10}\text{-Zr}_{15}$ »; « $\text{Al}_{20}\text{-Hf}_{15}\text{-V}_{15}\text{-Cr}_{15}\text{-Ti}_{15}\text{-Ta}_{10}\text{-W}_{10}$ »; « $\text{Al}_{20}\text{-Hf}_{10}\text{-Ni}_{15}\text{-Ti}_{25}\text{-W}_{10}\text{-Zr}_{20}$ »; « $\text{Mo}_{20}\text{-Nb}_{20}\text{-Ni}_{20}\text{-Ta}_{20}\text{-W}_{20}$; $\text{Nb}\text{-Hf}_{20}\text{-Ti}_{20}\text{-Zr}_{20}\text{-Ta}_{20}$ » и др.);

- наибольший период стойкости инструмента при фрезеровании обеспечивают высокоэнтропийные износостойкие покрытия: « $\text{Al}_{20}\text{-Ti}_{20}\text{-Zr}_{15}\text{-V}_{15}\text{-Cr}_{15}\text{-Nb}_{15}$ » и « $\text{Al}_{20}\text{-Ti}_{20}\text{-Zr}_{15}\text{-V}_{15}\text{-Cr}_{15}\text{-Nb}_{15}$ » по сравнению с другими соответственно на 18 и 15%.

Заключение

Улучшение триботехнических характеристик и повышение износостойкости фрез обеспечивается хорошей адгезией инструментального материала и износостойкого покрытия, снижением адгезионной составляющей коэффициента трения; обеспечения благоприятного температурно-силового режима при резании.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект No 22-19-00670)

[1] Верещака А.А., Григорьев С.Н., Табаков В.П. Многослойные наноструктурированные износостойкие покрытия для металлорежущего инструмента. – М: «Инфра - Инженерия», 2024. – 344с.

[2] Бэлла О.М. Повышение эффективности механической обработки деталей из высокопрочных материалов путем применения фрез с переменными схемами резания // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2018 – Т. 22. – № 5. – С. 10–27.

[3] Режущий инструмент из инновационных керамических материалов: изготовление и применение / М.А. Волосова, В.А. Гречишников, П.М. Пивкин [и др.]. – Москва: Московский государственный технологический университет "СТАНКИН", 2020. – 104 с.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

¹Мигранов М.Ш.*, ¹Кочетов А.С., ²Мигранова А.У., ¹Оплеснин И.С.

* migmars@mail.ru

¹Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия;

²Московский городской открытый колледж, Москва, Россия.

В работе представлены результаты экспериментальных испытаний инновационных многослойных наноструктурированных высокоэнтропийных износостойких покрытий на твердосплавном инструменте BK10 OM при скоростном фрезеровании жаропрочных хромоникелевых сплавов - ХН35ВТЮ и ХН77ТЮРУ – ВД. Полученные экспериментальные данные позволили установить и подтвердить эффективность использования инновационных многослойных наноструктурированных высокоэнтропийных износостойких покрытий на режущем инструменте в широком диапазоне изменения элементов режима лезвийной обработки резанием. При этом из сравнительного анализа следует, что инструмент с покрытием на основе композиций ($Al_{20}-Ti_{20}-Zr_{15}-V_{15}-Cr_{15}-Nb_{15}$) может обеспечить улучшение износостойкости на 20 - 25% по сравнению с такими покрытиями, как $nACo_3+TiB_2$ и $nACRo+TiB_2$ при высоких показателях качества обработанной поверхности.

Ключевые слова: высокоэнтропийные износостойкие покрытия; концевые фрезы, жаропрочные хромоникелевые сплавы.

Введение

В современном машиностроительном и авиастроительном производствах для комплексного решения вопросов повышения экономической эффективности лезвийной обработки резанием жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов, а также титановых сплавов все большее применение находят разрабатываемые и применяемые инновационные наноструктурированные многослойные износостойкие комплексы на металлорежущих инструментах. Известно [1,2], что применение металлорежущих инструментов с инновационными износостойкими покрытиями обеспечивает: существенного повышения его стойких характеристик при высоких показателях по надежности и точности поверхностей изделий и производительности процесса лезвийной обработки резанием; сокращения расхода используемых остро-

EFFICIENCY OF MULTILAYER NANOSTRUCTURED HIGH-ENTROPY WEAR- RESISTANT COATINGS

Migranov M.Sh., Kochetov A.S., Migranova A.U.,
Oplesnina I.S.

The paper presents the results of experimental tests of innovative multilayer nanostructured high entropy wear-resistant coatings on carbide tool BK10 OM at high-speed milling of heat-resistant chromium-nickel alloys - ХН35ВТЮ and ХН77ТЮРУ - ВД. The obtained experimental data allowed to establish and confirm the effectiveness of the use of innovative multilayer nanostructured high-entropy wear-resistant coatings on the cutting tool in a wide range of changes in the elements of the mode elements of blade machining by cutting. It follows from the comparative analysis that a tool with a coating based on compositions ($Al_{20}-Ti_{20}-Zr_{15}-V_{15}-Cr_{15}-Nb_{15}$) can provide a 20-25% improvement in wear resistance compared to such coatings as $nACo_3+TiB_2$ and $nACRo+TiB_2$ with high quality indicators of the machined surface.

Keywords: high-entropy wear-resistant coatings; end mills, heat-resistant chromium-nickel.

дефицитных и дорогостоящих компонентов из вольфрамово - молибденово – танталовой – кобальтовой группы; значительного расширения эффективной области использования самих инструментов из быстрорежущей стали и твердого сплава с улучшением основных показателей качества и точности обрабатываемых поверхностей изготавливаемых деталей; высокоскоростную обработку жаропрочных и жаростойких сталей и сплавов с высокой степенью легирования; возможность улучшения режущей способности обрабатываемого инструмента при значительно низком его легировании дорогостоящими элементами. В промышленности, в настоящее время существенно выросло производство режущего инструмента с износостойкими покрытиями. При этом их эксплуатационная эффективность значительно низка, по сравнению с ведущими зарубежными фирмами, работающими в этом

направлении и это связано в большей степени отсутствием научно обоснованных как режимов нанесения покрытий, так производственных рекомендаций по их использованию. Не менее важным остается вопрос по подбору инструмента с учетом состава и параметра покрытия, а также в зависимости от обрабатываемого материала изготавливаемых деталей [3-6].

Исходя из вышеизложенного, целью работы является разработка инновационных высокопроизводительных износостойких покрытий и оценка их триботехнических параметров при фрезерной обработке жаропрочных сталей сплавов, применяемых в авиа- ракето-двигателестроении.

Материалы и методика экспериментальных исследований

Для определения эффективной марки износостойкого покрытия на металлорежущем твердосплавном инструменте группы ВК, используемых на фрезерной операции при обработке труднообрабатываемых материалов: ХН35ВТЮ и ХН77ТЮРУ – ВД в широком диапазоне изменения элементов режима резания по результатам износостойкостных и температурно – силовых испытаний, проведенных в лабораториях искрового плазменного спекания ЦНМиТ ГИЦ при МГТУ «Станкин». В основе исследования влияния физико – механических свойств на изменение закономерностей износа фрез лежали износостойкостные испытания. В качестве показателя, характеризующего изношенность инструмента, использовался износ зуба фрезы по задней поверхности. Испытывались концевые четырехперьевые твердосплавные фрезы диаметром 12 мм. Исследования проводились в условиях получистового и чистового фрезерования на вертикально-фрезерном станке модели «Knuth WF 4.1» с измерением величины износа с помощью инструментального микроскопа МИР-2М с насадкой МОВ-15 точностью отсчета до 0,002 мм. Износ фрезы измерялся после каждой остановки процесса резания, которая производилась через каждые 50...250 метров пути резания. На кривой износа фрезы до ее затупления обеспечивалось не менее 5 точек.

Результаты и их обсуждение

Нанесение износостойких покрытий способствует изменению контактных процессов на рабочих поверхностях инструмента. Исследования, проведенные для изучения влияния покрытий на износостойкость инструмента в виде длины пути резания до критической величины износа (таблица 1) показали, что нанесение покрытий неоднозначно

влияет на динамику износа режущих инструментов. Согласно [2], если титано – алюминийево - хромо - кремниевые покрытия приводят к существенному уменьшению значений h_{zn} , при котором приработочный износ переходит в область установившегося, то карбидтитановые покрытия уменьшают его только на скоростях, близких к оптимальным. Проведение сравнительного анализа экспериментальных данных: длина пути резания и период стойкости инструмента (таблица 1) показало, что при фрезерной обработке жаропрочных сплавов наилучшими эксплуатационными характеристиками обладает инструмент с наноструктурированными многослойными высокоэнтропийными покрытиями серии (Al₂₀-Ti₂₀-Zr₁₅-V₁₅-Cr₁₅-Nb₁₅). При этом для покрытия (Al₂₀-Ti₂₀-Zr₁₅-V₁₅-Cr₁₅-Nb₁₅) наблюдается повышение периода стойкости и длины пути резания по сравнению с инструментом без покрытия для сплава ХН35ВТЮ почти в 1,9 раза и для сплава ХН77ТЮРУ – ВД в 1,54 раза, а также по сравнению с покрытием nACo3+TiB2 соответственно на 20,7% и 20%.

Табл. 1. Период стойкости инструмента и критической длины пути резания

Покрытия	ХН35ВТЮ		ХН77ТЮРУ – ВД	
	T, мин	$l_{кр}$, м	T, мин	$l_{кр}$, м
(CrAlSi)N+DLC	37,7	680	35,84	640
nACo3	40	720	38,2	684
nACRo	45,77	824	41,6	720
nACRo+TiB2	50,44	908	43,33	780
nACo3+TiB2	56	1008	49,88	838
Al ₂₀ -Ti ₂₀ -Zr ₁₅ -V ₁₅ -Cr ₁₅ -Nb ₁₅	70,6	1272	62,5	987

Заключение

При анализе общих закономерностей влияния износостойких покрытий следует отметить, что покрытия, нанесенные различными методами (диффузионно-термическим методом-ДТ, КИБ и т.д.) способствует различному увеличению уровня оптимальных скоростей резания. Это условие является очень важным при выборе типа наносимого покрытия, когда в производственных условиях необходимым является решение задачи всемерного повышения производительности труда. Нанесение инновационных износостойких покрытий на инструментальный материал приводит к следующему явлению: наблюдается повышение стойкости режущего инструмента и совпадение оптимальных скоростей резания. Подобная закономерность позволяет сделать вывод о том, что в случае работы инструментами с близкими физико-химическими свойствами и относительно

одинаковым химическим составом, подложка не оказывает существенного влияния на уровень V_0 . Но, при этом, материал с более твердой основой (или материал, обеспечивающий меньшую интенсивность износа при работе без покрытия) обеспечивает большую размерную стойкость инструмента.

Таким образом, полученные результаты исследования износостойкости фрез с инновационными высокоэнтропийными покрытиями позволяют сделать ряд заключений: повышение стойкости инструмента и длины пути резания позволяет повысить эффективность лезвийной обработки резанием при обеспечении высоких показателей качества обработанной поверхности; при оценке эффективности применения инновационных износостойких покрытий и разработки рекомендаций по режимам резания необходимо проведение расчетов основных технико-экономических показателей, в частности увеличение периода стойкости режущего инструмента (T , мин), возможность повышения производительности обработки резанием (ПО, %) по сравнению с другими покрытиями, снижения расходов на дорогостоящий инструментальный материал (%) и расходов на капитальное вложение в виде

приобретения технологического оборудования; в ряде случаев покрытия, как правило, проявляют лучшие режущие свойства в области относительно высоких скоростей (температур) резания, что подтверждает их теплозащитную роль.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект No 22-19-00670).

- [1] Табаков В.П., Сагитов Д.И. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями в условиях стесненного резания. – Ульяновск: УлГТУ, 2015 – 179 с.
- [2] Шустер Л.Ш., Криони Н.К., Шолом В.Ю., Мигранов М.Ш. Покрытия и смазка в высокотемпературных подвижных сопряжениях и металлообработке. – М.: Машиностроение, 2008. – 318 с.
- [3] Райхельсон В.А. Обработка резанием сталей, жаропрочных и титановых сплавов с учётом их физико-механических свойств. – М.: Техносфера, 2018. – 508 с.
- [4] Дечко Э.М., Дечко М.М. Резание металлов и режущий инструмент. – Минск: Вышэйшая школа, 2020. – 287 с.
- [5] Cselle T. et al. Triplecoatings3®-New generation of PVD-Coatings for cutting tools //Journal of machine manufacturing. – 2009. – Т. 49. – №. E1. – С. 19-25.
- [6] Мокрицкий Б.Я., Ситамов Э.С., Серебренникова А.Г. Повышение работоспособности твёрдосплавного режущего инструмента за счет нанесения покрытий // Вестник ИрГТУ. – 2019. – Т. 23. – №. 2 (145). – С. 246-251.

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРАФЕНОВЫХ ПРИСАДОК НА АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕНТРАЛЬНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ 2 ПОРЯДКА

^{1,2}Мишаков С.Ю. *, ²Хопин П.Н.

* s.mishakov@mail.ru

¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия;

²ООО НПО «Графеника», Москва, Россия.

В статье представлены результаты исследования влияния графеновой присадки на коэффициент трения масла И-20 при смешанном режиме трения по роликовой схеме. Получены модели зависимости $f_{тр}$ от нагрузочно-скоростных факторов с использованием центрального композиционного планирования 2 порядка. Установлено, что добавление графена снижает коэффициент трения в среднем на 9% в зависимости от условий эксплуатации, что подтверждает его перспективность для применения для широкого диапазона нагрузок и скоростей скольжения.

Ключевые слова: графен, смазочные масла, антифрикционные свойства.

Введение

Графен, благодаря своим уникальным физико-химическим свойствам, является перспективным материалом для улучшения антифрикционных свойств смазочных масел. Ранее проведённые зарубежными авторами исследования продемонстрировали значительное снижение коэффициента трения при использовании графена в качестве присадки. Например, добавление графеновых нанопластинок в полиэфирное масло привело к снижению коэффициента трения на 50%, а также улучшению антифрикционных свойств трибосистем [2]. В другом исследовании показано, что применение графеновых оксидов в минеральных маслах снижает коэффициент трения на 30%, повышая износостойкость смазочных материалов [4]. Целью данного исследования является комплексное экспериментальное изучение влияния графеновых присадок в оптимальной концентрации 0,05% [3] на антифрикционные свойства базового масла И-20, а также разработка математических моделей, описывающих зависимость коэффициента трения от скорости скольжения и контактной

COMPREHENSIVE STUDY OF THE EFFECT OF GRAPHENE ADDITIVES ON THE ANTI-FRICTION PROPERTIES OF LUBRICATING OILS USING CENTRAL COMPOSITE DESIGN OF THE 2ND ORDER

Mishakov S.Yu., Khopin P.N.

The article presents the results of a study on the effect of a graphene additive on the friction coefficient of I-20 oil under mixed friction conditions using a rolling scheme. Models of the dependence of the friction coefficient on load-speed factors were obtained using second-order central composite design. It was found that the addition of graphene reduces the friction coefficient by an average of 9%, depending on operating conditions, which confirms its potential for use across a wide range of loads and sliding speeds.

Keywords: graphene, lubricating oils, antifriction properties.

нагрузки для условий смешанного трения. Исследование направлено на проверку адекватности разработанных моделей и их дальнейшее применение для оптимизации условий эксплуатации смазочных материалов с графеном.

Материалы и методы

Для испытаний использовалась машина трения СМТ-1. Эксперименты проводились по схеме трения "ролик-ролик" при комнатной температуре (20 °С) с применением наружных колец подшипников №7204 диаметром Ø47 мм из стали ШХ-15 (твёрдостью HRC 58–62) в качестве образцов и контрообразцов. Тестирование масла И-20 проводилось в двух вариантах: без добавок и с графеном в концентрации 0,05%. Эксперименты были спланированы с применением центрального композиционного ротатбельного планирования 2-го порядка. Варьируемые факторы охватывали следующие диапазоны: скорость скольжения $V = 0,66 \pm 0,4$ м/с (x_1) и контактная нагрузка $N = 784 \pm 392$ Н (x_2). Звёздные точки соответствовали скоростям $V = 0,09$ и $1,14$ м/с и нагрузкам $N = 112$ и 1360 Н. Матрица экспериментов приведена в табл. 1.

Табл. 1. Матрица центрального композиционного ротатбельного плана 2-го порядка

№ опыта	Уровни факторов						Параметр оптимизации $f_{тр}$		Примечание	
	В кодовом масштабе						В натуральном масштабе			
	x_0	x_1	x_2	x_1^2	x_2^2	x_1x_2	V, м/с	N, Н		Без присадки / с графеном
1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,98	1177	0,135 / 0,133	Полный факторный эксперимент 2 ⁷
2	+1	-1	+1	+1	+1	-1	0,25	1177	0,157 / 0,130	
3	+1	+1	-1	+1	+1	-1	0,98	294	0,105 / 0,119	
4	+1	-1	-1	+1	+1	+1	0,25	294	0,135 / 0,104	
5	+1	+1,41	0	+2	0	0	1,14	736	0,126 / 0,124	Звёздные точки
6	+1	-1,41	0	+2	0	0	0,09	736	0,144 / 0,119	
7	+1	0	+1,41	0	+2	0	0,62	1360	0,143 / 0,125	
8	+1	0	-1,41	0	+2	0	0,62	112	0,079 / 0,078	
9	+1	0	0	0	0	0	0,62	736	0,120 / 0,119	Опыты в центр плана
10	+1	0	0	0	0	0	0,62	736	0,126 / 0,113	
11	+1	0	0	0	0	0	0,62	736	0,138 / 0,119	
12	+1	0	0	0	0	0	0,62	736	0,132 / 0,119	
13	+1	0	0	0	0	0	0,62	736	0,132 / 0,124	

Основными варьируемыми факторами в экспериментах были скорость скольжения V (м/с) и контактная нагрузка N (Н). В ходе испытаний измерялся коэффициент трения $f_{тр}$.

Графен, использованный в данном исследовании, был получен из химически восстановленного оксида графена (ХВОГ) методом жидкостной фазовой эксфолиации [3].

Результаты и обсуждение

Испытания показали, что добавление графена в концентрации 0,05% значительно улучшает антифрикционные свойства масла И-20. При высокой нагрузке (N = 1177 Н) и низкой скорости скольжения (V = 0,25 м/с) коэффициент трения масла с графеном составил 0,130, что на 17% ниже по сравнению с маслом без присадок, у которого коэффициент трения составил 0,157. При низкой нагрузке (N = 294 Н) и низкой скорости скольжения (V = 0,25 м/с) коэффициент трения масла с графеном составил 0,104, что на 22% ниже по сравнению с чистым маслом, у которого коэффициент трения составил 0,135. В среднем, снижение коэффициента трения масла с графеном составляет 9% в зависимости от условий эксплуатации.

Для описания зависимости коэффициента трения от скорости скольжения и контактной нагрузки были построены две квадратичные регрессионные модели второго порядка. Модель для масла И-20 без графена представлена уравнением в кодовом выражении (1):

$$f = 0,1295 - 0,0097x_1 + 0,0178x_2 + 0,0052x_1^2 - 0,0068x_2^2, \quad (1)$$

где $f_{тр}$ – коэффициент трения, x_1 – скорость скольжения в кодовом виде, x_2 – контактная нагрузка в кодовом виде.

Модель для масла с графеном в кодовом выражении (2):

$$f = 0,1186 + 0,003x_1 + 0,0152x_2 + 0,0039x_1^2 - 0,006x_2^2. \quad (2)$$

Полученные модели были проверены на адекватность с использованием критерия Фишера. Модель для масла без графена (1) оказалась адекватной с расчётным значением $F_{расч} = 2,6$ при табличном значении $F_{0,05;4;4} = 6,39$. Модель для масла с графеном (2) также показала адекватность с расчётным значением $F_{расч} = 4,49$.

Обе модели дают возможность прогнозировать коэффициент трения в зависимости от скорости скольжения и контактной нагрузки, что позволяет эффективно применять полученные данные для оптимизации условий эксплуатации чистого масла И-20 и масла с графеновыми присадками.

Для удобства использования моделей на практике они были приведены к натуральным значениям скорости V (м/с) и контактной нагрузке N (Н). Модель для масла И-20 без графена представлена уравнением (3):

$$f = 0,1119 - 0,0727 \times V + 0,00009 \times N + 0,0376 \times V^2 - (3,3 \times 10^{-8}) \times N^2, \quad (3)$$

где f – коэффициент трения, V – скорость скольжения в м/с, N – контактная нагрузка N (Н).

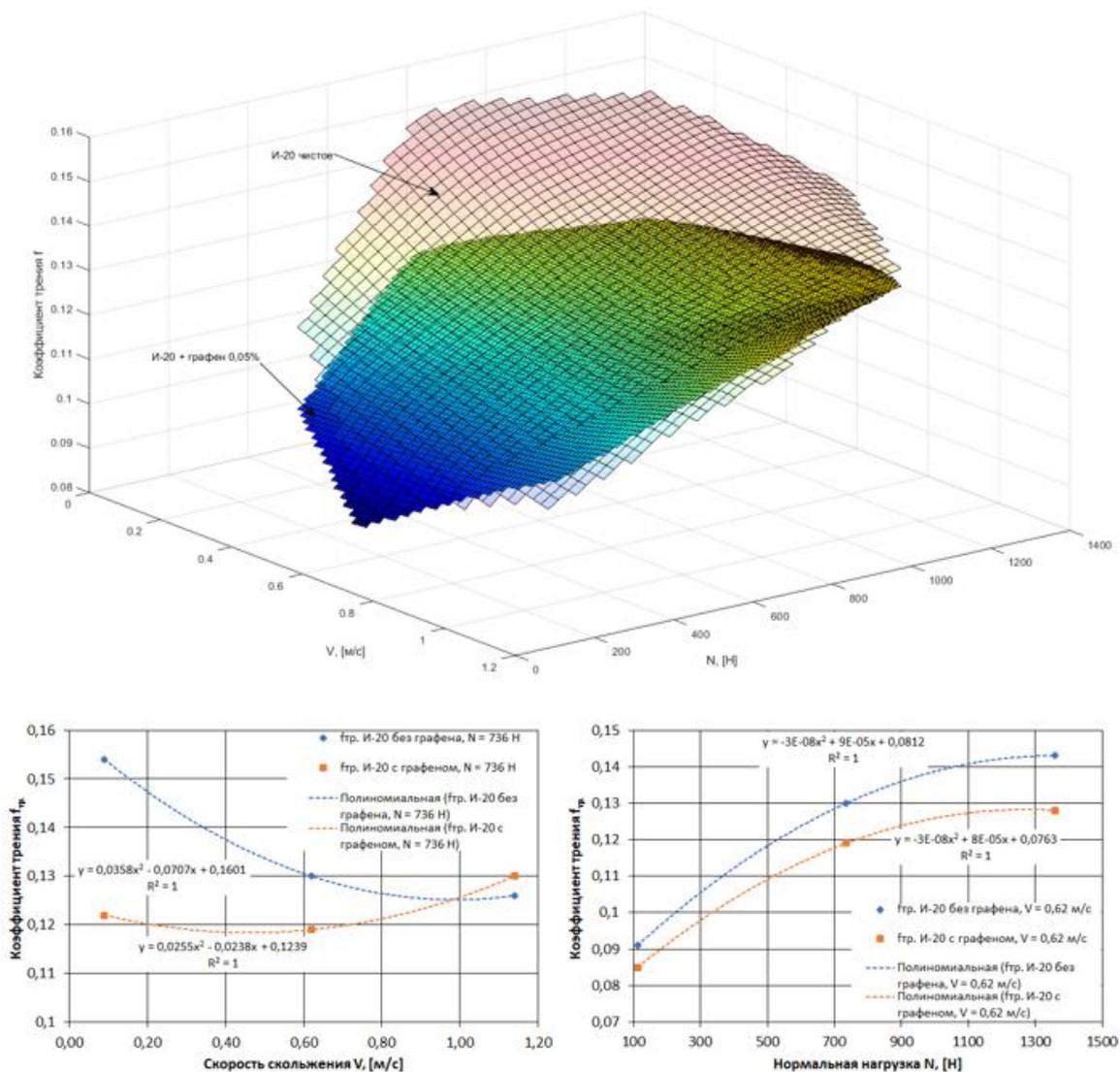


Рис. 1. Графическое сравнение моделей $f_{тр.} = f(V, N)$ и зависимостей $f_{тр.} = f(V)$ при $N=736$ Н и $f_{тр.} = f(N)$ при $V=0,62$ м/с

Модель для масла с графеном (4):

$$f = 0,0817 - 0,0258 \times V + 0,00008 \times N + 0,0282 \times V^2 - (3,08 \times 10^{-8}) \times N^2, \quad (4)$$

Сравнение расчётных моделей, полученных после испытаний масла И-20 с присадкой графена и без неё представлено на рис. 1.

Заключение

Проведённое исследование показало, что для условий смешанного трения добавление графена в концентрации 0,05% позволяет снизить коэффициент трения масла И-20 в среднем на 9%, в зависимости от условий эксплуатации. Например, при высокой нагрузке ($N = 1177$ Н) и низкой скорости скольжения ($V = 0,25$ м/с) коэффициент трения снизился с 0,157 до 0,130, а при низкой нагрузке ($N = 294$ Н) и скорости скольжения ($V = 0,25$ м/с) – с 0,135 до 0,104. Эти результаты подтверждают выводы предыдущих исследований о высокой эффективности графена в улучшении

антифрикционных свойств смазочных материалов. В дальнейшем планируется расширить исследования с учётом других типов масел и концентраций графена, что позволит прогнозировать антифрикционные свойства исследованных составов для произвольного сочетания нагрузочно-скоростных факторов.

- [1] Holmberg K. et al. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry // Tribology International. – 2017. – Т. 115. – С. 116-139.
- [2] Hou X. et al. Preparation and tribological properties of graphene lubricant additives for low-sulfur fuel by dielectric barrier discharge plasma-assisted ball milling //Processes. – 2021. – Т. 9. – №. 2. – С. 272.
- [3] Чеглаков А.В., Ткачев С.В., Дудаков В.Б., Грошкова Ю.А., Мишаков С.Ю., Хопин П.Н. Способ получения смазочного материала с углеродными добавками. Патент на изобретение RU 2807281 С1, 13.11.2023. Заявка от 17.01.2023.
- [4] Du G. et al. Tribological behavior and wear protection ability of graphene additives in synthetic hydrocarbon base stocks //Lubricants. – 2023. – Т. 11. – №. 5. – С. 200.

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС В ЗОНАХ КОНТАКТА БЕЗ И С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ТРЕНИЯ

Москвитин Г.В., Навроцкий Р.А.*

* roman2.navrotskiy@gmail.com

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия.

Цель данного исследования заключается в анализе нормальных контактных и касательных напряжений в зонах контакта зубьев для трех пар зубчатых колес при помощи современных пакетов программ, реализующих метод конечных элементов, и некоторые аналитические зависимости. Также во внимание приняты работы, согласно которым ответственными за накопление повреждений в зубчатых колесах являются не только нормальные контактные, но и касательные напряжения, возникающие вследствие трения. В ходе исследования были определены максимальные значения касательных и нормальных контактных напряжений.

Ключевые слова: зубчатые колеса, трение скольжения, нормальные и касательные напряжения, численное моделирование НДС.

Введение

Цилиндрические зубчатые передачи – одни из основных элементов современных конструкций, широко применяемых во многих отраслях промышленности и техники. Развитие проектирования, технологий производства и привлечение современных материалов для изготовления необходимы в условиях эксплуатации при воздействии циклических нагрузок, изменений режимов нагружения, а также влияния трения. При эксплуатации зубчатые колеса подвергаются износу и выкрашиванию, появляются трещины и другие дефекты. Зубья подвержены излому, деформированию, смятию и т. д. Оценка контактных напряжений и других параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) необходима для плодотворной реализации проектировочного этапа, и в дальнейшем усовершенствования производства, эксплуатации и внедрения новых технологий. В данной работе проводится оценка параметров НДС, а именно, нормальных контактных и касательных напряжений, с помощью численного метода конечных элементов и анализируются некоторые способы определения нормальных контактных напряжений в зоне контакта двух зубчатых колес, в том числе и с

COMPARATIVE RESEARCH OF THE COMPONENTS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF GEARS IN CONTACT ZONES WITHOUT AND TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF FRICTION

Moskvitin G.V., Navrotskiy R.A.

The purpose of this research is to analyze normal contact and shear stresses in the tooth contact zones for three pairs of gear wheels using modern software packages implementing the finite element method and some analytical equations. Also taken into account are the works according to which not only normal contact stresses but also shear stresses arising due to friction are responsible for the accumulation of damage in gear wheels. During the research, the maximum values of shear and normal contact stresses were determined.

Keywords: gearwheels, rolling friction, normal and shear stresses, numerical simulation of SSS.

учетом влияния трения. Объектами исследования являются три пары зубчатых колес с разными количествами зубьев (25 и 50, 20 и 50, 20 и 60) и разными передаточными числами. В качестве материала изготовления принята сталь 40ХН2МА.

Материалы и методы

На первом этапе численного исследования были созданы геометрические модели пар зубчатых колес инструментами SpaceClaim в программном комплексе AnsysWorkbench.

Далее была создана модель материала, учитывающая необходимые механические характеристики. Также сгенерирована конечно-элементная модель, особенностью которой является уменьшение размера конечного элемента с 1 мм до 0,5 мм в сферической зоне, окружающей зоны контакта.

На следующем этапе к каждой из трех ведущих шестерен был приложен крутящий момент, а также проводилось моделирование закрепления зубчатых колес с использованием Cylindrical Support (цилиндрическое закрепление).

В данной работе на основе результатов предыдущих исследований использовалась оценка различных аналитических зависимостей, с помощью которых возможно получить значения контактных

напряжений. Также считается справедливым, что не только контактные, но и касательные напряжения, действующие в зонах контакта, приводят к возникновению и дальнейшему распространению разрушений и к появлению усталостных трещин. В соответствии с результатами анализа формул из [1], наиболее адекватные результаты показывает использование следующих:

$$\sigma_H = Z_H Z_M Z_\varepsilon Z_\beta \sqrt{\frac{F_t K_H u+1}{d_1 b_w u}}, \quad (1)$$

$$\sigma_H = \frac{1}{\sqrt{2\pi(1-\nu^2)}} \sqrt{\frac{\omega_{Ht} E_{np}}{R_{np}}} \approx 0,418 \sqrt{\frac{\omega_{Ht} E_{np}}{R_{np}}}, \quad (2)$$

$$\sigma_H = Z_H Z_E Z_\varepsilon \sqrt{\frac{\omega_{Ht} u \pm 1}{d_1 u}}, \quad (3)$$

$$\sigma_H = Z_H Z_M Z_\varepsilon \sqrt{\frac{F_t K_H (u+1)}{d_1 b_w u}}, \quad (4)$$

Согласно исследованию [2] для получения значений максимальных касательных напряжений необходимо воспользоваться формулой:

$$\tau_{max} = c_1 \sigma_{Hp}, \quad (5)$$

где σ_H – наибольшие нормальные контактные напряжения, τ_{max} – максимальные поверхностные касательные напряжения, c_1 – коэффициент приведения нормальных контактных напряжений к максимальным поверхностным касательным напряжениям, который определяется следующим образом:

$$c_1 = 0,8 \sqrt{(1,5f_{сц} - f)^2 + 2,4f_{сц}f}, \quad (6)$$

где f – максимальный коэффициент сцепления на расчетном участке поверхностей зубьев, $f_{сц}$ – расчетный коэффициент сцепления.

Коэффициент сцепления определяется:

$$f_{сц} = \frac{A P_n^{0,1} \left[10 + \lg \left(\frac{HB R_a}{E_{np} R_{np}} \right) \right]}{v_k^{0,07} (v_1 + v_2)^{0,1} (v_1 - v_2)^{0,35} R_{np}^{0,25}}, \quad (7)$$

где A – размерный коэффициент; P_n – нагрузка на единицу длины, HB – твердость менее твердого из контактирующих тел, R_a – шероховатость, E_{np} – приведенный модуль упругости, R_{np} – приведенный радиус кривизны, v_k – вязкость смазки при температуре вступающих в контакт поверхностей, v_1 и v_2 – окружные скорости ведущего и ведомого звеньев, соответственно.

Допускаемые максимальные касательные напряжения можно определить по допускаемым максимальным контактным напряжениям:

$$[\tau_{max n}] = c_2 c_3 \sigma_{HPp}, \quad (6)$$

где c_2 – коэффициент пропорциональности допускаемых напряжений; σ_{HPp} – допускаемые нормальные контактные напряжения; c_3 – коэффициент надежности, определяемый в зависимости от вероятности безотказной работы.

Результаты и обсуждение

Результаты численного исследования зубчатых колес без учёта трения представлены в табл. 1. и на рис. 1-2, а с учетом действия трения в табл. 2 и на рис. 3.

Табл. 1. Результаты численного исследования

	Первая пара	Вторая пара	Третья пара
σ_{Hs} , МПа	989,37	812,83	980,21
τ_{max} , МПа	68,56	78,79	63,21
σ_{max} , МПа	337,65	264,92	387,63
ε_{max} , МПа	0,0055	0,0046	0,0039

Табл. 2. Результаты численного исследования

Величина	Первая пара	Вторая пара	Третья пара
τ_{max} , МПа	149,54	118,45	126,71

Результаты аналитического исследования при использовании (1) – (4) представлены в табл. 3.

Табл. 3. Значения контактных напряжений

№	σ_H , МПа		
	Первая пара	Вторая пара	Третья пара
1	792,060	844,850	902,908
2	1003,076	897,178	959,233
3	939,960	852,249	910,599
4	974,020	871,190	931,448

При использовании описанных формул (5) – (7) аналитически определены максимальные касательные напряжения с учетом трения (табл. 4).

Табл. 4. Значения касательных напряжений

Величина	Первая пара	Вторая пара	Третья пара
τ_{max} , МПа	172,94	134,95	111,97

Таким образом, при исследовании без учета трения для формул (1) – (4) относительные погрешности полученных контактных напряжений составляют менее 15%, а в сравнении с результатами численного решения – не более 10%.

Что же касается анализа касательных напряжений с учетом влияния трения, то погрешность при сравнении с численным исследованием составляет менее 13%.

Заключение

Таким образом, можно отметить, что аналитические методы позволяют оценивать лишь абсолютные значения напряжений, в то время как численный метод с применением пакетов

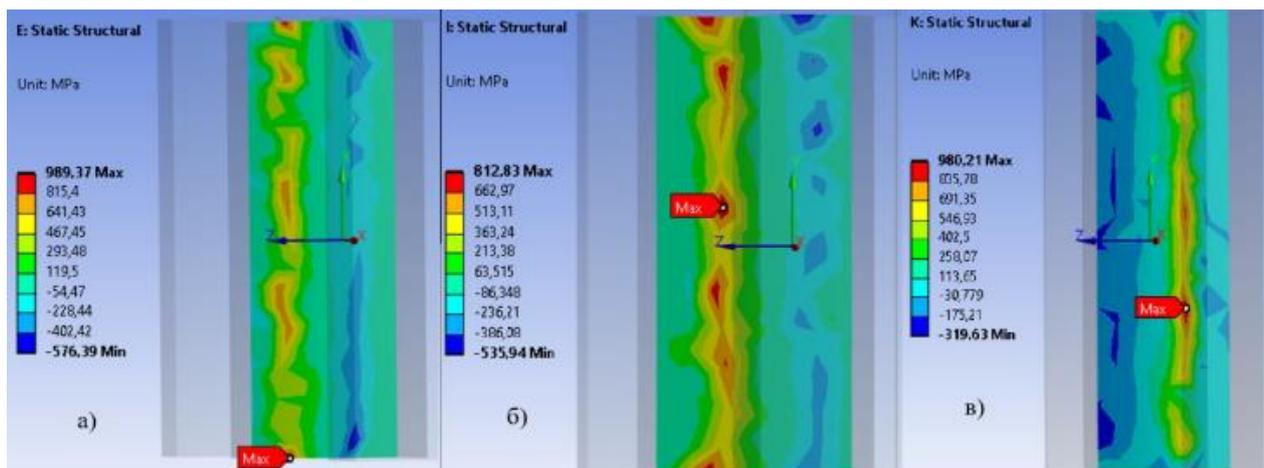


Рис. 1. Контактные напряжения в первой (а), второй (б) и третьей (в) парах

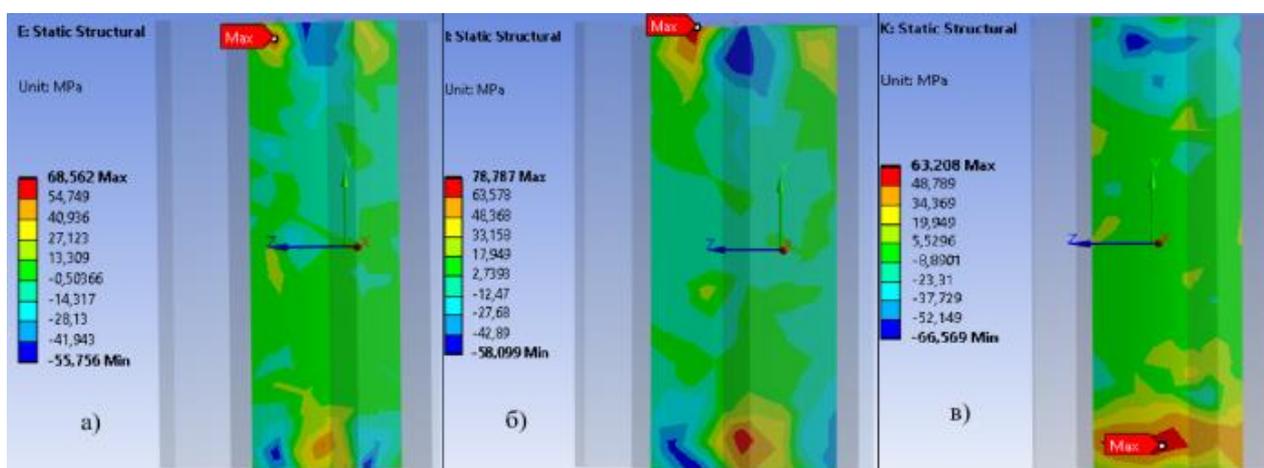


Рис. 2. Касательные напряжения в первой (а), второй (б) и третьей (в) парах

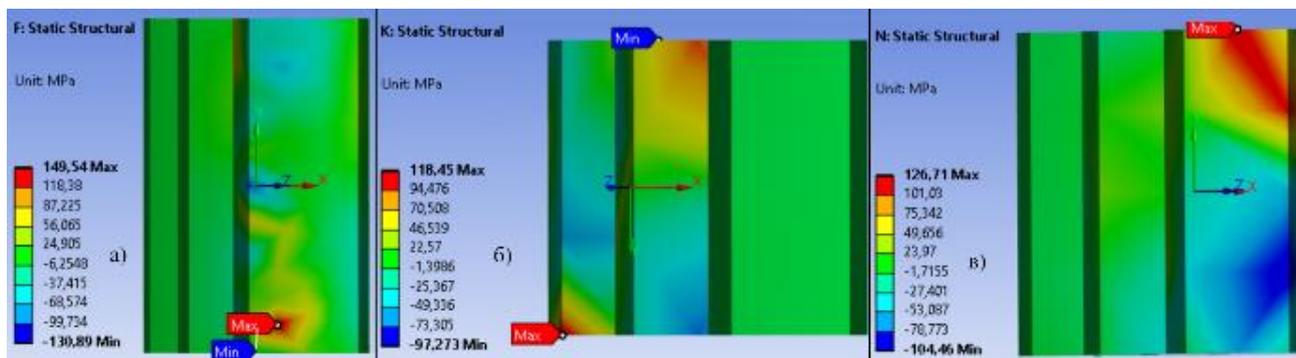


Рис. 3. Касательные напряжения в первой (а), второй (б) и третьей (в) парах

инженерных программ отображает дополнительные параметры и поля параметров НДС. Расхождения результатов численного и аналитического метода исследования обусловлены некоторыми особенностями применения программных комплексов. Расхождения могут быть нивелированы уменьшением размера конечного элемента и задействованием больших вычислительных мощностей.

- [1] Москвитин Г.В., Навроцкий Р.А. Сравнительный анализ методов исследования НДС в зонах контакта зубчатых колес // XXX Международный симпозиум им. А.Г. Горшкова. Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Материалы симпозиума. – Москва: ТРП, 2024. – С. 139-149.
- [2] Воробьев Ю.В., Ковергин А.Д. Проектирование зубчатых передач на долговечность с учетом трения // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2004. – Т. 10. – №. 1-2. – С. 205-211.
- [3] Бруйка В.А., Фокин В.Г., Солдусова Е.А., Глазунова Н.А., Адеянов И.Е. Инженерный анализ в ANSYS Workbench – Самара: Самар. гос.техн.ун-т, 2010. – 271 с.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ

Мухтарова А.Б.

aygerim.tokhmetova@mail.ru

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия.

В данной статье показано сравнение прогнозных моделей, таких как *Linear Regression*, *XGBoost*, *LightGBM*, *CatBoost*, *Decision Tree*, *Random Forest*. Однако, алгоритм *CatBoost* показал хорошую корреляцию при сравнении с экспериментальными данными, полученными на машине трения ПРУ-2.

Ключевые слова: моторное масло, шунгит расчёт температуры легированного смазочного слоя, машинное обучение.

Введение

В настоящее время создание смазочных масел позволяют повысить трибологические характеристики узлов трения. Смазочные масла обеспечивают долговечность, нагрузочную способность и износостойкость механизмов и машин. При введении добавок на трущихся деталях образуется поверхностный слой с улучшенными трибологическими свойствами. Смазочные масла с шунгитом уменьшают коэффициент трения и износ [1-3].

Поэтому в данной работе разработаны прогнозные методы для расчета температуры легированного смазочного слоя.

Для верификации разработанных методов, проведено сравнение с экспериментальными данными.

Цель предлагаемой статьи – сравнение полученных прогнозных исследований при определении температуры легированного масла шунгитом с экспериментальными данными.

В данном исследовании использовали моторное масло Mobil Ultra SAE 10W–40 с добавлением шунгита. Концентрация шунгита в смазочном масле изменялась в пределах 0,05-1%.

Машинное обучение

Проведен сравнительный анализ алгоритмов для определения температуры легированного смазочного слоя шунгитом.

Данные обучения и тестирования представлены в файлах csv, которые содержат два анализируемых параметров.

COMPARATIVE STUDIES OF THE TEMPERATURE OF THE LUBRICATING LAYER

Mukhtarova A.B.

This article shows comparison of predictive models, such as *Linear Regression*, *XGBoost*, *LightGBM*, *CatBoost*, *Decision Tree*, *Random Forest*. However, the *CatBoost* algorithm showed a good correlation when compared with experimental data obtained on the friction machine PRU-2.

Keywords: motor oil, shungite calculation of the temperature of the alloyed lubricating layer, machine training.

Целевой признак – температура смазочного слоя с шунгитом.

Для обучающих классификаторов набор данных был разделен на обучающую и тестовую выборки в соотношении 2:1, количество записей для обучающих классификаторов составляет 42, а количество записей для тестирования 21.

Для всех классификаторов рассчитывалась метрика MSE для тестовых данных.

Изучены следующие алгоритмы: *Linear Regression*, *XGBoost* (XGB), *LightGBM*, *CatBoost* (CB), *Decision Tree* (DT), *Random Forest* (RF).

Для каждого из алгоритмов построен классификатор с использованием библиотек Python, вычислена метрика MSE, которые могут определить наиболее эффективную модель.

По совокупности всех показателей *CatBoost* имеет самое низкое значение MSE.

Linear Regression и *LightGBM* показывают худшие результаты.

Метод экспериментальных исследований

Исследования смазочных материалов проводилось на машине ПРУ-2 с возвратно-поступательным движением (рис. 1).

При применении данной схемы происходит трение скольжения между цилиндрической поверхностью подвижного образца и неподвижной пластиной (рис. 2).

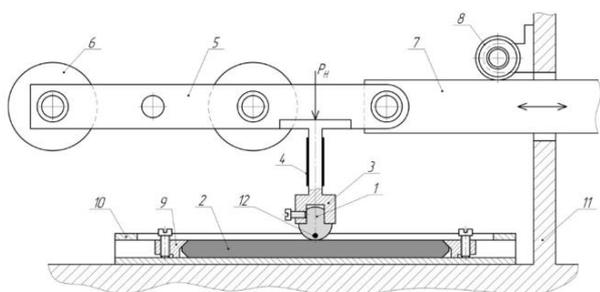


Рис. 1. Рабочая часть машины трения ПРУ: 1 – подвижный образец, 2 – неподвижный образец, 3 – тензобалка с держателем подвижного образца, 4 – тензорезистор, 5 – рычаг, 6 – груз, 7 – шток, 8 – ролик, 9 – прижим, 10 – держатель неподвижного образца, 11 – основание установки, 12 – термопара

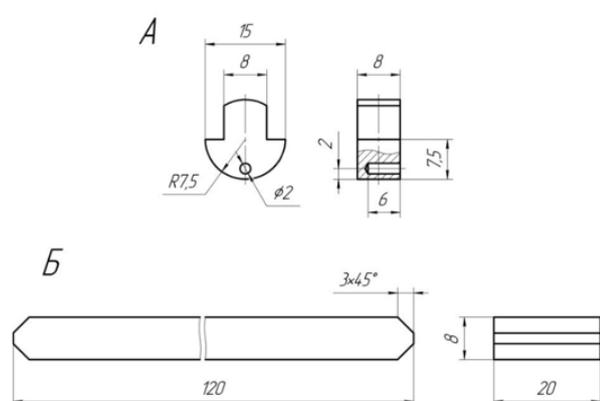


Рис. 2. Схемы образцов: А – подвижный образец, Б – неподвижный образец

Были выбраны следующие режимы работы пары трения: скорость скольжения 100 циклов в минуту; нагрузка на образец варьируется от 150 до 450 Н. Скорость перемещения изменяется по синусоидальному закону. Привод на основе кривошипно-шатунного механизма. Амплитуда перемещения составляет 80 мм. Продолжительность одного испытания составляет 1 час. В ходе испытаний фиксировали показания температуры.

Табл. 1. Данные испытаний

Смазочное масло	θ , °C (XG B)	θ , °C (CB)	θ , °C (DT)	θ , °C (RF)	θ , °C (опыт)
Масло + 0,05% шунгита	23	22,7	24	23,7	22,8
Масло + 0,1% шунгита	22,8	22,4	21	22,7	22
Масло + 0,5% шунгита	21,3	21	20,6	20	21
Масло + 1% шунгита	20	20,3	19	19,8	20,8

Исходя из табл. 1, можно сделать вывод, что масло с шунгитом позволяет снизить температуру смазочного слоя. Прогнозная модель CatBoost имеет близкие результаты с экспериментальными значениями, по сравнению с другими прогнозными моделями.

Выводы

Проведено сравнение прогнозных данных температуры легированного смазочного слоя шунгитом с экспериментальными данными. Исследованы различные алгоритмы машинного обучения задачи определения температуры легированного смазочного слоя: Linear Regression, XGBoost, LightGBM, CatBoost, Decision Tree, Random Forest. Для каждого из алгоритмов, с использованием библиотек для языка Python построен классификатор и была рассчитана метрика, на основе которой построена наиболее эффективная модель CatBoost. Из анализа данных следует, что у прогнозной модели CatBoost хорошая корреляция с экспериментальными данными.

[1] Tuktarov A.R., Khuzin A.A., Dzhemilev U.M. Fullerene-containing lubricants: Achievements and prospects //Petroleum Chemistry. – 2020. – Т. 60. – С. 113-133.

[2] Strohmaier A., Waters A. Analytic properties of heat equation solutions and reachable sets //Mathematische Zeitschrift. – 2022. – Т. 302. – №. 1. – С. 259-274.

[3] Hancock J.T., Khoshgoftaar T.M. CatBoost for big data: an interdisciplinary review //Journal of big data. – 2020. – Т. 7. – №. 1. – С. 94.

ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ В ТРИБОТЕХНИКЕ

Мышкин Н.К.* , Григорьев А.Я.

* nkmyshkin@mail.ru-mail

Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси,
Гомель, Беларусь.

Представлен обзор состояния исследований и разработок в области применения полимерных композитов в подвижных сопряжениях машин и механизмов. Эти применения обусловлены многофункциональностью полимерных композитов, малой плотностью в сравнении с металлами и широким диапазоном рабочих характеристик в условиях трения и смазки. Самосмазываемость и коррозионная стойкость полимерных композитов расширяют их области применения в технике, домашнем хозяйстве и медицине. Отмечены современные тенденции в развитии трибологии полимеров. Кроме того, отмечена важность разработки экологичных полимерных и смазочных материалов, а также методов их рециклинга.

Ключевые слова: полимерные композиты, трение, износ, смазка.

Введение

Быстрорастущий выпуск полимеров и материалов на их основе в мире обусловлен их заменой металлов во многих областях техники и обычной жизни вследствие многофункциональности и возможности регулирования состава и характеристик [1]. По прочности полимерные композиты достигают показателей таких сплавов металлов как бронза.

Динамика роста выпуска полимерных материалов составляет примерно 4-7% в год. За 65 лет (с 1955 до 2020) их производство увеличилось в 190 раз, и объем мирового выпуска полимерных материалов достиг более 420 млн. т. После 2010 г. годовой объем мирового выпуска полимеров в кубических метрах. превышает мировой годовой объем выпуска всех металлов

Для машин и механизмов ключевым является снижение их массы при применении полимерных композитов, так как это приводит к снижению затрат энергии на преодоление трения, а эти затраты огромны [2]. Самосмазываемость и коррозионная стойкость полимерных композитов расширяют их области применения в технике и в медицине [3]. По отраслям 10-25% полимеров применяется в автомобилестроении, до 50% в аэрокосмической отрасли; 18-25% в строительстве, 7-12% в

POLYMER COMPOSITES IN TRIBOLOGY

Myshkin N.K., Grigoriev A.Ya.

The paper presents the review of the research and developments in the area of polymer composites applications in the friction units of machinery. These applications are based on multifunctionality of polymer composites, low mass density compare to metals, and wide range of the working performance at friction and lubrication conditions. Self-lubricity and corrosion resistance are assisted in widening their applications in engineering, common life, and medicine. Modern trends in development of polymers in tribology are reviewed. It is also shown the importance of development the ecology-friendly polymer composites and lubricants of plant and methods of their recycling.

Keywords: polymer composites, friction, wear, lubrication.

энергетике электротехнике и электронике, 4-15% в производстве потребительских товаров и 35-39% в таре и упаковке.

Результаты и обсуждение

ИММС НАНБ участвует в разработке целого ряда полимерных композитов для триботехники различных отраслей промышленности [4]

В автомобилестроении это материалы для гибких шлангов пневмо-топливопроводов и их защитной оплетки, материалы для деталей подвески, емкостей для рабочих жидкостей и топлива, и др. Использование явления резкого падения вязкости смесевых композиций полиамидов и полиолефинов, позволяет перерабатывать их экструзией и получать новые ударопрочные материалы. При этом эффективно используется управление межфазным взаимодействием молекул матрицы и наполнителя с целью обеспечению требуемых упругих свойств и твердости. Для наполнения полимерных композитов все чаще используют волокна и различной формы дисперсные частицы наноразмерного масштаба, в частности углеродной и силикатной природы. Особый интерес вызывает синергизм взаимодействия наполнителей макро и наномасштаба в улучшении триботехнических характеристик полимерных композитов [5].

Полимерные демпфирующие элементы используются в конструкции межвагонного демпфера для железнодорожного транспорта, также как и демпфирующие прокладки из разработанного в институте материала со сроком службы, равным сроку службы рельсовой плети при температурах от -60 до +60 °С. Самозатухающие, бездымные полимерные материалы облицовки тросов лифтовых шахт обладают также высокой износостойкостью.

Плазмохимическое нанесение пленок фторполимеров на углеродные волокна для антифрикционных композитов на основе фторопласта позволяет регулировать величину поверхностной энергии, адгезию и смачивание волокон. При этом возможно получение износостойких материалов для компрессоров нефтехимической и газоперерабатывающей отраслей. Эти материалы предназначены для изготовления деталей ответственных узлов трения: поршневых колец, торцевых, сальниковых уплотнений, подшипников скольжения в насосах, запорной арматуре и т.п. Они могут работать в воздушных, жидких средах, в том числе агрессивных, сухих газах, вакууме, в интервале температур от -120 до +280 °С.

Разработаны безасбестовые фрикционные минерало-полимерные композиции, износостойкие материалы трансмиссий автотракторной техники, для многодисковых тормозов автомобилей, узлы трения станков кордового производства для шин. Материалы позволяют получать гибкие и эластичные детали фрикционного назначения. Они используются в конструкциях вала отбора мощности, муфт сцепления, фрикционов коробки перемены передач тракторов «Беларус», карьерных самосвалов «БелАЗ», канатных машин на ОАО «Белорусский металлургический завод». Разработаны также материалы для фрикционных органов управления механизацией крыла самолетов семейства ТУ-214. Поставляются нефтяникам тормозные накладки для лебедок буровых вышек. Их материал и конструкция сертифицирована производителем бурового оборудования DrillMech (Италия). Эти материалы обеспечивают постоянство коэффициента трения в нестационарных условиях в диапазоне рабочих температур от -60 до 420 °С.

Учитывая повышающиеся требования к экологичности полимеров, важное значение имеет эффективное использование их отходов – только мировой объем бытовых отходов полимеров достигает 8-10 млн.т в год. Материалы, полученные после их переработки, предназначены для создания сборных покрытий строительных и спортивных

площадок, тротуаров, сельских и дачных дворов, подъездных путей, территорий ферм. Они обладают хорошей износостойкостью и сцеплением с шинами транспорта и обувью.

Кроме того, важное экологическое значение приобретает разработка биоразлагаемых полимерных композитов и смазочных материалов на основе продуктов растительной природы, в первую очередь, для триботехники, работающей в лесном и сельском хозяйстве, а также в экологически охраняемых зонах и заповедниках. Эти разработки начаты во всем мире и будут особенно важны для регионов с хрупкими экосистемами, таких как Арктика и Антарктика.

Заключение

Многофункциональность полимерных материалов и композитов на их основе обуславливает растущее их потребление во всех отраслях деятельности человека. Их малая плотность в сравнении с металлами и возможность повысить физико-механические свойства, снизить трение и износ их композитов в сочетании с наполнителями разной природы дают преимущества во всех видах техники благодаря прямым и косвенным факторам снижения потерь энергии и материалов. Возрастающие требования к экологически-вредным факторам применения полимеров из-за окислительной и коррозионной стойкости отходов их применения приобретают все большее значение. Эти проблемы могут быть решены разработкой методов рециклинга полимеров и получением новых материалов и изделий для последующих применений.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной программы научных исследований Республики Беларусь, «8. Материаловедение, новые материалы и технологии» на 2021-2025 годы (шифр 4.2.3 НИР 1).

[1] Friedrich K., Breuer U. (eds.) Multifunctionality of Polymer Composites, Elsevier, 2015.

[2] Holmberg K., Erdemir A. Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions // Friction. – 2017. – Т. 5. – С. 263-284.

[3] Мышкин Н.К., Григорьев А.Я., Джанг Г. Устойчивое развитие и трибология полимеров. // Трение и износ. – 2022. – №6 (43). – С. 541–547

[4] Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого: 50 лет развития / сост.: А. Я. Григорьев, Н. К. Мышкин, В. В. Кончиц. – Минск: Беларус. навука, 2020. – 222 с.

[5] Мышкин Н.К., Zhang G., Гудев Д.М., Григорьев Ф.А., Wang W., Li G. Характеристики нанокompозитов на основе ПЭЖ при трении по стали // Трение и износ. – 2021. – Т. 42. – № 3. – С. 350–357.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СКОРОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАНИЧНОГО СМАЗОЧНОГО СЛОЯ

Новиков В.В.*, Голубева М.А.

* novikov-ww@mail.ru

Ивановский государственный университет, Иваново, Россия.

Построена математическая модель для расчета толщины смазочного слоя от времени его формирования в плоском трибокапилляре в зависимости от температуры и вязкости смазки. Предложена аналитическая зависимость влияния температуры на скорость роста слоя. Это позволило количественно оценить скорость роста слоя защитной пленки и время ее формирования. Расчеты показали, что скорость роста пленки с повышением температуры от комнатной до 170 °C увеличивается скорость от единиц до несколько десятков мкм/с.

Ключевые слова: граничная смазка, присадки, смазочный слой, температура, вязкость, диффузия.

Введение

Граничное трение – трение при наличии тонких слоев смазки. Эффективность смазочного материала при граничном трении определяет способность компонентов смазки формировать на трущихся поверхностях тонкие наноразмерные пленки адсорбирующихся молекул [1-3]. В процессе взаимодействия микронеровностей пленка повреждается. Поэтому важно знать скорость ее восстановления.

В научной литературе имеется ряд работ, посвященных построению описания этих процессов. Нами была рассмотрена модель образования смазочного слоя при разрыве контакта [4]. Авторы считают, что при таком разрыве температуры столь высоки, что смазка испаряется и адсорбируется в газообразном состоянии (рис. 1).

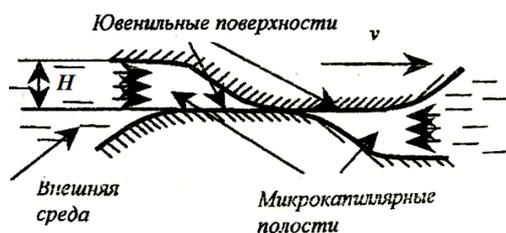


Рис. 1. Схема возникновения плоского трибокапилляра при разрыве микроконтакта

Ранее нами был предложен альтернативный подход, который рассматривает процесс формирования пленки за счет осаждения из жидкой

MODELING THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE RATE OF FORMATION OF THE BOUNDARY LUBRICANT LAYER

Novikov V.V., Golubeva M.A.

A mathematical model is constructed to calculate the thickness of the lubricant layer from the time of its formation in a flat tribocapillary, depending on the temperature and viscosity of the lubricant. Calculations have shown that the growth rate of the film with an increase in temperature from room temperature to 170 °C increases from units to several tens of $\mu\text{m/s}$.

Keywords: boundary lubrication, additives, lubricant layer, temperature, viscosity, diffusion.

фазы за счет диффузии [5]. При этом температура стенок не превышает температуру кипения, капилляр заполнен смазкой, из которой идет адсорбция присадки. Диффузионная задача формулируется в виде одномерного уравнения диффузии с граничными условиями, соответствующими ситуации, когда на одной поверхности идет абсолютное поглощение присадки. Концентрация присадки в примыкающей к ювенильной поверхности жидкости принималась равной нулю. Тогда решение на распределение присадки в смазке по высоте капилляра представляется в виде ряда Фурье:

$$C(z, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2C_0}{H\lambda} [1 - \cos(\lambda h)] e^{-D\lambda^2 t} \sin(\lambda z), \quad (1)$$

где $\lambda = \frac{\pi(1+2n)}{2H}$ – параметр формулы, D –

коэффициент диффузии присадки, H – высота капилляра, C_0 – начальная концентрация присадки в смазке.

Зная этот закон (1) можно определить массу присадки, осевшей на поверхности, и рассчитать толщину осевшего слоя:

$$h(t) = H C_0 \left(1 - \frac{C_2(t)}{C_0} \right) \frac{\rho}{\rho_1}, \quad (2)$$

где $C_2(t) = \frac{1}{H} \int_0^H C(z, t) dz$ – концентрация не осевшей присадки, ρ – плотность смазочного материала, ρ_1 – плотность осевшего слоя.

Полученное выражение (2) позволяет проводить численное моделирование кинетики формирования смазочного слоя на ювенильной поверхности.

Цели и задачи исследования

Целью нашей работы являлось: исследование влияния температуры на скорость формирования диффузионного слоя на основе ранее предложенной модели [5].

Задачами исследования являлось:

— моделирование влияния температуры смазочного материала на коэффициент диффузии присадки;

— численное моделирование влияния температуры на время формирования граничного смазочного слоя присадки, осажденного диффузионно на ювенильную поверхность в месте трибоповреждения;

— получение, на основе численных расчетов, аналитических выражений для определения влияния температуры на скорость роста осажденной пленки.

Материалы и методы исследований. Для исследований использована ранее предложенная модель формирования диффузионного слоя (2), в которой уточняется влияние температуры на коэффициент диффузии.

Температурную зависимость диффузии можно определить по формуле Эйнштейна-Стокса:

$$D(T) = \frac{k_B T}{6\pi\eta(T)r}, \quad (3)$$

где T – абсолютная температура среды, r – характерный радиус диффундирующей частицы присадки, k_B – константа Больцмана.

Известно, что диффузия в жидкости определяется вязкостью η . Для углеводородных жидкостей зависимость вязкости от температуры хорошо описывается формулой Аррениуса [6]:

$$\eta(T) = \eta_0 \exp\left(\frac{U}{RT}\right), \quad (4)$$

где U – энергия активации вязкого течения, R – универсальная газовая постоянная, η_0 – параметр формулы.

Расчет параметров формулы (4) для модельных базовых масел И-20 и И-40 на основании экспериментальных данных работы [6] приведен в табл. 1.

Табл. 1. Значение энергии активации и постоянного коэффициента для минеральных масел И-20А и И-40А

Масло	U , кДж/моль	η_0 , 10^{-6} Па·с
И-20А	30,5	0,18
И-40А	34,5	0,10

Моделирование по формуле (2) с учетом выражений (3-4) проводили численно в пакете MathCad 15.0. Для всех расчетов принималось постоянное значение высоты капилляра $H = 1$ мкм, характерный радиус диффундирующей частицы присадки $r = 1$ нм и концентрации присадки $C_0 = 0,01$.

Результаты и их обсуждение. Результаты расчета зависимости коэффициента диффузии от температуры приведены на рис. 2. Он показывает, что подъем температуры от комнатной до 170 °С повышает коэффициент диффузии на два порядка. Диффузия происходит быстрее в жидкостях с меньшей вязкостью.

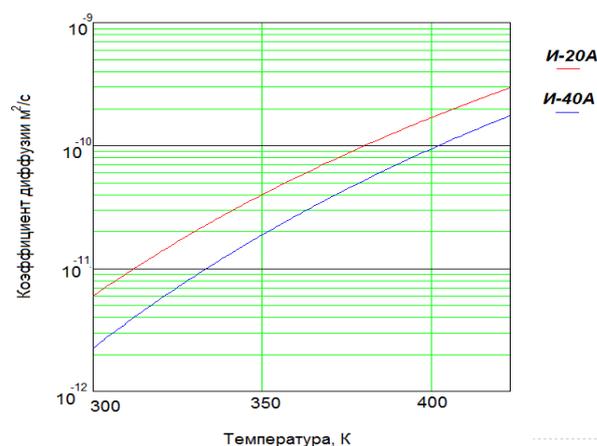


Рис. 2. Расчет коэффициента диффузии модельной присадки в базовых маслах различной вязкости

Увеличение коэффициента диффузии с повышением температуры естественно приводит к сокращению времени формирования функционального слоя трибоактивной присадки.

На рис. 3 представлен результат расчета времени формирования слоя в 1 нм. При повышении температур от комнатной 20 °С (293 К) до 170 °С (443 К) время формирования слоя сокращается на два порядка с 5 мс до 30 мкс.

Для оценки скорости формирования слоя толщиной $h = 1$ нм на основании результатов численных расчетов нами была предложена аналитическая модель влияния температуры на эту скорость.

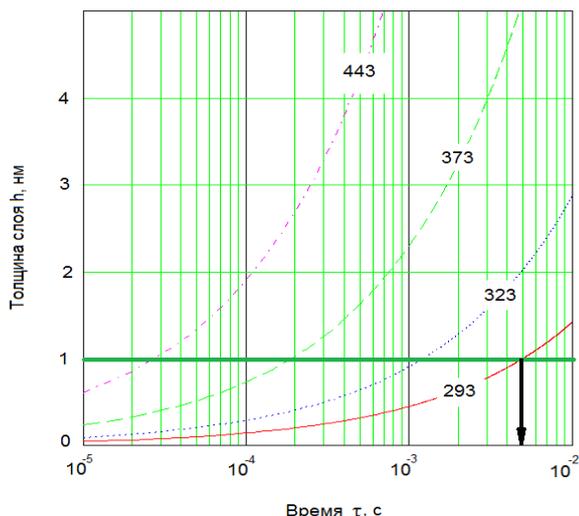


Рис. 3. Влияние температуры на толщину осажденного слоя для масла И-40А

Удалось установить, что время формирования слоя присадки толщиной в 1 нм подчиняется экспоненциальному закону:

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{U_c}{RT}\right), \quad (5)$$

где U_c – энергия активации роста слоя трибоактивной присадки, τ_0 – параметр времени.

Рассчитанные коэффициенты модели (5) приведены в табл. 2. Видно, что в более вязкой жидкости рост слоя протекает длительней, чем в менее вязкой.

Табл. 2. Значение энергии активации и постоянного коэффициента для минеральных масел И-20А и И-40А

Масло	τ_0 , нс	V_0 , м/с	U_c , кДж/моль	Коэффициент корреляции
И-20А	2,78	0,36	32,3	0,99
И-40А	2,42	0,41	34,9	0,99

Результаты расчета времени роста слоя позволили перейти к модели для скорости роста. Модель скорости роста граничного слоя носит классический характер зависимости для средней скорости роста фазы при ее диффузионном росте:

$$V_c = V_0 \exp\left(-\frac{U_c}{RT}\right), \quad (6)$$

где $V_0 = h/\tau_0$ – константа, значения которой даны в табл. 2.

На рис. 4 зависимость (6) представлена в виде графиков. Видно, что скорость роста слоя в менее вязком масле И-20А более высокая, чем в

И-40А. Она сильно зависит от температуры и возрастает с 1 мкм/с до нескольких десятков мкм/с. Например, для температуры смазки 100 °С скорость роста составляет 5÷10 мкм/с. Время формирования слоя в таких условиях 1 нм составляет 0,1÷0,2 мс.

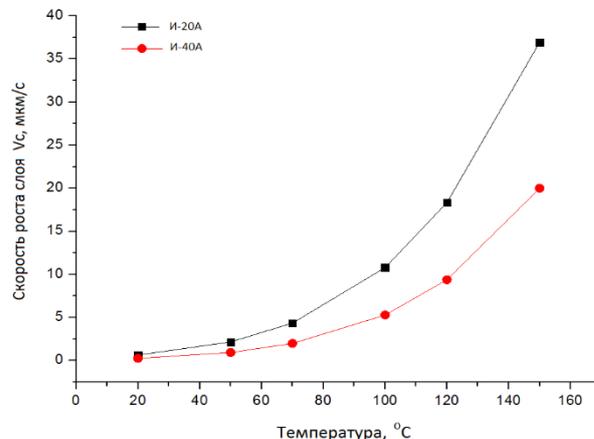


Рис. 4. Зависимость средней скорости роста слоя присадки от температуры и базового масла

Выводы

В результате работы получена зависимость коэффициента диффузии от температуры для смазочных материалов. Построена и рассчитана численная модель роста граничного смазочного слоя при различных температурах и базовых средах. Предложена аналитическая модель влияния температуры на скорость роста слоя. Модель позволила количественно оценить скорость роста слоя защитной пленки и время ее формирования.

- [1] Крагельский И.В. Трение и износ. Изд. 2-е перераб. и доп. М., изд-во «Машиностроение», 1968. – 480 с.
- [2] Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения: монография. – Москва: Физматлит, 1963. – 472 с.
- [3] Буяновский И.А. Граничная смазка // Современная трибология: итоги и перспективы. Отв. Ред. К.В. Фролов. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – С. 226-276.
- [4] Березина Е.В. Производные фталоцианина как присадки к смазочным композициям. – Иваново : Ивановский гос. ун-т, 2007. – 239 с.
- [5] Батова Л.В., Новиков В.В. Моделирование диффузии и адсорбции поверхностно-активных компонент смазочного материала при граничном трении // Трибология – машиностроению: Труды XIV Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения А.П. Семёнова – М.: ИМАШ РАН, 2022. – С. 35–38.
- [6] Цветков Ю.Н., Власов М.Ю., Дехтярь Л.И. Природа вязкостно-температурной зависимости смазочных масел // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2017. – Т. 9. – № 6. – С. 1242–1251.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АРМИРОВАННЫХ ФЕНОЛФОРМАЛЬДЕГИДНЫХ КОМПОЗИТОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ДИСПЕРСНЫМИ ДОБАВКАМИ

¹Панова М.О.*, ¹Буяев Д.И., ²Храмова С.А.

* maxi4@list.ru

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт элементоорганических соединений им. А. Н. Несмеянова Российской академии наук, Москва, Россия;

² Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия.

Разработан двухкомпонентный антифрикционный дисперсный модификатор фенолформальдегидных связующих для волокноармированных полимерных композиционных материалов трибологического назначения, полученный путем измельчения полиоксадиазольного волокна совместно с коллоидным графитом. Методом сканирующей электронной микроскопии показано, что полученный дисперсный продукт состоит из коротких фрагментов деформированных филаментов полиоксадиазольного волокна и из чешуйчатых частиц неправильной формы. При этом покрытые слоем измельченного графита частицы полиоксадиазола, сохраняют свою термостойкость на уровне исходного волокна. При введении разработанного модификатора в композит, армированный хлопчатобумажной тканью, наблюдается снижение износа, коэффициента трения, амплитуды колебания коэффициента трения, а также температуры в зоне фрикционного контакта.

Ключевые слова: коэффициент трения, износ, фенолформальдегидная смола, хлопчатобумажное волокно, полиоксадиазольное волокно, графит.

Введение

Создание новых материалов трибологического назначения, обеспечивающих безаварийную работу узлов трения, является актуальной задачей в области разработки полимерных композиционных материалов (ПКМ) с улучшенными трибологическими свойствами.

Фенолформальдегидные (ФФ) полимеры широко применяют в качестве связующих волокнистых композитов фрикционного и антифрикционного назначения, благодаря их высокой термической, химической стойкости и износостойкости [1-2]. Хлопчатобумажный (х/б) текстолит на основе ФФ связующего является одним из первых антифрикционных ПКМ, способных работать в отсутствие внешней смазки, и

INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF REINFORCED PHENOL-FORMALDEHYDE COMPOSITES MODIFIED WITH DISPERSED ADDITIVES

Panova M.O., Buyaev D.I., Khramova S.A.

A two-component antifriction dispersed modifier of phenol-formaldehyde binders for fiber-reinforced polymer composite materials for tribological purposes has been developed, obtained by grinding polyoxadiazole fiber together with colloidal graphite. Using scanning electron microscopy, it has been shown that the resulting dispersed product consists of short fragments of deformed filaments of polyoxadiazole fiber and flaky particles of irregular shape. At the same time, polyoxadiazole particles coated with a layer of crushed graphite retain their heat resistance at the level of the original fiber. When introducing the developed modifier into a composite reinforced with cotton fabric, a decrease in wear, friction coefficient, amplitude of oscillation of the friction coefficient, and temperature in the friction contact zone is observed.

Keywords: coefficient of friction, wear, phenol-formaldehyde resin, cotton fiber, polyoxadiazole fiber, graphite.

обеспечивающих удовлетворительные трибологические показатели. Применение в качестве армирующего компонента полиоксадиазольного (ПОД) волокна в значительной степени повысило термостабильность и стойкость к истиранию изделий из ФФ композитов [3-4]. Использование дисперсных наполнителей является одним из наиболее распространенных способов регулирования свойств ПКМ. Природа и морфология частиц наполнителя могут варьироваться в широких пределах для достижения необходимого комплекса свойств материала [5-6].

Целью исследования являлась разработка антифрикционного дисперсного модификатора на основе полиоксадиазола и графита, сочетающего способность формировать дискретную поверхность

и обладающего улучшенной смазывающей способностью, для ПКМ на основе ФФ смолы, армированных х/б тканью, применяемых в узлах сухого трения.

Материалы и методы

В качестве армирующего наполнителя исследуемых ПКМ использовали промышленно выпускаемую хлопчатобумажную (х/б) ткань полотняного переплетения марки МОСТ (арт. С-М/002-94 ООО «Мальцевотекс»). В качестве связующего – фенолформальдегидную смолу марки ФЭЛ-03 (ТУ 2221-026-48090685-2014, ЗАО «Химсинтез»).

Измельчение ПОД волокна марки «Арселон» (Светлогорское ПО «Химволокно») проводили совместно с 5 мас. % графита С-1 (ТУ 113-08-48-63-90, ООО «КГП») в шаровой вибрационной мельнице с использованием металлических мелющих тел Ø 5 мм. Полученный дисперсный (ПОД+С-1) модификатор вводили в спиртовой раствор ФФ связующего перед пропиткой армирующей х/б ткани в количестве 1, 5 и 10 мас. % (по сухой смоле). Образцы ПКМ для испытаний получали прямым прессованием из препрегов, $R_{уд} = 25$ МПа, $T_{пр} = 155 \pm 5$ °С, время выдержки 2 мин на 1 мм толщины образца.

Морфологию поверхности волокон и полученных продуктов измельчения изучали методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). В работе использовался сканирующий электронный микроскоп JSM-6000PLUS (JEOL, Япония) с предварительным напылением на поверхность электропроводящего покрытия.

Термогравиметрический анализ (ТГА) проводили на приборе Derivatograph-C, (MOM, Венгрия). Нагрев образцов массой ~20 мг проводили на воздухе в диапазоне 20 – 1000 °С, со скоростью нагрева 10 °С/мин.

Трибологические испытания проводили на машине торцевого трения И-47 (Россия) по схеме «диск-плоскость» при $P = 0,1$ МПа и скорости 0,5 м/с, время испытания – 60 мин. Коэффициент сухого трения по стальной поверхности фиксировался непрерывно, массовый износ – после испытания. Замер температуры в зоне фрикционного контакта проводился непрерывно на расстоянии 1 мм от поверхности контртела с помощью термодпары.

Результаты и обсуждение

По данным СЭМ, дисперсный продукт (ПОД+С-1), полученный путем измельчения ПОД волокна с 5 мас. % графита С-1, состоит из коротких фрагментов деформированных филаментов волокна

ПОД, и из чешуйчатых частиц неправильной формы, геометрические размеры которых достигают 200-250 мкм (рис. 1).

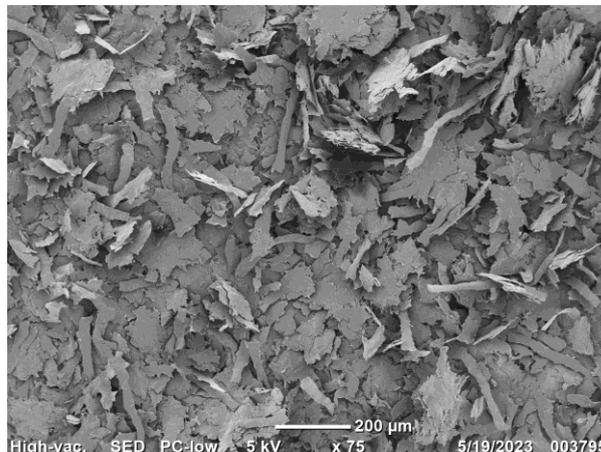


Рис.1. Фотография СЭМ дисперсного продукта измельчения ПОД волокна с графитом С-1

Согласно данным ТГА, измельчение ПОД волокна приводит к снижению термостойкости. Минимальная температура начала термического распада снижается с 460 °С (у волокна) до 425 °С (у порошка), что, вероятно, обусловлено повышенной интенсивностью протекающих термоокислительных процессов. При совместном измельчении, удается получить частицы ПОД, покрытые слоем измельченных частиц графита, предохраняющего полученный ПОД продукт от термоокисления, поэтому минимальная температура начала термического распада в данном случае близка к показателю исходного волокна и составила 455 °С.

При исследовании трибологических свойств ФФ ПКМ, армированного х/б тканью, было показано, что трение этого композита сопровождается высокой амплитудой колебания коэффициента трения, а его значение составило 0,36. Введение в ФФ связующее порошка ПОД+С-1 в композит позволяет снизить коэффициент трения и амплитуду его колебания (рис. 2). При этом в значительной степени снижается износ, а также температура в зоне фрикционного контакта исследуемых ПКМ (табл. 1).

Табл. 1. Трибологические свойства ФФ композитов, армированных хлопчатобумажной тканью, и модифицированных порошком ПОД+С-1

Количество вводимого модификатора (по сухой смоле)	Износ, мг	$T_{фр.макс}^*$, °С
Без модиф.	2,7	41,8
1 %	1,3	35,3
5 %	1,1	31,1
10 %	1,9	32,3

* максимальная температура в зоне фрикционного контакта

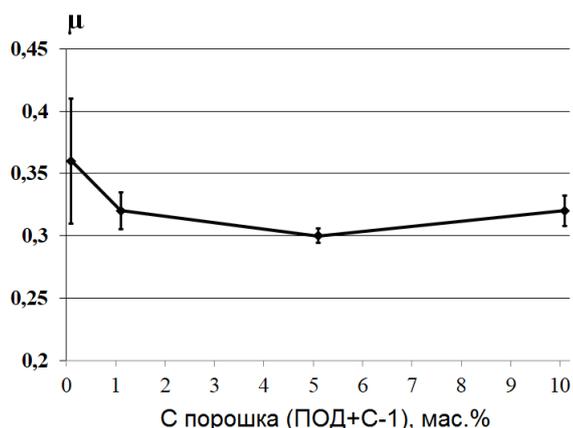


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения и амплитуды его колебания для ПКМ, армированных х/б тканью, от количества вводимого порошка ПОД+С-1 (С, мас.%) в ФФ связующее

Вероятно, в процессе скольжения по стали поверхности трения исследуемых образцов ПКМ присутствуют дисперсные частицы антифрикционного кристаллического полимера - ПОД, которые способны сформировать дискретный контакт. Кроме того, присутствие измельченных частиц графита С-1 на поверхности более крупных частиц измельченного ПОД волокна облегчает сдвиговые усилия при скольжении.

Лучшие трибологические свойства достигаются у ПКМ, наполненного 5 мас. % разработанного двухкомпонентного дисперсного модификатора ПОД+С-1.

Заключение

Разработан новый тип дисперсного антифрикционного модификатора ПКМ, полученного путем измельчения ПОД волокна совместно с графитом С-1.

ФФ композиты, армированные х/б тканью, модифицированные полученным порошком ПОД+С-1 обладают повышенной износостойкостью и низкими значениями коэффициента трения, амплитуды его колебания, а также фрикционной температуры в условиях сухого трения по стали.

Результаты проведенного исследования могут использоваться для расширения промышленного ассортимента антифрикционных самосмазывающихся ПКМ, разрабатываемых на основе общедоступных сырьевых материалов и технологий переработки.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

- [1] Алиева А.П.К. Композиционные материалы на основе фенолформальдегидных смол //Промышленное производство и использование эластомеров. – 2021. – №. 1. – С. 34-43.
- [2] Kumar N. et al. The evolution of brake friction materials: a review // Materials Physics & Mechanics. – 2021. – Т. 47. – №. 5. – С. 796-815.
- [3] Sharifullin S. N. et al. Tribotechnical tests of layered polymers //Tribology in Industry. – 2020. – Т. 42. – №. 1. – С. 81.
- [4] Буяев Д.И. и др. Влияние химического строения полиарамидных и полиоксадиазольных волокон на трение органопластов // Трение и износ. – 2016. – Т. 37. – №. 4. – С. 452-459.
- [5] Li D. et al. Effect of several modifiers on the mechanical and tribological properties of phenol formaldehyde resin //High Performance Polymers. – 2018. – Т. 30. – №. 5. – С. 580-590.
- [6] Zhang E. et al. Tribological behavior of phenolic resin-based friction composites filled with graphite // Materials. – 2021. – Т. 14. – №. 742. – С. 1-13.

ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАСЛЯНЫХ СОЖ

¹Пилюгин С.М. *, ¹Тюленев Д.Г. ²Гильманов Т.В., ²Шолом А.В., ²Абрамов К.А.

* rosoil@rosoil.ru

¹ООО «Хозрасчетный творческий центр Уфимского авиационного института», Уфа, Россия;

²ФВГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», Уфа, Россия.

Представлены результаты лабораторных испытаний смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) «Росойл-МР-7» ТУ 0258-020-06377289-2002 с различной концентрацией беззольной противозадирной присадки ПЗ-5. Проведен сравнительный анализ триботехнических характеристик с исходной СОЖ. Показано влияние присадки на триботехнические характеристики СОЖ при формообразовании внутренней резьбы бесстружечным метчиком.

Ключевые слова: смазочно-охлаждающая жидкость, присадка, трение, износ.

Смазочно-охлаждающие жидкости являются важным элементом в процессах обработки металлов. Они применяются для охлаждения режущего инструмента и обрабатываемой поверхности, снижения трения и износа, повышения антикоррозионной стойкости. С ростом требований к производительности и надежности оборудования увеличиваются и требования к смазочно-охлаждающей жидкости [1-5]. Применение СОЖ при обработке резанием сталей и сплавов позволяет существенно увеличить стойкость инструмента и обеспечить хорошее качество обработанной поверхности детали.

Жидкость смазочно-охлаждающая «Росойл-МР-7» представляет собой масляную СОЖ для различных процессов металлообработки. Она изготавливается на основе минеральных масел и функциональных присадок.

В ряде опубликованных работ трибологические свойства жидкостей оценивают по коэффициенту трения в парах металл - металл или металл - абразивный инструмент [6,8-10]. Проведенные модельные и станочные испытания более десяти составов водных и масляных СОЖ показали, что наиболее информативным показателем с точки зрения стойкости инструмента является не коэффициент трения, а нагрузка сваривания R_s , которая определяет предельную работоспособность

INCREASING THE TRIBOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF OIL METAL CUTTING FLUIDS

Piliugin S.M., Tulenev D.G., Gilmanov T.V., Sholom A.V., Abramov K.A.

The article presents the results of laboratory tests of the metal cutting fluid (MCF) "Rosoil-MR-7" TU 0258-020-06377289-2002 with different concentrations of the ashless additive PZ-5. A comparative analysis of the tribological characteristics with the original MCF is carried out. The effect of the additive on the tribological characteristics of the CFL during the formation of internal threads with a chipless tap is shown.

Keywords: metal cutting fluid, additive, friction, wear.

смазочного материала и определяется по ГОСТ 9490-75 на четырехшариковой машине трения.

Основным требованием к СОЖ является снижение трения и износа в паре инструмент-заготовка. Современные технологии металлообработки характеризуются большими нагрузками и скоростями, поэтому требуется смазывающая жидкость, которая обеспечит надежное снижение трения и износа поверхностей инструмента.

Для нашей страны актуально развитие производства конкурентоспособных СОЖ, обеспечивающих исключение зависимости от импортной продукции. Перспективным направлением является модификация состава смазочно-охлаждающей жидкости с использованием инновационных присадок, которые позволяют повысить триботехнические характеристики СОЖ, что приводит к увеличению ресурса металлообрабатывающего оборудования и оснастки, а также повышению производительности труда [7,11-14].

Материалы и методы исследования

Одной из применяемых СОЖ в отечественном производстве является СОЖ «Росойл-МР-7», которая представляет собой смесь растительных и минеральных масел, легированную функциональными присадками. Применяется при обработке резанием конструкционных углеродистых

среднелегированных сталей на операциях точения, фрезерования, сверления, глубокого сверления, растачивания, развертывания, резбонарезания. Преимуществами являются высокие противозадирные свойства, не содержит хлора, фосфора, азота. Физико-химические показатели представлены в таблице 1.

Табл. 1. Физико-химические показатели СОЖ «Росойл МР-7» по ТУ 0258-020-06377289-2002

№	Показатель	Норма
1	Внешний вид и цвет	маслянистая жидкость коричневого цвета
2	Плотность при 20 °С, г/см ³ , в пределах	0,800 - 0,930
3	Кинематическая вязкость при 50 °С, мм ² /с (сСт), в пределах	23,00 - 30,00
4	Температура вспышки в открытом тигле, °С, не ниже	180
5	Коррозионное воздействие на стали марок 40,45, 50 по ГОСТ 1050	выдерживает
6	Кислотное число, мг КОН/г, не более	2,0
7	Смазывающие свойства на четырехшариковой машине трения при 20 ⁰ С: - нагрузка сваривания, Р _с , Н (кгс), не менее	335 кгс

Лабораторные испытания СОЖ «Росойл-МР-7» с присадкой проводились в «Лаборатории испытаний технологических смазочных материалов ООО «ХТЦ УАИ»».

Для определения основных трибологических характеристик смазочных материалов были подготовлены составы «Росойл-МР-7» с 1%, 3% и 5% содержанием присадки по массе. Испытания проведены на четырехшариковой машине трения ЧМТ-1 по ГОСТ 9490-75 с частотой вращения шпинделя $n = 1460 \pm 70 \text{ мин}^{-1}$, определена нагрузка сваривания, а также диаметр пятна износа при времени испытания $t = 1 \text{ ч}$ и нагрузке $P = 20 \text{ кгс}$.

Проводились сравнительные испытания СОЖ на операции формообразования внутренней резьбы М12 в гайках из стали 10 методом пластического деформирования металла бесстружечными метчиками (раскатниками), а также на операции формообразования внутренней резьбы М12 в гайках из стали 10 методом нарезания метчиком. Оценку эффективности СОЖ проводили по величине крутящего момента резбонарезания. Следует

отметить, что эти экспресс-методы показывают эффективность СОЖ для процессов металлообработки и хорошо коррелируют с другими методами испытаний [2].

Результаты и их обсуждение

В таблице 2 представлены результаты испытаний СОЖ «Росойл-МР-7» с различным содержанием присадки на четырехшариковой машине трения по ГОСТ 9490-75.

Табл. 2. Триботехнические показатели СОЖ

№ п/п	Смазочно-охлаждающая жидкость	Нагрузка сваривания Р _с , кгс	Диаметр пятна износа при 20 кгс, 1 час, мм
1	«Росойл-МР-7»	400	0,75
2	«Росойл-МР-7» + 1% присадки	447	0,84
3	«Росойл-МР-7» + 3% присадки	473	0,86
4	«Росойл-МР-7» + 5% присадки	500	0,89

По полученным результатам выявлено, что данная присадка, с увеличением содержания в СОЖ повышает нагрузку сваривания. Так для «Росойл-МР-7» с 5% содержанием присадки нагрузка сваривания увеличилась на 25% по сравнению с исходным «Росойл-МР-7», но при этом диаметр пятна износа увеличился на 18,7% для 5-го % состава.

Результаты испытаний СОЖ на операции формообразования внутренней резьбы М12 в гайках из стали 10 методом пластического деформирования металла бесстружечным метчиком (раскатником) представлены на рисунке 1.

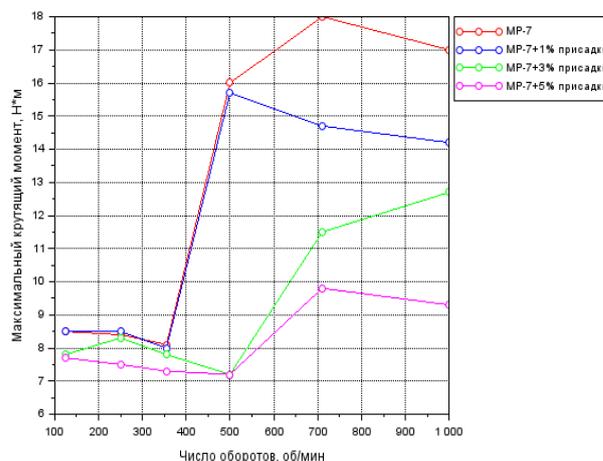


Рис. 1. График зависимости максимального крутящего момента от числа оборотов шпинделя на операции раскатки внутренней резьбы М12

Данные результаты показывают, что добавление присадки положительного повлияло на эффективность СОЖ «Росойл-МР-7», снизив крутящий момент при металлообработке.

Заключение

В результате проведенных исследований выявлено:

1. Применение противозадирной присадки ПЗ-5 в СОЖ «Росойл-МР-7» увеличивает нагрузку сваривания поднялась на 25% для «Росойл-МР-7» с 5-ым % содержанием присадки по сравнению с исходным МР-7, но при этом увеличился диаметр пятна износа на 18,7% при нагрузке 20 кгс и времени испытания 1 час по сравнению с исходной смазочно-охлаждающей жидкостью МР-7.

2. Данная присадка позволила снизить крутящий момент на операциях формообразования внутренней резьбы гаск М12 (материал - сталь 10) при методе пластического деформирования металла бесстружечным метчиком (раскатником). Наибольшее влияние присадки наблюдалось при её концентрации в СОЖ 5% и при скорости обработки $n = 500$ об/мин., где крутящий момент снизился в 2,2 раза. При увеличении скорости до 700 и 1000 об/мин., крутящий момент снизился в 1,8 раза, по отношению к СОЖ «Росойл-МР-7» без присадки.

[1] Дроздов Ю.Н., Буяновский И.А., Гостев Ю.В., Заславский Р.Н., Новиков В.И. Повышение антифрикционных и противоизносных свойств смазочных материалов путем введения композиции присадок различной природы и происхождения // Сб. докл. междунар. конгресса "Механика и трибология транспортных систем - 2003". Т. 1. – Ростов н/Д: РГУ путей сообщения, 2003. – С. 323-327.

[2] Берлинер Э.М. Буяновский И.А. Подбор смазочно-охлаждающих жидкостей для обработки металлов резанием с учетом их смазочных и охлаждающих свойств // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2012. – № 6. – С. 34-37.

[3] Технология обработки конструкционных материалов / под ред. П.Г. Петрухи. – М.: Высш. шк., 1991. – 512 с.

[4] Энтелис С. Г. и др. Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки металлов резанием: справочник / Под общей ред. С.Г. Энтелиса, Э. М. Берлинера. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.

[5] Дроздов Ю.Н., Юдин Е.Г., Белов А.И. Прикладная трибология (трение, износ, смазка в технических системах): Монография / Дроздов Ю.Н. – М.: Изд. «ЭкоПресс», 2010. – 604 с.

[6] Шашин А.Д. Исследование влияния СОЖ на процесс взаимодействия инструмента и заготовки при обработке металлов резанием: дисс. канд. технич. наук: 05.03.01: Московский государственный индустриальный университет / Шашин Андрей Дмитриевич. – М.: ГОУ МГИУ, 2003. – 118 с.

[7] Годлевский В. А. О совместном действии трибоактивных компонентов различной химической природы в составе СОТС / В. А. Годлевский, В. В. Марков // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. – Рыбинск: 2014. – № 4 (31). – С. 26-30.

[8] Худобин Л.В., Бердичевский Е.Г. Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке – М.: Машиностроение, 1977. – 189 с.

[9] Кисель А. Г. Повышение эффективности токарной обработки нежестких заготовок на основе рационального выбора СОЖ: дис. канд. техн. наук: 05.02.07: Омский государственный технический университет / Кисель Антон Геннадьевич. – Омск: ОмГТУ, 2018. – 175 с.

[10] Шолом А.В. Охлаждающие и триботехнические характеристики масляных смазочно-охлаждающих жидкостей. // Вестник УГАТУ. – 2023. – Т.27. № 2 (100) – С. 148-153.

[11] Патент РФ № 2777395 МПК G01N 33/30, G01N3/56, G01N 11/00, СПК G01N3/56, G01N11/00, G01N33/30 Способ оценки комплексной эффективности смазочно-охлаждающей жидкости / Абрамов К.А., Шолом А.В., Пилюгин С.М., Головин В.П., Крамер О.Л., Шолом В.Ю., Вагапов Р.Ф., Казаков А.М., Абрамов А.Н., Пшеничная М.А., Волкова Е.Б., Тюленев Д.Г.; Заявл. 12.07.2021, Оpubл. 03.08.2022, Бюл. №22.

[12] Худобин Л.В., Киселев Е.С. Современные СОЖ и их применение при обработке металлических заготовок резанием // Справочник. Инженерный журнал. – 2006. – № S6. – (Приложение) 2-24 с.

[13] Нигматуллин Р.Г., Шолом В.Ю., Шустер Л.Ш., Нигматуллин И.М. Повышение эффективности смазочных материалов с геомодификаторами трения // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2012. – Т. 16. – № 1(46). – С. 51-56.

[14] Шолом В.Ю., Абрамов А.Н., Савельева Н.В. Особенности трения и смазки при металлообработке // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2008. – № 12. – С. 6-11.

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕТРАЭДРИЧЕСКОГО АМОРФНОГО УГЛЕРОДНОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ТРЕНИИ

Поплавский А.И.*, Галкина М.Е., Газизова М.Ю., Ковалева М.Г., Харченко В.А.

* poplavsky@bsu.edu.ru

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»,
Белгород, Россия

Представлены результаты трибологических испытаний безводородного тетраэдрического аморфного углеродного покрытия (ta-C) при комнатной температуре и при температуре 500 °С. Показано, что ta-C покрытие, осажденное импульсным вакуумно-дуговым методом на подложки из твердого сплава, способно эффективно работать в режиме сухого трения при температуре 500 °С.

Ключевые слова: покрытие, тетраэдрический аморфный углерод, высокотемпературное трение.

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF TETRAHEDRAL AMORPHOUS CARBON COATING BY HIGH TEMPERATURE FRICTION

**Poplavsky A.I., Galkina M.E., Gazizova M.Y.,
Kovaleva M.G., Kharchenko V.A.**

Results of tribological tests of the hydrogen-free tetrahedral amorphous carbon coating (ta-C) at room temperature and at temperature of 500 °C are presented. It has been shown that ta-C coating deposited by pulsed vacuum-arc method on substrates from hard alloy is capable of operating effectively in dry friction mode at temperature of 500 °C.

Keywords: coating, tetrahedral amorphous carbon, high temperature friction.

Введение

Создание эффективных твердосмазочных покрытий является актуальной задачей для деталей, работающих при высоких температурах. В рамках решения данной задачи внимание исследователей направлено на изучение трибологических свойств покрытий из семейства аморфного алмазоподобного углерода (DLC) как водородосодержащих, так и безводородных, полученных разными методами [1, 2]. Для повышения термической стабильности DLC покрытий модифицируют их структуру, добавляя такие элементы как W и Si [3, 4].

Согласно классификации DLC покрытий (VDI 2840), покрытие ta-C имеет достаточно высокую термостойкость (500 °С). Целью данной работы является исследование трибологических свойств покрытия ta-C без водорода и без легирующих элементов при комнатной температуре и при температуре 500 °С.

Материалы и методы исследований

Покрытие ta-C толщиной 1 мкм осаждали в вакууме (3×10^{-3} Па) из углеродной плазмы, генерируемой импульсным дуговым разрядом на графитовом катоде. В качестве материала подложки использовали вольфрамкобальтовый твердый сплав (WC-Co), отполированный с одной стороны до шероховатости поверхности $Ra = 0,030$ мкм. Перед нанесением покрытия провели

ультразвуковую мойку образцов в бензине «Галоша», и атомарную очистку поверхности путем травления ускоренными ионами титана, с последующим формированием адгезионного слоя Ti (~ 50 нм) между подложкой и покрытием. Температура осаждения ta-C не превышала 100 °С.

Трибологические испытания образцов с покрытием ta-C проводили на высокотемпературном трибометре (CSM Instruments) в условиях сухого трения по схеме «шар-диск», согласно стандартам ASTM G99-23 и ISO 18535:2016, последний был разработан специально для DLC покрытий. Параметры испытаний: контртело – шар Ø 6 мм из корунда (Al_2O_3), путь трения – 1000 м, нормальная сила – 5 Н, линейная скорость – 10 см/с, радиус дорожки трения – 3 мм, температура испытаний – 23 и 500 °С. Для определения диаметра пятна износа контртела использовали оптический микроскоп Olympus GX71. При помощи контактного профилометра Sutronic были измерены профиль сечения дорожки износа образца, на основании которого вычислялся объем удаленного материала образца, а также шероховатость поверхности, согласно стандарту, ГОСТ Р ИСО 4287.

Результаты и их обсуждение

После высокотемпературных трибологических испытаний при $T = 500$ °С шероховатость поверхности образцов с покрытием ta-C

уменьшилась с $Ra = 0,114$ мкм до $Ra = 0,058$ мкм. Зависимость изменения коэффициента трения от пути трения при различных температурах испытания представлены на рис. 1. Стадия приработки при комнатной температуре $T = 23$ °C длится 10 м, а при повышении температуры испытания до $T = 500$ °C увеличивается до ~30 м. Рабочий коэффициент трения μ при комнатной температуре испытаний составляет 0,12, однако, наблюдаются единичные сильные всплески на 90 и 130 метрах пути. Эти всплески, скорее всего, связаны с образованием локальных участков разрушения покрытия ta-C (рис. 1). Такое локальное разрушение возникает в тех областях покрытия, где имеются дефекты в структуре. Эти дефекты чаще всего обусловлены оседанием на подложке твердых микрочастиц присутствующих в потоке углеродной плазмы. При повышении температуры испытаний до 500 °C коэффициент трения снижается до 0,05 и стабилен на всем пути трения. Это связано с одной стороны со снижением уровня шероховатости поверхности покрытия, при нагреве до 500 °C, а с другой с образованием твердой смазки в результате частичного переноса материала покрытия на контртело.

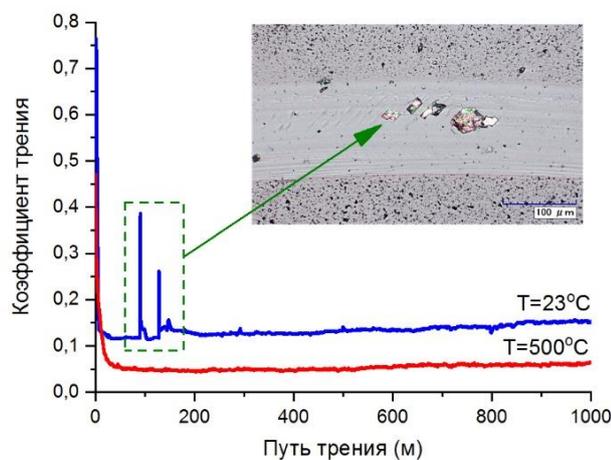


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от пути трения при трибологических испытаниях образцов с покрытием ta-C при $T=23$ °C и $T=500$ °C

Исследования влияния температуры испытаний на износостойкость показали, что при высокотемпературных испытаниях интенсивный износ покрытия ta-C в 4 раза выше, чем при комнатной температуре. В то время как износ контртела наоборот при $T = 500$ °C снижается более чем в 5 раз (табл. 1). Глубина износа покрытия при высокотемпературном трении несколько выше, чем при комнатной температуре и составляет около 30 % от исходной толщины покрытия.

Табл. 1. Коэффициент трения μ и фактор износа W_s покрытия ta-C и контртела W_k в зависимости от температуры испытаний

T, °C	W_s (ta-C), $\times 10^{-8}$ мм ³ /(Н·м)	W_k (шар), $\times 10^{-8}$ мм ³ /(Н·м)	μ
23	9,3	20,2	0,12
500	38,5	3,6	0,05

Морфология поверхности дорожек трения представлена на рис. 2. Анализ распределения продуктов износа на поверхности дорожки трения и покрытия показал, что при комнатной температуре количество продуктов износа вынесенных из области фрикционного контакта значительно больше (рис. 2 а, б). После высокотемпературных испытаний продуктов износа на дорожке трения не наблюдается (рис.2 б). Ширина дорожки трения при комнатной температуре испытаний составляет 120 мкм при диаметре пятна износа контртела 510 мкм (рис. 2 а, в). Исходя из этого, можно предположить, что основной износ покрытия происходит на дистанции до 200 м (рис. 1). Дальше в процессе трения происходит в большей степени только износ контртела. При высокотемпературных испытаниях ширина дорожки трения ta-C соизмерима с диаметром пятна износа контртела 250 и 300 мкм, соответственно (рис. 2 б, в). В результате фрикционного переноса материала на контртеле образуется углеродная графитоподобная пленка, которая выполняет роль твердой смазки, обеспечивая тем самым низкий коэффициент трения. Износ покрытия в этом режиме выше, чем при комнатной температуре, но при этом износ контртела ниже и отсутствуют локальные разрушения покрытия в виде трещин и отслоения покрытия.

Полученные импульсным вакуумно-дуговым методом покрытия ta-C имеют высокую термическую стабильность, что позволило им выдержать высокотемпературные трибологические испытания при $T = 500$ °C. Эта термическая стабильность достаточна для промышленного применения такого типа покрытий при температурах, когда жидкие смазочные материалы неэффективны.

Заключение

Покрытие ta-C, осажденное импульсным вакуумно-дуговым методом на образец из твердого сплава, показало хорошие трибологические свойства в паре трения с контртелом из Al_2O_3 при температуре 500 °C. С повышением температуры испытаний наблюдается снижение коэффициента трения и отсутствие локальных разрушений покрытия в виде образования трещин и отслоений.

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРЕСС-ФОРМ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

^{1,2}Попорецкий Д.И., ¹Прожега М.В.*, ³Ромашков Е.В., ³Крылова С.Е.

* maksim.prozhega@yandex.ru

¹Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия;

²Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия;

³Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия.

В данной работе было исследовано влияние высоких температур на износостойкость материалов для пресс-форм. Проведены испытания материалов на износ в условиях трения скольжения. Приведены оценка износа и микроскопический анализ результатов высокотемпературных испытаний опытных образцов.

Ключевые слова: материалы для пресс-форм, температурное влияние, износ, высокие температуры

Введение

Испытания на износостойкость играют важную роль в определении механических характеристик материалов и повышения ресурса оборудования. Литье под давлением (ЛПД) является одним из производительных методов получения сложных тонкостенных деталей из алюминиевых сплавов. Элементы пресс-форм для машин ЛПД должны выдерживать 25-30 тыс. запрессовок без потери свойств согласно международным стандартам [1]. Основные требования к сталям для элементов пресс-форм это: закаляемость от 56 HRC до 58 HRC, поверхностная прочность от 800 МПа до 900 МПа, прокаливаемость не ниже 52 HRC на глубине от 80 мм до 100 мм, износостойкость в условиях статического и циклического нагружения. В основном элементы пресс-форм изготавливают из среднеуглеродистых сталей типа 4X5MФС, 5ХНМ, 5ХГМ. Однако эти материалы имеют пониженную теплостойкость, ограничивая температурный диапазон эксплуатации до 350 °С. Применение новых марок легированных сталей и улучшение режимов термического упрочнения обеспечивают повышение свойств и работоспособности изделий.

Материалы и методы

Для проведения высокотемпературных трибологических испытаний на базе ИМАШ РАН использовалась установка портального типа UNITEST 750 компании DUCOM (рис. 1),

A COMPARISON STUDY ON WEAR RESISTANCE OF STAMPING MATERIALS AT HIGH TEMPERATURES

Poporetskii D.I., Prozhega M.V., Romashkov E.V., Krylova S.E.

In this paper the high temperature effect on wear resistance of molding materials was investigated. The materials were tested for wear under sliding friction conditions. The wear evaluation and microscopic analysis of high-temperature test results of samples are given.

Keywords: mold materials, temperature effect, wear.

позволяющая проводить испытания по ASTM G99 (кинематическая схема «шар-диск»).

В чашу 1 устанавливается образец в виде диска, который вращается с помощью электродвигателя 2. Контрольный образец в виде шарика диаметром 6 мм устанавливается в оправку 3. Нагрузка на образец обеспечивается перемещением поперечной балки 4, на которой установлен датчик силы 5.

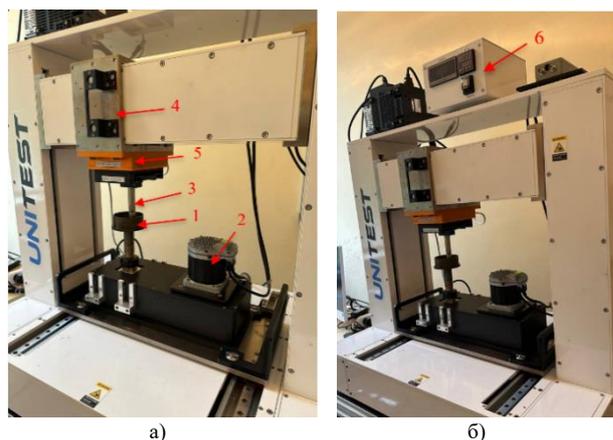


Рис. 1. Установка UNITEST 750: а) первый вид; б) второй вид

Управление температурой печи осуществляется с помощью ПИД-регулятора 6. Печка на рисунке не показана. Испытания проводились в соответствии стандарту ASTM G99 вращающийся диск – шарик, нагрузка – 10Н, скорость скольжения – 0,1 м/с, материал шарика – керамика Si₃N₄, диаметр шарика – 6 мм, время – 30 мин.

Материалы исследуемых образцов:

1. Штамповая сталь инструментального класса 70ХЗГ2ФТР(м) рекомендуется для изготовления штампов горячего деформирования и предлагается для внедрения в производство пресс-форм (пуансонов) машин литья под давлением алюминиевых сплавов. Инструмент работает в условиях ударных нагрузок и взаимодействует с жидким расплавом алюминия. Температура поверхности рабочего инструмента варьируется от 300 до 450 °С.

2. Традиционная сталь 4Х5МФС, применяемая в штамповом производстве, включая изготовление штампов и пуансонов для машин литья под давлением.

3. Высоколегированный модифицированный чугун ЧХ28(м) предназначен для деталей с высокой коррозионной стойкостью в растворах кислот, щелочей и солей, а также в газах, содержащих серу или углекислый газ. Он обладает высоким сопротивлением абразивному износу и жаростойкостью до 1100-1300 °С.

Износостойкость материалов при комнатной температуре оценивали по линейной скорости изнашивания сопряжения V .

$$V = \frac{h}{\Delta t} \text{ [мм/с]}, \quad (1)$$

где h – значение линейного износа сопряжения, мм; Δt – промежуток времени с момента начала износа контртела и до окончания эксперимента, с.

Значение линейного износа сопряжения h определялось как глубина, на которую вдавился шарик относительно начальной плоской поверхности (рис. 2) при трении. Стоит заметить, что сам шарик тоже изнашивается в процессе испытаний, вследствие чего сферическая поверхность шарика в месте контакта обретает плоскую форму.

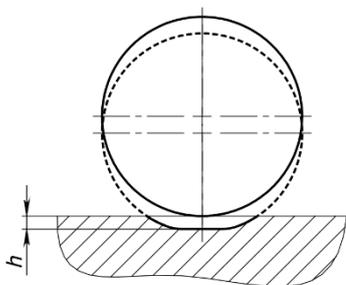


Рис. 2. Механизм линейного износа шар-диск

Определение значение линейного износа сопряжения h по данной методике изображено на рис. 3.

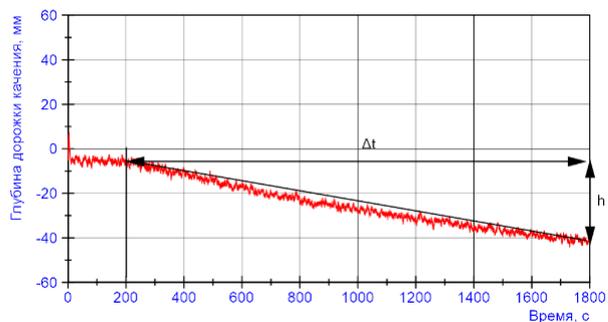


Рис. 3. График глубины дорожки качения для стали 70ХЗГ2ФТР(м) при комнатной температуре от времени.

При повышенной температуре износ материала оценивали по ширине дорожки трения.

Микроскопическое исследование поверхностей образцов после испытаний на износостойкость проводилось с использованием магнитно-силового микроскопа модели MFM-BD компании Dr.Focal.

Результаты и обсуждение

Определяющей характеристикой износостойкости в данном исследовании являлось среднее значение линейной скорости изнашивания V_{cp} . Из-за постоянного температурного расширения для образцов при повышенных температурах износостойкость определяли по среднему значению ширины дорожки трения w_{cp} . Для каждого материала при определенной температуре выполняли по 3 опыта. Результаты испытаний по определению среднего коэффициента трения k_{cp} представлены в табл. 1.

Табл. 1. Средний коэффициент трения

Материал	При температуре		
	Комнатная	300 °С	350 °С
70ХЗГ2ФТР(м) Отпуск 600 °С	0,69	0,67	0,71
4Х5МФС Стандартная ТО	0,58	0,41	0,54
ЧХ28(м) Отпуск 350 °С	0,56	–	0,61

Примечание. Опыты для материала ЧХ28(м) при температуре 300 °С проведены не были.

Из анализа табл. 1 было выявлено, что наименьшим k_{cp} обладает материал 4Х5МФС после стандартной ТО. Для всех исследуемых материалов значение k_{cp} падает при достижении 300 °С по сравнению с комнатной температурой t_k после чего возрастает при температуре $t = 350$ °С, что связано с образованием оксидных пленок на поверхности материала [2]. Так, для стали 70ХЗГ2ФТР(м) наблюдается падение k_{cp} на 3% при $t = 300$ °С и последующее увеличение на 6% при изменении температуры с 300 °С до 350 °С. k_{cp} стали 4Х5МФС вначале значительно снизился при $t = 300$ °С на 29%

относительно t_k . После чего существенно возрос на 32% при $t = 350$ °С. При изменении температуры с комнатной на 350 °С w_{cp} чугуна ЧХ28(м) увеличился на 9%.

Полученные значения средней линейной скорости изнашивания V_{cp} исследуемых сопряжений при t_k представлены на рис. 4.

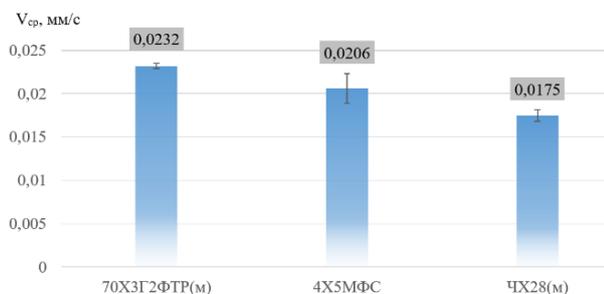


Рис. 4. Среднее значение линейной скорости изнашивания сопряжений при комнатной температуре

Оценив данные из рис. 4 можно сделать вывод, что наименьшим значением V_{cp} , следовательно и наибольшей износостойкостью, обладает сопряжение ЧХ28(м) – Si₃N₄. По сравнению со сталью 4X5МФС и сталью 70X3Г2ФТР(м) у чугуна ЧХ28(м) значение V_{cp} меньше на 15% и 25% соответственно.

Результаты микроскопического исследования ширины дорожки трения w образцов представлены в табл. 2. Дорожка трения для каждого образца измерялась в 4 точках, после чего значения усреднялись. Среднее арифметическое полученных значений для 3 образцов были приняты как средняя ширина дорожки трения w_{cp} материала при определенной температуре

Табл. 2. Средняя ширина дорожки трения

Материал	При температуре		
	Комнатная	300 °С	350 °С
70X3Г2ФТР(м) Отпуск 600 °С	744	774	652
4X5МФС Стандартная ТО	872	526	640
ЧХ28(м) Отпуск 350 °С	640	–	562

Примечание. Опыты для материала ЧХ28(м) при температуре 300 °С проведены не были.

Изучив табл. 2 заметим, что w_{cp} стали 70X3Г2ФТР(м) увеличилось на 4% в сравнении $t = 300$ °С с начальной t_k , после чего по достижению $t = 350$ °С w_{cp} уменьшилась на 16%. Для стали 4X5МФС w_{cp} уменьшилась на 40% при изменении температуры с t_k на $t = 300$ °С. По достижению

$t = 350$ °С w_{cp} увеличилась на 22% по сравнению с $t = 300$ °С. Для чугуна ЧХ28(м) видно снижение w_{cp} на 12% при увеличении температуры с t_k на $t = 350$ °С.

Отметим, что в действительности во время испытаний шарик катится по двум дорожкам (рис. 5), перескакивая между ними во время изменения силы трения.

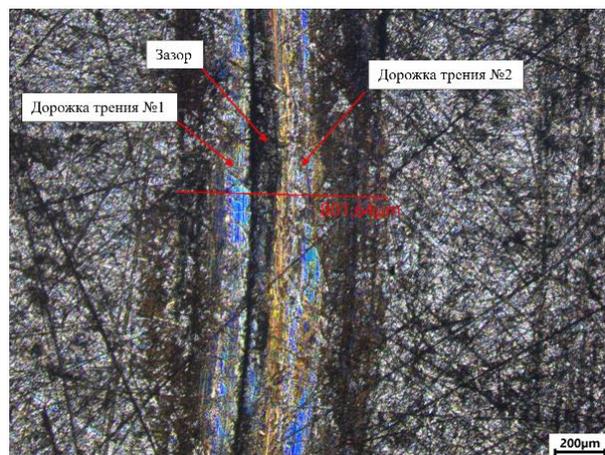


Рис. 5. Фотография с микроскопа дорожки трения стали 70X3Г2ФТР(м) при комнатной температуре

Заключение

На основании проведенных испытаний были установлены следующие выводы:

1. Прослеживается зависимость изменения коэффициента трения образцов от температуры, причем для стали 4X5МФС это изменение составило 29-32%.

2. Наиболее износостойким материалом при комнатной температуре оказалось сопряжение ЧХ28(м) – Si₃N₄, значение средней линейной скорости изнашивания которого составило 0,0175 мм/с.

3. По результатам исследования ширины дорожки трения после высокотемпературных испытаний наиболее износостойкими сопряжениями являются 4X5МФС – Si₃N₄ при температуре 300 °С и ЧХ28(м) – Si₃N₄ при температуре 350 °С.

[1] Ромашков Е.В., Крылова С.Е. Исследование механических и эксплуатационных свойств сталей для металлургического инструмента. Материаловедение, формообразующие технологии и оборудование. 2023 (ICMSSTE 2023): материалы международной научно-практической конференции (16–19 мая 2023 г.) / отв. редактор В.В. Дядичев. – Симферополь: Издательский дом КФУ, 2023. – С. 57-65.

[2] Семенов А.П. Трение и адгезионное взаимодействие тугоплавких материалов при высоких температурах; АН СССР, Гос. НИИ машиноведения. – М.: Наука, 1972. – 160 с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛОПЛАКИРУЮЩИХ НАНОТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Прокопенко А.К.*, Корнеев А.А., Морозов А.И., Береснева В.Л.

prokopenkoak@mail.ru

Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина, Москва, Россия.

Приведены результаты применения металлоплакирующих нанотехнологий на швейном, обувном, трикотажном оборудовании, оборудовании механических цехов и транспортных средствах, Рассмотрены основные направления совершенствования технологий для повышения срока службы и снижения энергопотребления оборудования за счет использования новых материалов и обрабатываемого инструмента

Ключевые слова: металлоплакирующие смазочные материалы, технологические среды и гидравлические жидкости, многофункциональные металлосодержащие покрытия.

Предприятия легкой промышленности оснащены огромным количеством различного по назначению и сложности оборудованием, от работоспособности которого зависит качество выпускаемой продукции.

Узлы трения используемого оборудования в большинстве случаев работают в условиях ограниченной подачи смазочного материала при высоких нагрузках и скоростях, что приводит к повышенному износу трущихся деталей и значительным затратам на их замену или ремонт.

Специалистами по разработке и эксплуатации оборудования постоянно ведутся работы по снижению потерь на трение и увеличению срока службы механических систем.

Учеными Российского государственного университета им. А. Н. Косыгина в течении многих лет разрабатываются технические мероприятия по улучшению работоспособности узлов трения, исполнительных органов и режущего инструмента основного и вспомогательного оборудования предприятий легкой промышленности, в том числе за счет использования металлоплакирующих нанотехнологий [1].

Сущность предлагаемых технологий в том, что на поверхностях трения деталей при их изготовлении, обкатке и эксплуатации формируется самовосстанавливающаяся металлосодержащая

RESULTS AND PROSPECTS OF USING METAL-COATING NANOTECHNOLOGY TO IMPROVE THE PERFORMANCE OF EQUIPMENT OF LIGHT INDUSTRY ENTERPRISES

Prokopenko A.K., Korneev A.A., Morozov A.I., Beresneva V.L.

The results of the application of metal-coating nanotechnology on sewing, shoe, knitting equipment, machine shop equipment and vehicles are presented, the main directions of technology improvement to increase the service life and reduce energy consumption of equipment through the use of new materials and processing tools are considered

Keywords: metal-coating lubricants, process media and hydraulic fluids, multifunctional metal-containing coatings.

пленка толщиной 0,1...1,0 мкм, защищающая детали от изнашивания, в том числе и водородного износа.

Защитная пленка может быть сформирована на всех этапах изготовления и эксплуатации деталей машин:

- во время придания детали нужной формы резанием или пластическим деформированием за счет металлоплакирующих смазочно-охлаждающих жидкостей;

- во время обработки поверхности детали поверхностно-пластическим деформированием или фрикционным натиранием в металлоплакирующих рабочих средах;

- в период обкатки (приработки) узлов трения машин в сборе в металлоплакирующих обкаточных средах;

- во время эксплуатации трущихся деталей подачей в зону трения металлоплакирующего смазочного материала.

Технологии могут быть реализованы применением металлоплакирующих смазочно-охлаждающих жидкостей, технологических рабочих сред, смазочных материалов.

Технологические среды могут быть в виде жидкостей, паст или необходимый для пленкообразования металл может входить в состав инструмента (при фрикционном натирании) [2].

Также могут быть использованы обычные рабочие среды или смазочные материалы (жидкие, пластичные, твердые) путем введения в них металлоплакирующего компонента (добавки) при их изготовлении или перед введением в узел трения.

Отличительной особенностью вновь разработанных и используемых металлосодержащих добавок является их высокие поверхностно-активные характеристики при полной растворимости в рабочих средах, что позволяет при их малых концентрациях (сотые доли процента от массы масла) получать уменьшение износа деталей узлов трения не менее чем в 1,5...2 раза; снизить потери на трение не менее чем на 30%; сократить время приработки (обкатки) механических систем до 4 раз; уменьшить уровень шума узлов трения на 10...15 дБ.

Результаты многолетнего опыта применения металлоплакирующих нанотехнологий:

Швейное, трикотажное и обувное оборудование:

- уменьшение износа трущихся деталей не менее чем в 2 раза;
- снижение потребления электроэнергии до 20%.

Инструмент скользящего резания древесины, ткани и полимерных материалов:

- увеличение стойкости в 2...4 раза.

Обработка натуральных и синтетических нитей и пряжи:

- снижение обрывности нитей до 30%;
- уменьшение износа направляющих;
- снижение электростатического поля в зонах трения нити до 10 раз.

Компрессоры воздушные и холодильных машин:

- сокращение времени обкатки до 4 раз;
- снижение потерь на трение до 30 %;
- исключение задиров и заклиниваний в начальный период работы;

Вентиляционные системы и электродвигатели приводов:

- повышение надежности и долговечности в 5-10 раз.

Гидравлические системы:

- повышение срока службы цилиндров и направляющих до 2 раз;
- увеличение надежности и срока службы уплотнений в 1,5-2 раза;

Металлорежущие станки и прессы:

- уменьшение износа направляющих прессов и станков в 1,5-2 раза;
- повышение общего ресурса гидросистем в 1,5-2 раза;
- снижение потерь на трение в зубчатых, винтовых передачах, в подшипниках скольжения на 30%;
- повышение износостойкости зубчатых пар до 1,6 раза;

- уменьшение уровня шума на 10-15 дБ;
- увеличение сохранения класса точности станка в 1,5-2 раза.

Внутризаводской транспорт:

- повышение срока службы двигателей внутреннего сгорания до 30 % в целом (снижение износа гильз цилиндров до 2,5 раз, содержания СО в выхлопных газах до 8%);
- повышение сроков службы узлов трения транспортеров и транспортных тележек до 2 раз.

Опыт показал, что металлоплакирование не может восстановить трущиеся детали до их первоначальных размеров, но дает возможность продлить работоспособность и сроки службы сопряжений, в том числе тех у которых значение износа достигло критических величин.

Последние годы в различных организациях ведутся активные работы по использованию фторорганических соединений для формирования на рабочих поверхностях трущихся деталей антифрикционных покрытий [3].

Отечественная промышленность освоила производство широкий спектр подобных фторорганических композиций разного назначения.

При их использовании отмечается снижение потерь на трение и повышение износостойкости деталей различных механических систем и режущего инструмента.

Проведенные нами в последнее время работы показывают возможность формирования многофункциональных покрытий на трущихся поверхностях за счет применения металлосодержащих и фторсодержащих соединений одновременно.

При этом образуется покрытие толщиной в десятые доли микрометра, обладающее улучшенными триботехническими характеристиками. Отмечается особая эффективность от нанесения покрытий при ограниченной подаче смазочного материала.

В настоящее время проводятся исследования по определению режимов формирования этих композиционных покрытий на деталях из различных материалов.

[1] Беляев В.И., Голубев А. П., Прокопенко А.К. Теоретические основы повышения ресурса оборудования и режущего инструмента предприятий легкой промышленности плакирующими нанотехнологиями: монография. –М.-РИО МГУДТ, 2014 – 97 с.

[2] Корнеев А.А., Прокопенко А.К., Голубев А.П., Терешкин С.А. Финишная антифрикционная обработка деталей узлов трения машин: монография: – М: ФГБОУ ВПО «МГУДТ», 2015. – 98 с.

[3] Вохидов А.С., Добровольский Л.А. Эпиламирование: эффективный метод создания нанопленок. // Наноиндустрия. – №4. – 2012. – С. 32-35.

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ТОРЦОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ

Пухальский В.А., Офицеров О.О.*

* ofitserov@imash.ru

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия.

В статье рассматриваются факторы, оказывающие влияние на эффективность процесса торцового чернового фрезерования. Анализируется влияние температурных и силовых факторов на выход из строя режущего инструмента.

Ключевые слова: фрезерование, параметры фрезерования, процесс торцового фрезерования, торцовая фреза, процесс резания, режимы резания.

Введение

Отказы при торцовом черновом фрезеровании наиболее часто происходят в результате выхода из строя режущих лезвий фрез. Анализируя характер выхода из строя режущих лезвий из твердого сплава, в процессе фрезерования можно выделить два неблагоприятных случая, которые резко сокращают стойкость инструмента.

Первый случай – образования трещин на режущем лезвии и последующее выкрашивание его частиц.

Второй случай - поломка режущей пластины.

Поломка является особо неблагоприятным видом выхода из строя режущих лезвий, т.к. приносит наибольший ущерб – уносятся значительные части режущих пластинок, а отколовшийся кусок обычно повреждает опорную поверхность под пластинкой, что вызывает повышенные затраты при восстановлении режущих свойств инструмента.

Основная часть

Авторы различных работ указывают на два основных фактора, присутствующих и определяющих процесс резания. Это тепловой и силовой факторы.

Изучением влиянием тепла на режущую способность инструмента занимались многие исследователи.

Так Василько К. провел ряд экспериментов [1], применяя при прерывистом точении нагрев и охлаждение (рис.1).

Нагрев режущего лезвия резца производился газовой горелкой в процессе холостого хода. С повышением температуры режущего лезвия

ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE EFFICIENCY OF THE FACE MILLING PROCESS

Pukhalsky V.A., Ofitserov O.O.

The article considers the factors influencing the efficiency of the process of face rough milling. The influence of temperature and force factors on cutting tool failure is analyzed.

Keywords: milling, milling parameters, face milling process, face mill, cutting process, cutting modes.

стойкость инструмента увеличивается. Аналогичные результаты были получены и для торцовых фрез, при помещении фрезы в пламя газовой горелки.

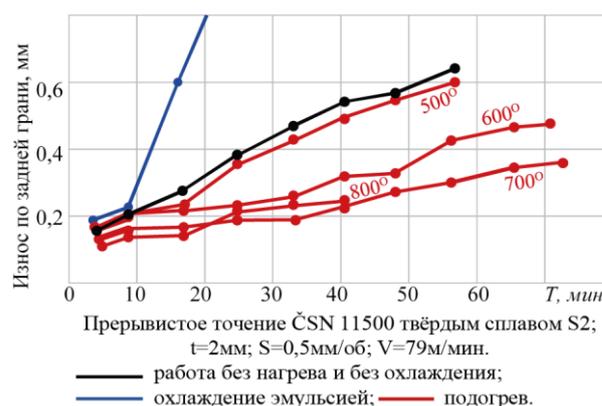


Рис. 1. Влияние нагрева и охлаждения при прерывистом резании

Калянич И. провел эксперимент [2] произведя предварительный нагрев перед работой как фрезы, так и заготовки. В связи с ухудшением теплоотвода стойкость фрезы уменьшилась.

Эксперименты, проведенные Бердниковым Л.Н., показали [3], что циклы нагрева-охлаждения снижают усталостную прочность твердосплавных пластин. С увеличением температуры количество циклов нагружения до появления трещин на поверхности пластин уменьшается.

Грудов П.П., Волков С.И. и Харламов М.С. исследуя [4] охлаждение торцовых фрез, получили снижение стойкости твердосплавных фрез.

Таким образом видим, что основное влияние на стойкость твердосплавных пластин оказывают не столько нагрев или охлаждение, а величина перепада, то есть теплового удара.

Ряд авторов предлагает бороться с этим явлением путём придания фрезе определенного смещения относительно заготовки.

Этин А.О. теоретически получила [5] зависимость для определения скорости нарастания сечения срезаемого слоя на входе режущего лезвия в заготовку.

Влияние этой скорости, а следовательно, и влияние входа режущего лезвия в заготовку на стойкость фрез было подтверждено экспериментальными данными, полученными ей же и Зоревым Н.Н. [6], где стойкость изменялась до пяти раз.

Подобные зависимости получены при обработке чугуна Грудовым П.П. и Харламовым М.С. [7] (рис. 2) и Ильченко Н.Н. [8].

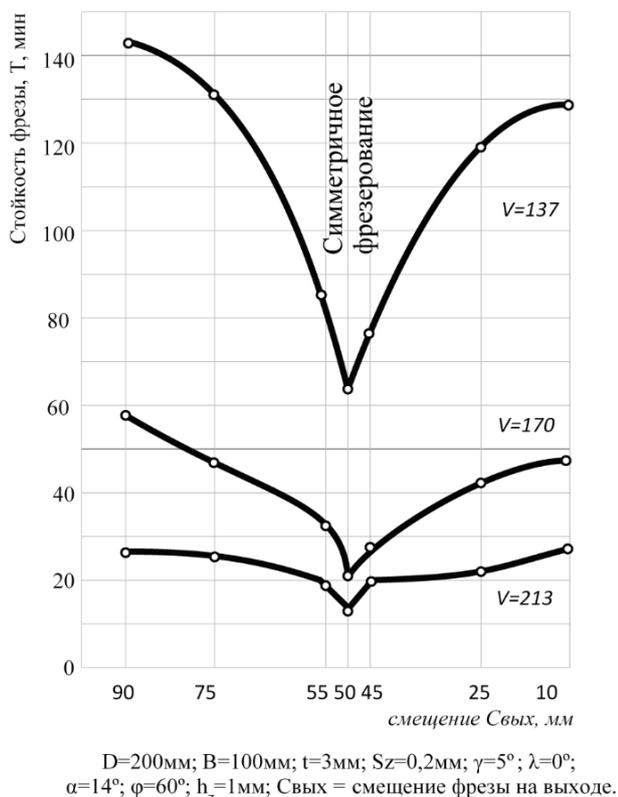


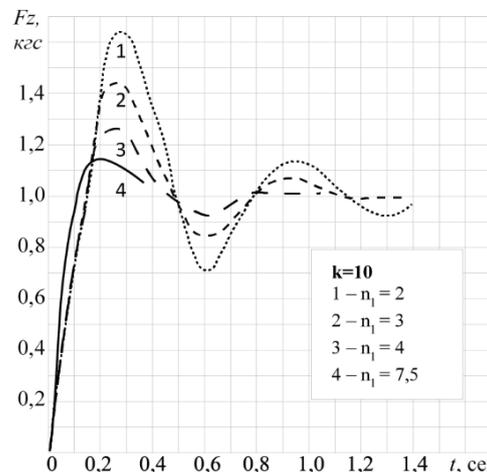
Рис. 2. Влияние смещения фрезы на ее стойкость

Кроме того, в этих же работах авторами проведены опыты по определению влияния смещения на ломающую подачу, то есть на прочность инструмента. Прочность инструмента уменьшается с увеличением смещения на выходе из заготовки. Это говорит о наличии ударного входа зуба фрезы в заготовку.

Андреев Г.С., исследуя теоретически и практически [9] влияние входа инструмента в заготовку получил всплески сил и соответствующие им резкие падения скорости резания. (рис. 3).

Ильченко Н.Я., Мироненко А.С. и Петрусенко Л.А. доказали [10], что удар при

прерывистом резании существует, но качественно отличается от классического удара свободно падающего тела.



Расчёт согласно уравнению: $\frac{d^2 z}{dt^2} + 2n \frac{dz}{dt} + k z = 0$; $2n \frac{ae}{m}$
 $k = \frac{c}{m}$ m – масса ползуна станка; Fz – сила резания;
 C_z – коэффициент, характеризующий упругие свойства системы;
 ae – коэффициент, характеризующий рассеяние энергии в системе.

Рис. 3. Всплески сил при ударном входе

Условия получения или отсутствия всплеска на осциллограммах сил резания определяет в своей работе Кавалец М. [11].

Всплеск силы получен им при условии резания с большими скоростями и сечениями среза. Всплеска не наблюдается при малых скоростях и сечениях среза. Говоря об ударном воздействии на режущее лезвие Кавалец М. подразумевает под силой удара резкое возрастание сил от нуля при холостом ходе до определенной величины при рабочем.

Однако, измеряя силу удара при входе в заготовку, Кавалец М. принимает её равной той, которая получается на осциллограмме. Это видимо не совсем верно, т.к., например, в работе Садовы М. и Шойбер Х. [12], исследуя поведение динамометра для измерения сил резания, определили, что при различной степени демпфированности измерительной системы показания прибора могут значительно отличаться по форме от поступающего сигнала.

Заключение

Таким образом на эффективность процесса торцового фрезерования, оказывают влияние многие факторы, в том числе и рассмотренные: нагрев, охлаждение, теплосмены, удар от входа в заготовку, относительное расположение фрезы и заготовки. От их учета в процессе эксплуатации зависят стойкость и прочность инструмента, а значит и эффективность всего процесса.

- [1] Vasilko K. Zajištění trvanlivosti spojených karbidov při přenášování resi // Strojnickij. – 1966. – № 16(18). – С. 596–601.
- [2] Kuljanič E. An investigation of wear in single-tooth and multi-tooth milling // International Journal of Machine Tool Design and Research. – 1974. – №14 (1). – С. 95–109.
- [3] Бердников Л.Н. Предупреждение хрупкого разрушения режущего инструмента, обусловленного тепловой нагрузкой // Вестник Машиностроения. – 1976. – №II. – С. 62–65.
- [4] Грудов П.П., Волков С.И., Харламов М.С. Режущие свойства твердого сплава при торцовом фрезеровании стали и чугуна – М.: ЦБТИ, 1953. – С. 155.
- [5] Этин А.О. Влияние условий врезания торцовой фрезы на её стойкость // Динамика процесса резания металлов. – М.: ГНТИ Машиностроительной и судостроительной промышленности, 1953. – С. 50-70.
- [6] Зорев Н.Н. Влияние установки заготовки на стойкость фрез при торцовом фрезеровании // Вестник машиностроения. – 1962. – №8. – С. 42-46.
- [7] Грудов П.П., Добронович К.В., Красильников И.М. и др. Точение и фрезерование твердосплавным инструментом и применение охлаждающих жидкостей // Сборник работ лаборатории резания. – М.: Машгиз, 1955.
- [8] Ильченко Н.Я. Исследование прочности режущей части торцовых твердосплавных фрез в условиях тяжелого машиностроения и станкостроения: дис. к.т.н. – Краматорск, 1969.
- [9] Андреев Г.С. Исследование работоспособности режущего инструмента при периодическом резании: дис. к.т.н. – М., 1970.
- [10] Ильченко Н.Я., Мироненко А.С., Петрусенко Л.А. К вопросу об ударе при прерывистой обработке металлов резанием // Надежность режущего инструмента. – Киев–Донецк: 1975. – С. 111-113.
- [11] Kawalec M. Siły udarowe przy skrawaniu. Postępy w teorii i technice obróbki metali. // Krajowa konferencja naukowo–techniczna. – Krajow: 1973.
- [12] Sadowy M., Scheuber H. Grundlegende Zusammenhänge bei statischen und dynamischen Schnittkraftmessungen // Werkstatttechnik. – 1967. – №57(5). – С. 243-248.

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ТОРЦОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗЕРВОВ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Пухальский В.А., Офитсеров О.О.*, Бодунов Д.М.

* ofitserov@imash.ru

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия.

В статье анализируется процесс торцового фрезерования на предмет повышения его производительности. Предлагается способ повышения производительности встречного торцового фрезерования при ширине меньше половины диаметра фрезы.

Ключевые слова: процесс торцового фрезерования, торцовая фреза, процесс резания, ширина фрезерования, увеличение производительности.

Введение

При современной обработке металлических заготовок, всё так же возникают трудности, связанные с необходимостью снятия больших припусков с широких плоскостей. Это сопряжено с повышенным расходом режущего инструмента, недостаточной производительностью. Данные условия характерны и для черновой обработки при торцовом фрезеровании.

Для определения решений, повышающих эффективность процесса торцового фрезерования, произведен кинематический анализ и определение

KINEMATIC ANALYSIS OF FACE MILLING PROCESS AND DETERMINATION OF RESERVES FOR INCREASING ITS PRODUCTIVITY

Pukhalsky V.A., Ofitserov O.O., Bodunov D.M.

The article analyzes the process of face milling for improving its productivity. A method of increasing the productivity of counter face milling with a width less than half of the cutter diameter is proposed.

Keywords: face milling process, face milling cutter, cutting process, milling width, productivity increase.

возможного пути повышения производительности этого процесса.

Метод анализа

Производительность обработки при торцовом фрезеровании рассчитывается по формуле:

$$P = B \times S_{min} \times t. \quad (1)$$

где: B – ширина фрезерования, мм; S_{min} – минутная подача, мм/мин; t – глубина фрезерования, мм.

Однако, при встречном фрезеровании с шириной меньше половины диаметра фрезы (D_f) действительное значение максимальной подачи на

Оценка влияния диаметра фрезы на производительность при конкретных значениях ширины фрезерования для фрез различных диаметров приведены на рис. 3

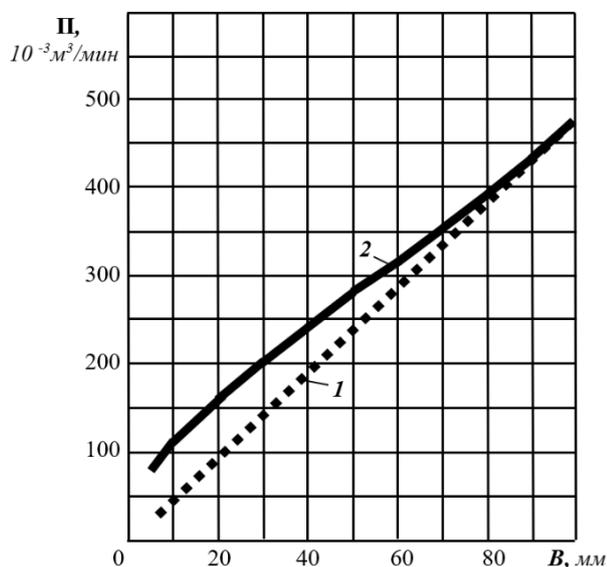


Рис. 2. Влияние ширины фрезерования (В) на производительность обработки (Pi):

1 – без учета влияния В на максимальную подачу на зуб (при $B \geq D\phi/2$); 2 – с учетом влияния В на максимальную подачу на зуб (при $B < D\phi/2$)

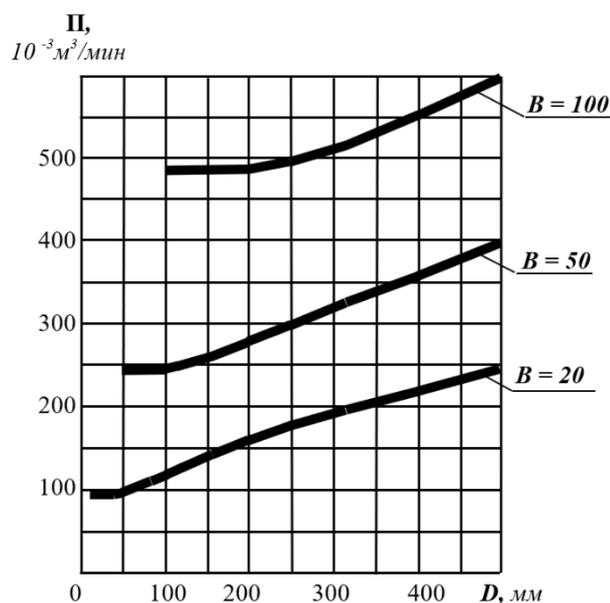


Рис. 3. Влияние диаметра фрезы (D) на производительность обработки (Pi)

Расчёт производился по формуле:

$$S_z^B = \sqrt{D_\phi \times B - B^2 - \sqrt{0,09 - 0,3 \times D_\phi + D_\phi \times B - B^2}}. \quad (20)$$

При расчете S_z^B для скорости резания $V \approx 50$ м/мин частота вращения фрезы n и количество зубьев фрез варьировались: число зубьев фрезы принимаем $z = 0,1 D\phi$; частоту вращения определяем по формуле: $n = \frac{V \times 1000}{\pi \times D\phi}$.

Выводы

При ширине встречного фрезерования меньше половины диаметра фрезы и сохранении стандартных режимов резания производительность торцового фрезерования снижается. С целью увеличения производительности обработки предложен способ коррекции подачи с учетом действительной максимальной подачи на зуб. Чем меньше подача на зуб, тем больше выигрыш по производительности.

Кроме того, определено, что производительность обработки увеличивается при увеличении диаметра фрезы.

[1] "Исследование и внедрение торцовых фрез с механическим креплением твёрдосплавных пластинок при обработке по корке чугунных корпусных деталей станков с ЧПУ" Отчет по теме АМ-131 // Всесоюзный заочный машиностроительный институт РСФСР, 1975. – 170 с.

[2] Грановский Г.И. Кинематика резания. - М.: Машгиз, 1948. – 200 с.

[3] Этин А.О. Кинематический анализ методов обработки металлов резанием. – М.: Машиностроение, 1964. – 323 с.

[3] Ермаков Ю.М. Комплексные способы эффективной обработки резанием. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.

[5] Хаэт Г.Л. Прочность режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1975. – 168 с.

[6] Ценцера А.Ю., Кушниров П.В., Ступин Б.А. Повышение эффективности чернового торцового фрезерования // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сборник научных трудов XII-ой Международной научно-практической конференции в 4-х томах, Курск, 19–20 марта 2015 года / Ответственный редактор: Горохов А.А.. Том 4. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2015. – С. 235-237.

[7] Мальхин В.В., Харченков Р.Ю. Оптимизация режима резания при торцовом фрезеровании // Молодежь и системная модернизация страны: сборник научных статей 5-й Международной научной конференции студентов и молодых ученых, Курск, 19–20 мая 2020 года. Том 5. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2020. – С. 291-297.

[8] Liu D. et al. Kinematics and improved surface roughness model in milling //The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2024. – Т. 131. – №. 5. – С. 2087-2108.

[9] Płodzień M., Żyłka Ł., Stoić A. Modelling of the Face-Milling Process by Toroidal Cutter //Materials. – 2023. – Т. 16. – №. 7. – С. 2829.

[10] Wang L. et al. Study on the Mechanism of Improving Surface Roughness of Gray Cast Iron Machining by Wiper Inserts //Manufacturing Technology. – 2024. – Т. 24. – №. 3. – С. 478-482.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕМКМПЛЕКТА ФИЛЬТРА ТОНКОЙ ОЧИСТКИ ТОПЛИВА ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ Д-243 В ДИЗЕЛЬНОМ ТОПЛИВЕ, КУКУРУЗНОМ, ПОДСОЛНЕЧНОМ РАПСОВОМ, СОЕВОВОМ МАСЛЕ

Руденко И.И.

vanya.rudenko.82@mail.ru

РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, Москва, Россия.

Рассмотрено применение ремкомплекта (ФТО) топлива дизельного двигателя в кукурузном, подсолнечном рапсовом, соевом масле и дизельном топливе. Определены упругопрочностные свойства ремкомплекта ФТО топливной системы дизельного двигателя МТЗ, ЮМЗ, Т-40, выдержанных в течении 6 месяцев в маслах растительного происхождения в дизельном топливе с полученными результатами нового образца.

Ключевые слова: фильтр, ремкомплект, резинотехническое изделие, биодобавки растительного происхождения, дизельное топливо, кукурузное масло, подсолнечное масло, рапсовое масло, соевое масло.

Постановка проблемы

Биодобавки растительного происхождения широко применяются в смеси биодизельного топлива как перспективные источники энергии и используются в дизельных двигателях автотракторной техники АПК, так как по своим свойствам, характеристикам наиболее совместимы с ДТ. Биодобавками растительного происхождения широко применяется рапсовое, яatroфовое, соевое, мадуковое, касторовое, пальмовое, подсолнечное, горчичное, рыжиковое кукурузное и другие масла. Природное растительное масло давно рассматривается как альтернативный вид биодобавок в дизельное топливо. В настоящее время мало проведено исследований по надежности (долговечности и сохраняемости) ремкомплектов фильтров тонкой очистки (ФТО) топлива при взаимодействии с природными растительными маслами. Статья посвящена исследованию надежности ремкомплект (резинотехническое изделие) фильтра тонкой очистки топлива дизельного двигателя (ДТ) которые были выдержаны 6 месяцев в товарном дизельном топливе, кукурузном, подсолнечном рапсовом, соевом масле [1-4].

Цель – определить долговечность и сохраняемость ремкомплекта фильтра тонкой очистки дизельного двигателя МТЗ, ЮМЗ, Т-40

THE RESULTS OF RESEARCH ON THE REPAIR KIT OF THE FINE FUEL FILTER OF THE D-243 DIESEL ENGINE IN DIESEL FUEL, CORN, SUNFLOWER RAPESEED, SOYBEAN OIL

Rudenko I.I.

The application of a diesel engine fuel repair kit (FTO) in corn, sunflower rapeseed, soybean oil and diesel fuel is considered. The elastic-strength properties of the FTO repair kit of the fuel system of the MTZ, YMZ, T-40 diesel engine aged for 6 months in vegetable oils in diesel fuel with the results of a new sample were determined.

Keywords: filter, repair kit, rubber product, dietary supplements of vegetable origin, diesel fuel, corn oil, sunflower oil, rapeseed oil, soybean oil.

выдержанного в течении 6 месяцев в биодобавках растительного происхождения кукурузном, подсолнечном рапсовом, соевом масле в дизельном топливе с результатами нового образца.

Способы и методы исследования

Нами были проведены исследования ремкомплекта фильтра тонкой очистки топлива рис.1 дизельного двигателя МТЗ, ЮМЗ, Т-40 выдержанного в течении 6 месяцев в маслах растительного происхождения кукурузном, подсолнечном рапсовом, соевом и дизельном топливе [5-7].

Исследования для определения долговечности сохраняемости проводили на разрыв для определения упругопрочностных свойств при растяжении согласно ГОСТ 34750 – 2021.



Рис. 1. Образец исследуемого резинотехнического изделия фильтра тонкой очистки топлива МТЗ, ЮМЗ, Т-40



Рис. 2. Ремкомплект в дизельном топливе



Рис. 3. Ремкомплект в кукурузном масле



Рис. 4. Ремкомплект в подсолнечном масле



Рис. 5. Ремкомплект в рапсовом масле



Рис. 6. Ремкомплект в соевом масле

На рис 2, 3, 4, 5, 6 представлены ремкомплекты которые были помещены в емкости с дизельным топливом, рапсовым и соевым масле. Ремкомплекты выдерживали в течении 6 месяцев для дальнейшего исследования на долговечность и сохраняемость [8].

После 6 месяцев были проведены исследования ремкомплектов с помощью разрыва. Для этого мы использовали испытательную универсальную машину РКМ 20.2, свидетельство о поверке № С-ДЮП/29-09-2023/283528415 от 29.09.2023 г. Испытания проводили в АО «НОВЫЙ РЕГИСТР», испытательный центр Московская область, г. Электросталь, проезд Восточный, д. 2, офис 1. Эта машина позволила проводить исследования на разрыв с высокой точностью и эффективностью [9-11].

Результаты исследований

После проведения исследований ремкомплектов на машине испытательной универсальной РКМ 20.2 рис. 5, были получены следующие результаты, в табл. 1 и на рис. 7-12.

Табл. 1. Результаты исследований образцов резинотехнических изделий

Наименование масел при испытании	Расчетная длина, мм	Максимальная нагрузка, Н	Прочность при растяжении, Н/мм ²	Прочность при разрыве, Н/мм ²	Относительное удлинение при максимальной нагрузке, %	Относительное удлинение при разрыве, %
Новый	22	649	3,673	2,686	192,018	193,559
ДТ	22	226,7	1,283	0,801	92,405	93,911
Кукурузное	22	641,8	3,632	3,402	197,036	197,805
Подсолнечное	22	576,8	3,264	0,027	190,732	193,777
Рапсовое	22	349,8	1,979	0,646	126,677	128,948
Соевое	22	547,9	3,1	1,128	172,723	175

Представленные исследования долговечности и сохраняемости ремкомплекта топливной системы дизельных двигателей показали, что ремкомплекты

(резинотехнические изделия) ФТО топлива дизельных двигателей МТЗ, ЮМЗ, Т-40 выдержанные 6 месяцев в дизельном топливе, кукурузном, подсолнечном рапсовом, соевом масле отражены в таблице и на графиках [11].

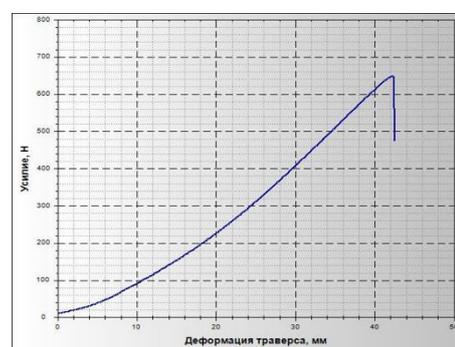


Рис. 7. Результаты исследования траверса нового образца резинотехнического изделия

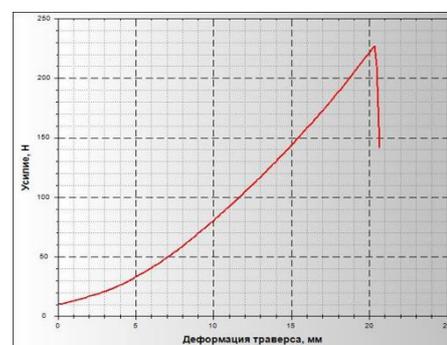


Рис. 8. Результаты исследования образца резинотехнического изделия выдержанного 6 месяцев в дизельном топливе

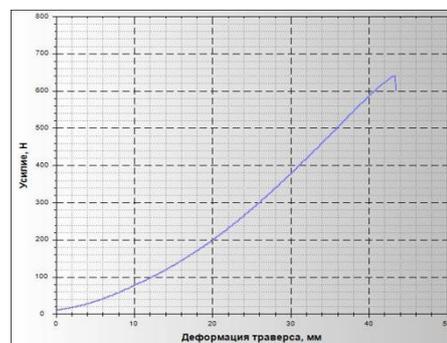


Рис. 9. Результаты исследования образца резинотехнического изделия выдержанного 6 месяцев в кукурузном масле

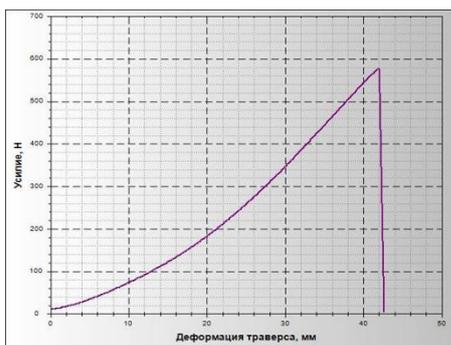


Рис. 10. Результаты исследования образца резинотехнического изделия выдержанного 6 месяцев в подсолнечном масле

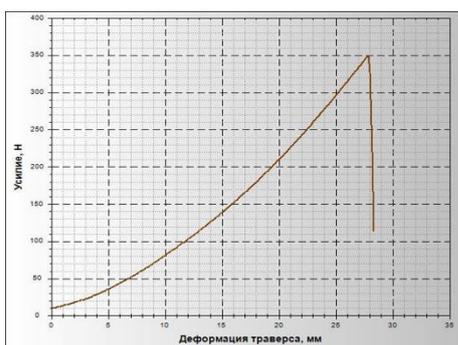


Рис. 11. Результаты исследования образца резинотехнического изделия выдержанного 6 месяцев в рапсовом масле

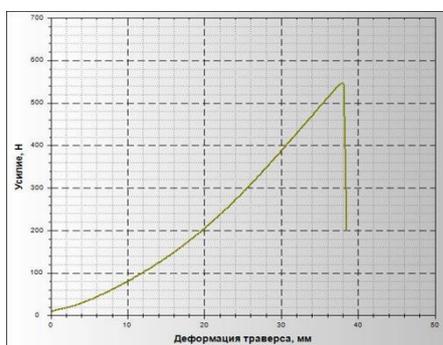


Рис. 12. Результаты исследования образца резинотехнического изделия выдержанного 6 месяцев в соевом масле

Выводы

Исследования показали, что ремкомплекты (резинотехнические изделия) фильтра тонкой очистки топлива МТЗ, ЮМЗ, Т-40 выдержанные 6 месяцев в растительных маслах (кукурузном, подсолнечном, рапсовом, соевом масле) и ДТ показали следующие результаты.

Максимальная нагрузка нового образца – 649 Н, в дизельном топливе – 226,7 Н, в кукурузном масле – 641,8 Н, в подсолнечном масле – 576,8 Н, в рапсовом масле – 349,8 Н, в соевом масле – 547,9 Н. Таким образом, видно что ДТ влияет на ремкомплект и со временем его разрушает, это

связано с содержанием в ДТ присадок, что приводит к процессу окисления ремкомплекта в ДТ и ведет к уменьшению долговечности, сохраняемости ремкомплектов.

[1] Апатенко А.С., Руденко И.И. Совершенствование элементов топливной системы дизельного двигателя при использовании биотоплива // В сборнике: Чтения академика В.Н. Болтинского. Сборник статей. – Москва, 2023. – С. 266-271.

[2] Апатенко А.С., Руденко И.И., Прибытков А.С. Влияние биотопливных композиций в дизельном топливе на параметры двигателя // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2022. – № 3. – С. 24-27.

[3] Апатенко А.С., Руденко И.И., Севрюгина Н.С. Сопоставление согласованности характеристик типовых фильтрующих элементов с работой в биотопливе из рапсового масла // Естественные и технические науки. – 2022. – № 1 (164). – С. 223-229.

[4] Голубев И.Г., Руденко И.И., Панферов В.И. Работоспособность топливной аппаратуры дизелей на топливе с биодобавками // Труды ГОСНИТИ. – 2013. – Т. 112. – № 2. – С. 51-52.

[5] Голубев И.Г., Руденко И.И. Работоспособность фильтров тонкой очистки дизелей, работающих на биотопливе // В сборнике: Научно-технический прогресс в сельскохозяйственном производстве. Материалы Международной научно-технической конференции. В 3-х томах. Редколлегия: П.П. Казакевич (гл. ред.), О.О. Дударев. – Минск: НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, 2012. – С. 243-245.

[6] Руденко И.И. Испытание дизеля на биотопливе с использованием «МОТОТЕСТЕРА МО 3-2» // Вестник московского государственного университета леса - лесной вестник. – 2010. – № 5. – С. 110-117.

[7] Руденко И.И. Повышение работоспособности топливной системы дизельных двигателей, работающих на биотопливе // диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Российский государственный аграрный университет-Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева. Москва, 2023.

[8] Глазков Ю.Е. Виды жидкого биотоплива для дизелей и пути его получения // В сборнике: Современная наука: теория, методология, практика. Материалы IV Всероссийской национальной научно-практической конференции. 2022. – С. 202-205.

[9] Доровских Д.В., Глазков Ю.Е., Доровских И.Ю., Глазкова М.М. Анализ путей улучшения дизельного топлива применением биодобавок // В сборнике: Современная наука: теория, методология, практика. Материалы 2-ой Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. 2020. С. 200-204.

[10] Глазков Ю.Е., Попов М.А. Альтернативные виды топлива. Перспективы развития // В сборнике: Импортозамещающие технологии и оборудование для глубокой комплексной переработки сельскохозяйственного сырья. материалы I Всероссийской конференции с международным участием. 2019. – С. 156-161.

[11] Руденко И. И., Шамарин Ю. А., Голубев М. И. Результаты исследований упругопрочностных свойств резинотехнических изделий дизельных двигателей ЯМЗ 236, 238, 240 // Международный технический журнал. – 2024. – № 3 (90). – С. 67–73.

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИОННЫХ ЖИДКОСТЕЙ В КАЧЕСТВЕ ПРОТИВОИЗНОСНЫХ ПРИСАДОК ДЛЯ ПОЛИАЛКИЛЕНГЛИКОЛЕЙ

Семенов Н.А.*, Пугачев Н.А., Песковец А.В., Тонконогов Б.П.

* nekits94@mail.ru

Российский Государственный Университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия.

Исследование направлено на изучение возможности синтеза ионных жидкостей, эффективных с точки зрения использования в качестве принципиально новых противоизносных присадок для смазочных масел. Полученные результаты могут быть использованы при производстве товарных смазочных масел на основе полиалкиленгликолевых масел, а также при разработке беззольных и малозольных пакетов присадок.

Ключевые слова: противоизносные присадки, ионные жидкости, полиалкиленгликоли.

Введение

Известный факт, что смазочные материалы служат для снижения трения и износа механизмов различных машин. В большинстве случаев базовые масла обладают низкими антифрикционными и противоизносными свойствами, и для их улучшения в состав вводят противоизносные присадки.

В настоящий момент наиболее широко используемыми противоизносными присадками являются диалкилдитиофосфаты цинка. Цинк и фосфор, содержащиеся в указанных присадках, увеличивают зольность смазочных масел, в то время как в мире наблюдается тенденция к снижению этого параметра и увеличение выпуска смазочных масел, именуемых Low SAPS. Более того, сера и фосфор, содержащиеся в их составе, оказывают отрицательное влияние на экологию и здоровье людей. К примеру, в настоящий момент содержание серы и фосфора в составе моторных масел, согласно классификации ILSAC GF-6, ограничено 0,6% и

EXPERIENCE IN USING IONIC LIQUIDS AS ANTI-WEAR ADDITIVES FOR POLYALKYLENE GLYCOLS

Semenov N.A., Pugachev N.A., Peskovets A.V.

The research is aimed at exploring the possibility of synthesizing ionic liquids that are effective in terms of use as fundamentally new anti-wear additives for lubricating oils. The results obtained can be used in the production of commercial lubricating oils based on polyalkylene glycol oils, as well as in the development of ash-free and low-ash additive packages.

Keywords: anti-wear additives, ionic liquids, polyalkylene glycols.

0,08% масс. соответственно, что может быть недостаточным для обеспечения необходимого уровня противоизносных свойств [1].

В этой связи становится актуальным поиск альтернативных противоизносных присадок, например, таких, как ионные жидкости.

Ионные жидкости представляют собой органические соли, остающиеся в жидком состоянии при температурах ниже 100 °C [2]. Все ионные жидкости можно разделить на три основных класса: ионные жидкости комнатной температуры, протонные и апротонные ионные жидкости. Все они, в основном, состоят из катионов и анионов, представленных на рис. 1.

С точки зрения использования в качестве противоизносных присадок, наиболее интересной является классификация по растворимости ионных жидкостей в маслах различных типов согласно классификации API [4].

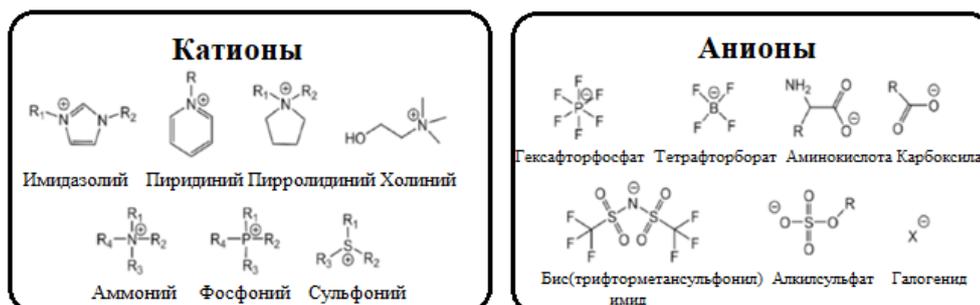


Рис. 1. Структура типичных катионов и анионов [3]

В большей степени растворимость ионных жидкостей зависит от строения и типа катиона. На настоящий момент, можно сказать, что изучена лишь небольшая доля от возможного числа ионных жидкостей, и, согласно имеющимся представлениям, предлагается следующая классификация по растворимости ионных жидкостей в базовых маслах, представленная в табл. 1.

Табл. 1. Растворимость ионных жидкостей в маслах различных типов в зависимости от строения катиона [5]

Катион/ Тип масел	Нефтяные масла или неполярные синтетическ ие масла	Сложные эфирь	Полиалкилен- гликоли
Имидазолий	-	0	+
Пиридиний	0	0	+
Пирролидиний	-	0	+
Холиний	-	-	+
Аммоний	-	+	+
Фосфоний	+	-	-
Сульфоний	-	0	+

+ растворяется, - не растворяется, 0 – слаборастворимы

Цель работы состоит в определении возможности воспроизведения синтеза ионных жидкостей с различным составом и оценке их влияния на противоизносные свойства базового масла.

Материалы и методы

В рамках данного исследования были синтезированы и исследованы ионные жидкости на основе цетилпиридиния и различных анионов. Все синтезы идентичны по условиям, все реагенты взяты в стехиометрическом соотношении. Проводится реакция ионного обмена цетилпиридиний хлорида с соответствующей кислотой, с последующей нейтрализацией раствором NaOH.

Результаты и обсуждение

На первом этапе исследования синтезированы три соединения, свойства которых представлены в табл. 2.

На втором этапе исследования определяли противоизносные свойства полученных ионных жидкостей. Синтезированные жидкости вводили в количестве 2% масс в полиалкиленгликоль (ПАГ, сополимер этиленоксида с пропиленоксидом) и затем оценивали противоизносные по показателю Диаметр пятна износа по ГОСТ 9490. Испытания проводили в течение 1 часа при нагрузке 60 кгс. Выбор ПАГ обоснован тем, что синтезированные соединения плохо растворяются в нефтяных маслах. Полученные результаты представлены в табл. 3.

Табл. 2. Физико-химические свойства ионных жидкостей

	1	2	3
Анион	Ди (2-этилгексил) фосфат	Ди (2-этилгексил) тиофосфат	Тетрафтор борат
Цвет	Ярко желтый	Оранжевый	Слабо зеленый
Вязкость кинематическая при 40 °С, мм ² /с	85,2	215,6	414,3
Температура разложения, °С	185	215	130

Табл. 3. Оценка противоизносных свойств синтезированных ионных жидкостей

Ионная жидкость	Диаметр пятна износа, мм
Чистое масло	0,6
1	0,43
2	0,37
3	0,6
1+2 (1%+1%)	0,24

Как видно из таблицы, присадки на основе тиофосфатов более эффективны с точки зрения влияния на противоизносные свойства ПАГ, по сравнению с тетрафторборатом. Следует отметить, что ионные жидкости 1 и 2 проявляют синергетический эффект.

Дальнейшие исследования будут направлены на изучение других катионов и анионов в качестве компонентов ионных жидкостей, в том числе на подбор сырьевых компонентов ионных жидкостей, которые могли бы растворяться не только в синтетических, но и в нефтяных маслах.

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что ионные жидкости являются перспективными беззольными противоизносными присадками, эффективно снижающими износ поверхностей трения.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания Проект FSZE-2024-0004.

[1] API 1509. Engine Oil Licensing and Certification System, 22nd Edition. – October 2023.

[2] Lubricant Additives Chemistry and Applications / Leslie R. Rudnick. – CRC Press, 2022. – 708 с.

[3] Egorova K.S., Gordeev E.G., Ananikov V.P. Biological activity of ionic liquids and their application in pharmaceuticals and medicine // Chemical reviews. – 2017. – Т. 117. – №. 10. – С. 7132-7189.

[4] Смазки. Производство, применение, свойства: справочник / Т. Манг, У. Дрезель: пер. с англ. под ред. В.М. Школьникова. – СПб.: ЦОП «Профессия», 2010. – 944 с.

[5] Waheed S. et al. Ionic liquids as lubricants: An overview of recent developments //Journal of Molecular Structure. – 2024. – Т. 1301. – С. 137307.

ТРИБОМОНИТОРИНГ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ВИБРАЦИИ В КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ СИЛОВОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Скворцов О.Б.*, Стащенко В.И.

* oleg.b.skvorcov@gmail.com

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия.

В работе рассмотрены вопросы мониторинга влияния вибрации на износ контактных площадок электрических соединений. Рассмотрены средства контроля вибрации и возбуждения вибрации с использованием внешнего и собственного магнитного поля электропроводящих шин. Приведены примеры контроля пространственной вибрации по виброперегрузке для контактных соединений в условиях фреттинга.

Ключевые слова: трение, фреттинг, электропластический эффект, вибрация, виброперегрузка, усталость.

Введение

На надежность соединений электропроводящих соединений оказывает влияние ряд физических процессов, происходящих в области контакта. Это процессы химической и электрохимической коррозии, износ в результате фреттинг-коррозии, общие вопросы циклической и гигацикловой вибрационной усталости [1].

Действие электрического тока на процессы износа металлических контактирующих поверхностей сопровождается значительным ускорением процесса износа материалов [2]. Повышенные требования к достоверности мониторинга состояния контактных соединений обусловлены выбором конструкционных материалов по их электротехническим характеристикам. Нарушение контактных соединений сопровождается изменением его электрической проводимости и сильным ростом тепловыделения в области контакта из-а высокой энергонасыщенности. Протекающий же через место контакта электрический ток вызывает процессы электрической миграции, электрохимические реакции, а также вибрационные и ударные механические процессы [3], приводя к ускоренному износу и усталости материала в локальной области контакта. Изготовление электромеханических элементов путем обработки металлов давлением, а также их эксплуатация в условиях воздействия переменных электрических и магнитных полей

TRIBOMONITORING OF ELECTRIC PULSE VIBRATION IN CONTACT CONNECTIONS OF POWER EQUIPMENT

Skvortsov O.B., Stashenko V.I.

The paper considers the issues of monitoring the influence of vibration on the wear of contact pads of electrical connections. The means of vibration control and vibration excitation using the external and intrinsic magnetic field of conductive buses are considered. Examples of spatial vibration control by vibration overload for contact connections under fretting conditions are given.

Keywords: friction, fretting, electroplastic effect, vibration, vibration overload, fatigue.

сопровождается процессами трения и механических ударов с вибрацией [4].

При изготовлении и эксплуатации электромеханические конструктивные элементы машин испытывают значительные динамические нагрузки в условиях протекания одновременно различных физических процессов, что влияет на усталость металлических материалов. Часто эти процессы оказываются взаимосвязанными и затрудняют анализ вклада каждого из них в оценку надежности электромеханического оборудования, включая аварийные ситуации. Здесь необходим вибрационный мониторинг.

Вибрационный мониторинг, включающий многокомпонентный контроль пространственной вибрации. Согласно теоретическим и экспериментальным исследованиям процессы трения и фреттинг коррозии определяются совокупностью как касательных динамических микроперемещений, так и нормальными к поверхности контакта динамическими и статическими нагружениями. При длительных ресурсных испытаниях по изучению надежности оборудования возможно применение испытательных стендов, основанных на пропускании импульсов электрического тока через испытываемый образец и контактные элементы. Такая методика испытаний обеспечивала также взаимодействие образца с внешним и собственным магнитными полями. Импульсы электрического

тока в локальной области контакта материалов могут формировать механические колебания без применения сложных и ненадежных внешних источников вибрационного воздействия, что позволяет при длительных ресурсных испытаниях снизить затраты на оборудование и повысить его надежность.

Исследования фреттинг-коррозии в контактных соединениях силовых электрических цепей [5] показывает, что вибрационное воздействие связано не только с амплитудой вибрации, но и с увеличением тепловыделений, приводя к циклическому характеру нагружений с частотами в десятки герц. Используемая при исследованиях [5] установка содержит две контактирующие металлические поверхности пластины, к которым подключен генератор тока и вольтметр, причем на верхнюю пластину действует нормальная нагружающая сила, а нижняя пластина соединена с вибростендом, который обеспечивает ее вибрацию в тангенциальном направлении. Контроль за температурой выполнялся миниатюрной термопарой, а контроль вибрации обеспечивался датчиком вибрационных перемещений. Контроль перемещений не позволяет оценить наличие высокочастотных вибрационных колебаний, присущих процессам фреттинг-коррозии [2], даже если они присутствуют. Изменение контактного сопротивления из-за процессов трения в области контакта будет вызывать изменение в электрических процессах в этой области. Область контакта при пропускании через нее тока будет источником переменных магнитных полей и возбуждения вибраций, связанных с проявлением эффекта рельс трона.

Высокочастотные вибрационные процессы в области механического и электрического контакта сопровождаются при эксплуатации оборудования с такими контактами циклическими нагружениями при числе циклов не в 10^5 , как отмечено в [5], а на несколько порядков большими. Такая особенность приводит к проявлению в области контакта явлений гигацикловой усталости, при которой процессы зарождения дефектов связаны не только с поверхностными, но и внутренними слоями материала.

Отмеченные в [5] динамические изменения температуры, связанные с выделением тепла от проходящего тока через область контакта предпочтительнее контролировать не контактной термопарой, а не контактным инфракрасным датчиком температуры. Это позволяет существенно снизить электрическое влияние гальванически

связанных цепей, но и повысить скорость отклика и разрешение по температуре.

Методика технологии мониторинга

Прохождение импульсов тока высокой плотности по металлическому образцу сопровождается его колебаниями и звуковыми ударами величина, которых зависит от амплитуды, длительности, частоты следования импульсов и материала образца. [6-8] Возникающая вибрация является широкополосной, распространяется по металлической электропроводящей шине в продольном и поперечном направлениях и при токах в десятки – тысячи А/мм² характеризуется значительными виброперегрузками. Основными характеристиками отклика на действие электрического импульса на металл при возникающих вибрациях является скорость колебаний в единицу времени - вибрационное ускорение a_v и ее безразмерная величина - виброперегрузка, измеряемая в единицах ускорения свободного падения a_v/g . На рис. 1 показана структура стенда с формированием вибрации образца в плоскости контакта с использованием силы Ампера. Вместо внешнего вибровозбудителя использовано движение самого образца с током во внешнем магнитном поле соленоида 5. Ток в соленоиде и в образце задается усилителями формирователями 6 и 7, что обеспечивает их независимое регулирование. Оба формирователя синхронно работают от одного генератора импульсов 3. Импульсный режим обеспечивает минимизацию энергопотребления и теплового нагрева электропроводящих элементов.

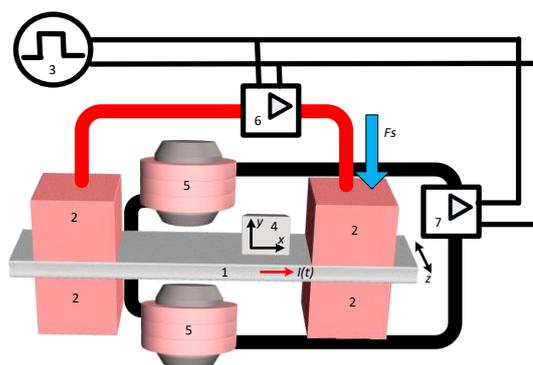


Рис. 1. Структура стенда с формированием поперечных колебаний пластины 1 с использованием сил Ампера. Контактные элементы 2, генератор импульсов 3, акселерометр 4, соленоид 5, усилители мощности - формирователи 6 и 7

Упростить структурную схему для проведения исследования вибрации, действующей на область электрического контакта при изучении происходящих изменений можно, если использовать

взаимодействие проводника с током и его собственного магнитного поля [3]. Статическое нормальное к площадке контакта нагружение контролируется датчиком силы 5, а динамические параметры вибрации акселерометром 4.

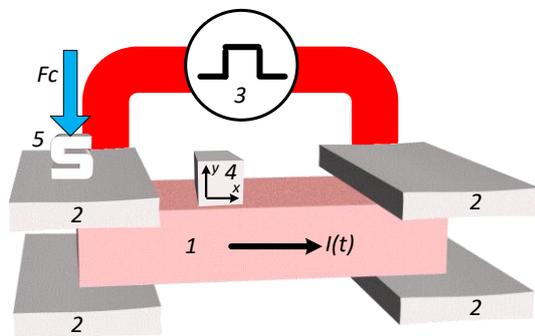


Рис. 2. Структура стенда с формированием колебаний пластины 1 в собственном магнитном поле. Контактные элементы 2, генератор импульсов 3, акселерометр 4, датчик 5 статического нагружения силой F_c

Контроль за изменениями температуры, связанных с тепловыделением в проводнике может быть обеспечен использованием инфракрасного бесконтактного датчика температуры, а величина тока и его изменения контролируются быстродействующим бесконтактным датчиком магнитной индукции на основе эффекта Холла.

Обсуждение результатов

При воздействии прямоугольного электрического импульса от генератора 3 ток через проводник плавно изменяется с началом поступления переднего фронта в момент t_0 и заднего в момент t_1 фронтов импульса. В эти моменты формируются вибрационные процессы, фиксируемые акселерометром 4. Изменение магнитной индукции в зависимости от величины тока $I(t)$ и виброперегрузки показаны на рис.3.

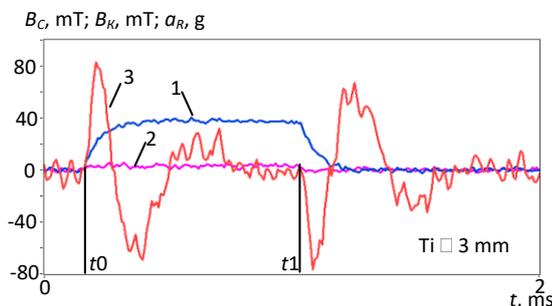


Рис. 3. Магнитная индукция B и виброперегрузка для проводника из титана. Длительность импульса 1000 мкс, амплитуда плотности тока 100 А/мм^2

Следует отметить, что как видно из этого рисунка максимальное ударно колебательное действие электрического импульса не совпадает с плоской вершиной импульса тока, во время которой ток через проводник, а также его электрическое (магнитное) и тепловое действие максимальны.

Используя взаимодействие проводника с током с собственным магнитным полем можно обеспечить получение больших динамических ускорений в области близкой к площадке контакта. Это возможно при использовании коротких электрических импульсов (длительностью порядка 100 мкс) и амплитудой до 1000 А. Поступление таких импульсов при малой частоте не приводит к значительному росту температуры проводника, что упрощает кондиционирование установки.

Полученные результаты показывают, что предлагаемый метод формирования вибрационного воздействия на зону контакта для изучения возникающих в ней изменений обеспечивает при простой конструкции получение значительных динамических нагрузок.

Заключение

Контроль за вибрацией в области контакта в нормальном и в касательном направлениях целесообразно реализовать по параметрам вибрационного перемещения и виброперегрузки с использованием трехкомпонентного миниатюрного высокочастотного пьезоэлектрического акселерометра.

- [1] Нечаев А.В. Электрохимия и коррозия металлов // Екатеринбург: УрФУ, 2014 – 230 с.
- [2] Албагачиев А.Ю., Скворцов О.Б. Виброакустический мониторинг процессов фреттинг-коррозии // Молодёжный вестник Новороссийского филиала Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2023. – Т. 3. – №. 2. – С. 29-36.
- [3] Троицкий О.А. Электропластический эффект в металлах, М.: Изд-во «Ким Л.А.», 2021. – 467 с.
- [4] Zhang Wen et al. Low frequency vibration assisted friction behavior and deep drawing performance of solid-solution 7075 aluminum alloy // Journal of Plasticity Engineering, 2023. – Т. 30. – №. 6. – С. 176-186.
- [5] El Mossouess S. et al. Fretting corrosion in power contacts: Electrical and thermal analysis // 2014 IEEE 60th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm). – IEEE, 2014. – С. 1-5.
- [6] Скворцов О.Б., Сташенко В.И., Троицкий О.А. Упругие деформации проводников при действии импульсов тока // Машиностроение и инженерное образование. – 2018. – № 1. – С. 33-42.
- [7] Троицкий О.А., Скворцов О.Б., Сташенко В.И. Измерение вибраций, созданных импульсами тока в элементах электротехнических конструкций // Электротехника. – 2018. – № 3. – С. 8-12.
- [8] 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.

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕВОЙ СИЛЫ НАСОСНЫХ СТУПЕНЕЙ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ

Смирнов Н.И.*, Смирнов Н.Н.

* smir1947@yandex.ru

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Россия.

Разработаны экспериментальный стенд и методика измерения осевой силы ступеней электроприводных лопастных насосов. Изменение осевой силы коррелирует с графиком напора. Снижению величины осевой силы способствует оребрение нижнего диска рабочего колеса, отверстия и целевые уплотнения. Наибольшее значение силы будет соответствовать пластовой жидкости с содержанием воды 40...80%. Увеличение износа осевых уплотнений приводит к увеличению осевой силы. Осевая сила увеличивается в квадрате от частоты вращения.

Ключевые слова: УЭЛН, насосная ступень, осевая сила, осевое уплотнение, износ.

Установки электроприводных лопастных насосов (УЭЛН) имеет в своем составе несколько сотен подвижных сопряжений, выполняющих функции уплотнений ступеней радиального и осевого типа. правильное проектирование и эксплуатация которых позволяет обеспечить высокую работоспособность и эффективность оборудования. Динамические силы, возникающие при эксцентричном вращении рабочих колес вследствие износа уплотнений, влияют в основном на работоспособность радиальных уплотнений и подробно рассмотрены в работе [1]. Осевые уплотнения «шайба рабочего колеса (РК) – бурт направляющего аппарата (НА)» – наименее изученный объект с трибологической точки зрения, а их изнашивание, рис.1, в значительной степени зависит от величины осевой силы, создаваемой гидравлическим напором РК при эксплуатации, которая не регламентируется техническими условиями.

Эксплуатация насоса за пределами установленного рабочего диапазона может привести к изменению осевой силы и преждевременному износу ступеней насоса и упорного подшипника секции.

Аналитические зависимости как правило разрабатываются для стационарных условий течения однофазной жидкости с использованием

INVESTIGATION OF THE AXIAL FORCE OF PUMPING STAGES UNDER NON-STATIONARY CONDITIONS

Smirnov N.I., Smirnov N.N.

An experimental bench and a method for measuring the axial force of the stages of electric driven vane pumps have been developed. The change in axial force correlates with the pressure graph. The finning of the lower impeller disc, holes and slot seals contribute to a decrease in the axial force. The highest force value will correspond to a reservoir liquid with a water content of 40...80%. An increase in the wear of the axial seals leads to an increase in the axial force. The axial force increases as a square of the rotational speed.

Keywords: ESP, pumping stage, axial force, axial seal, wear.



Рис. 1. Износ осевых уплотнений РК

законов подобия и привлечением CFD пакетов [2]. Они требуют верификации результатов расчета с использованием экспериментальных методов.

Цель заключается в разработке методов исследования осевой силы насосных ступеней и основных закономерностей.

Разработка экспериментального оборудования

Для измерения осевой силы разработан стенд, рис. 2, в котором реализована схема замкнутого контура движения жидкости. Объект испытаний – сборка «НА+РК+НА». Для верификации результатов используется сборка из нескольких ступеней. Основные характеристики стенда: максимальная частота вращения вала 6000 об/мин; типоразмеры испытываемых ступеней – 4, 5, 5А; максимальная температура жидкости – 90 °С; состав модельной жидкости – вода, масло, вода + масло в различных

соотношениях; измеряемые параметры: напор, подача, температура, момент, осевая сила, траектория вала.

При проектировании измерительного устройства приходится решать противоречивые задачи: снижать паразитные потери от трения контактирующих поверхностей за счет увеличения зазоров, которые в свою очередь влияют на величину напора и осевую силу. Измерительное устройство, рис.3, состоит из двух измерителей (на входе и выходе сборки; на рисунке показан один) в виде кольца 8 с четырьмя упругими элементами 6 с тензометрическими датчиками 7, защищенными от воздействия воды специальными покрытиями. На упругие элементы опирается втулка 11 со штифтами 10, свободно перемещающаяся по валу 1, опирающемуся на концевой подшипник 3 с втулками 2 из твердого сплава. Другим концом втулка 11 опирается в регулировочную шайбу 12 из полимерного материала, контактирующую с торцом ступицы РК. Задавая размер шайбы, добиваются условия, когда осевые шайбы РК 13 не контактируют с сопряженными поверхностями НА 4 в пределах зазоров ϵ_1 и ϵ_2 .

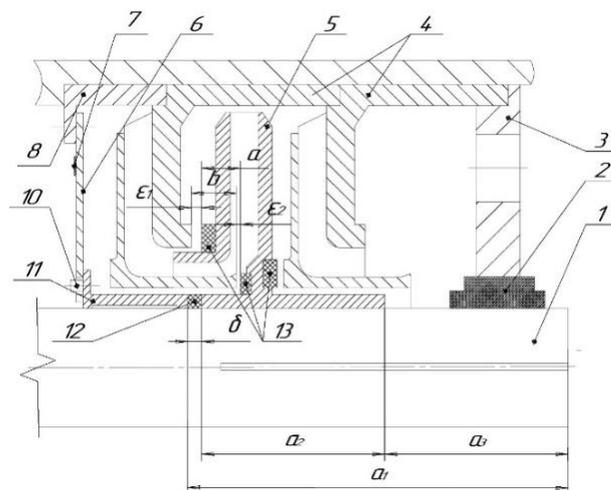


Рис. 3. Схема измерительного устройства

Полученные результаты

С использованием разработанной методики и разработанного оборудования проведены измерения величины осевой силы более 50 типоразмеров ступеней УЭЛН основных заводов России: Алнас, Новомет, Борец, Лемаз, Алмаз, Новые технологии, компаний ТНК-ВР, REDA, Schlumberger. Проведенные опыты показали, что схема измерения осевой силы с использованием сборки «НА-РК-НА» показывает устойчивые качественные результаты, а характер изменения осевой силы коррелирует с графиком напора при различных условиях опыта, рис.4. Для верификации результатов опытов и определения суммарной осевой силы насосной секции необходимы опыты по схеме компрессионной сборки из нескольких ступеней, когда ступицы РК опираются друг на друга, а в осевых уплотнениях всех ступеней обеспечивается гарантированный зазор.

Выявили влияние конструктивных особенностей ступеней на величину осевой силы. В наибольшей степени влияют: оребрение нижнего диска РК, наиболее распространенное в отечественных компаниях; отверстия и щелевые уплотнения в высокодебитных ступенях зарубежных компаний. Оребрение РК наряду с увеличением напорности ступени приводит к негативному эффекту – «всплыванию» РК и износу верхнего осевого сопряжения, а также увеличению потребляемой мощности и турбулизации потока. Общей закономерностью для всех типов ступеней является то, что при испытаниях в масле при одном и том же развиваемом напоре осевая сила меньше, чем в воде, на величину осевой силы влияет вязкость пластовой жидкости. Наибольшее значение осевой силы будет соответствовать пластовой жидкости с содержанием воды 40...80%.

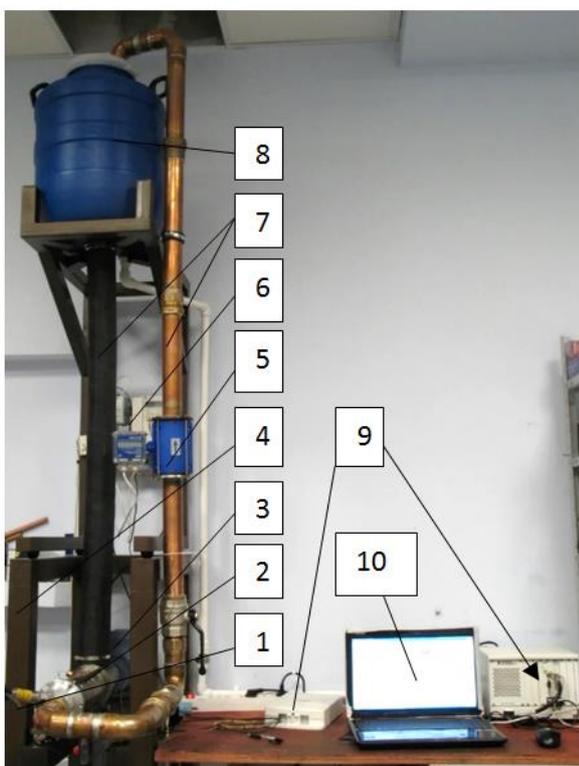


Рис. 2. Общий вид стенда

- 1 – датчик давления; 2 – испытательная камера;
3 – электродвигатель; 4 – основание; 5 – расходомер; 6 – привод;
7 – трубопроводы; 8 – емкость; 9 – система измерения;
10 – компьютер.

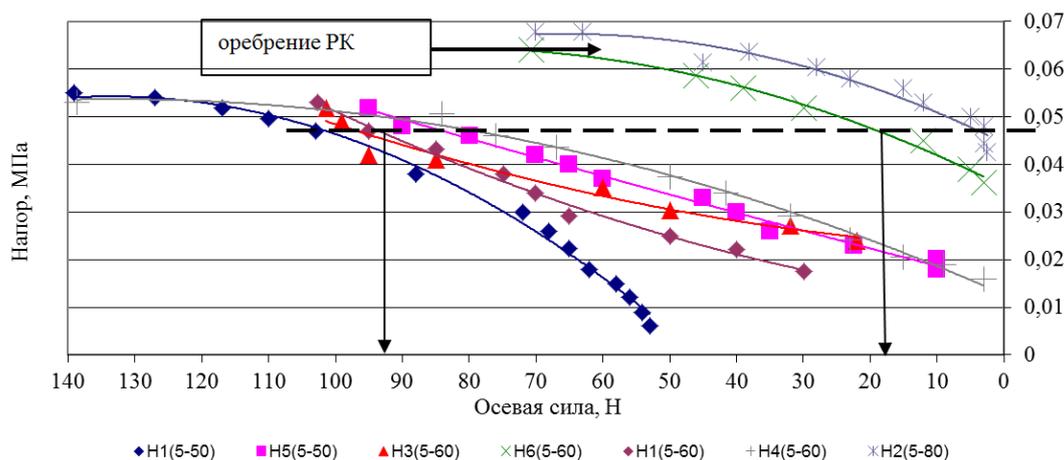


Рис. 4. График изменения осевой силы

Влияние износа уплотнений отмечается в ряде работ, но оценивается лишь качественно на основе результатов CFD моделирования. Для обеспечения зазора в уплотнении механически уменьшали толщину антифрикционной шайбы РК и щелевого уплотнения. При увеличении зазора с 0,3 до 1,5 мм в щелевом уплотнении величина осевой силы изменилась в 2,5 раза. Испытания ступеней с подачей 35...80 м³/сут в воде с кварцевым песком показали, что скорость изнашивания зависит от осевой силы. Зависимость имеет вид монотонно возрастающей функции и описывается

$$v_a = 4 \cdot 10^{-8} p_o + 0,0003 \text{ с } R^2=0,9263$$

Влияние частоты вращения исследовали при изнашивании осевых уплотнений. Из законов подобия вытекает соотношение

$$\frac{H_1}{H_2} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{n_1^2}{n_2^2},$$

где: H – напор, F – осевая сила, n – частота вращения.

Т.е., величина осевой силы увеличивается в квадрате от частоты вращения. Из опытов получили увеличение скорости изнашивания в 4,9 раза при увеличении частоты вращения в 1,92 раза.

Выводы

1. Разработаны методика и средства измерения осевой силы насосных ступеней, показывающие устойчивые результаты на различных типоразмерах ступеней.
2. Изменение величины осевой силы коррелирует с графиком изменения напора.
3. Уменьшение осевой силы достигается оребрением диска РК, наличием отверстий у РК и щелевых уплотнений.
4. Осевая сила увеличивается в пластовой жидкости с содержанием в ней воды 40...80 %.

[1] 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.

[2] Patil A. et al. Effect of leakage flow path wear on axial thrust in downhole electrical submersible pump unit //Journal of Fluids Engineering. – 2020. – Т. 142. – №. 5. – С. 051202.

РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ СТРУКТУРЫ ПРИ ТРЕНИИ В СПЛАВЕ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

Столяров В.В.

vlstol@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук, Москва, Россия.

Сплавы с памятью формы в сверхупругом состоянии применяются в трибосопряжениях, где требуется высокая износостойкость. Одним из способов снижения износа является упрочнение, обусловленное структурным измельчением. В статье сравнивается трибологическое поведение сплава $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ с памятью формы в крупнозернистом и наноструктурном состояниях. Показано позитивное влияние уменьшения размера зерен на коэффициент трения и износ. Выделение наночастиц при старении сплава в наноструктурном состоянии дополнительно повышает износостойкость.

Ключевые слова: никелид титана, трение, наноструктура.

Сплавы TiNi обладают свойствами памяти формы и значительной сверхупругостью, обусловленными превращением аустенита в мартенсит [1]. Ряд публикаций свидетельствует о заметном сопротивлении износу в сверхупругом состоянии и возможности применения в трибосопряжениях (медицинский инструмент, роботы, актуаторы, микромеханические системы) сплавов близких по составу к $Ti_{49}Ni_{51}$ [2]. Приводится много сведений о большей их износостойкости по сравнению со сталью, сплавами на основе Ni и Co. Интерес представляют причины повышенной износостойкости сплавов TiNi, среди которых рассматриваются высокая прочность (твердость), размер зерен и непосредственно фазовое превращение. В ряде работ утверждается, что твердость не является важной причиной повышенной износостойкости, поскольку ее значения кратно ниже в сравнении с другими трибостойкими материалами. Предполагается, что причиной являются эластичные неровности на поверхности, увеличивающие площадь контакта и уменьшающие концентрацию напряжений. Резиноподобное поведение поверхности частично компенсирует деформацию при трении и приводит к минимальным повреждениям. Напротив, в статье [3] демонстрируется, что причиной является циклическое упрочнение в процессе трения, степень

SIZE EFFECT OF STRUCTURE DURING FRICTION IN SHAPE MEMORY ALLOY

Stolyarov V.V.

Superelastic memory alloys are used in tribojoints where high wear resistance is required. One way to reduce wear is structure refinement hardening. The article compares the tribological behavior of the $Ti_{49.3}Ni_{50.7}$ alloy with shape memory in coarse-grained and nanostructured states. The positive effect of reducing grain size on the coefficient of friction and wear is shown. The release of nanoparticles during the aging of the alloy in the nanostructured state additionally increases wear resistance.

Keywords: titanium nickelide, friction, nanostructure.

которого зависит от стабильности аустенита и фактически от соотношения температур трения при деформации T_d и температур прямого и обратного мартенситного превращения (МП).

Приведенные выше ссылки относятся к крупнозернистым (КЗ) сплавам и не рассматривают влияние размера зерен. Вместе с тем, в соответствии с соотношением Холла-Петча уменьшение размера зерен может значительно повысить твердость сплава и, возможно, износостойкость. Появившиеся трибологические исследования в чистых металлах алюминия и меди, покрытых наноструктурной пленкой, подтверждают такой факт. Так, коэффициент трения K_f и износ в нанокристаллической пленке (средний размер зерна $d = 16$ нм), нанесенной магнетронным напылением чистого алюминия, уменьшились по сравнению с поликристаллическим состоянием ($d = 10$ мкм) на 55% и на порядок величины, соответственно [4].

Однако, не все так однозначно для ультрамелкозернистых (УМЗ) материалов, полученных разными методами интенсивной пластической деформации [5]. Например, для УМЗ структуры в меди, сформированной равноканальным угловым прессованием (РКУП) или комбинацией РКУП и кручением под высоким давлением (КВД), преимущество в трибологических свойствах перед КЗ структурой не подтверждается,

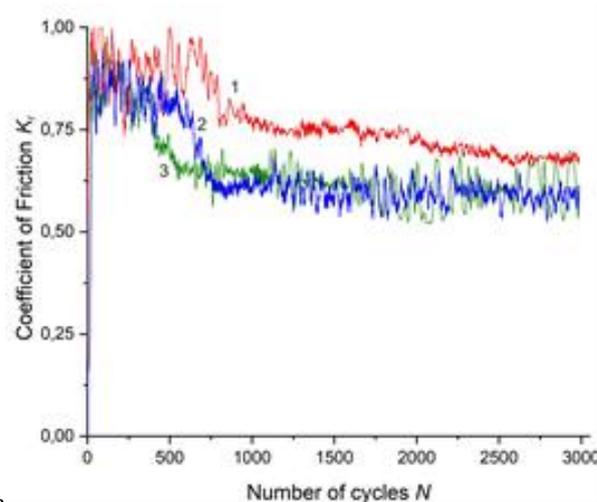
поскольку микроструктура поверхностного слоя трансформируется в нанокристаллическую в процессе трения [5].

В последнее время появились исследования по трению наноструктурных сплавов, полученных электропластической прокаткой, КВД и РКУП [6-8]. Показано, что K_f при комнатной температуре снижается при уменьшении размера зерен на три порядка. Упомянутые деформационные методы относятся преимущественно к лабораторным методам. Практический интерес представляют промышленные методы, к которым относятся методы РКУП Конформ [9], поперечно-винтовой прокатки и ротационной ковки. Поэтому целью работы является исследование трения и износа в сплаве $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$, наноструктура в котором получена с использованием ротационной ковки.

Материалом исследования выбран крупнозернистый сплав $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ (состояние 1, $d = 35$ мкм, $H_v = 2,31$ ГПа). Сплав был подвергнут ротационной ковке с целью формирования наноструктуры (состояние 2, $d = 60$ нм, $H_v = 3,42$ ГПа) и последующему старению при температуре 430 °С в течение 1 часа для дополнительного выделения наночастиц избыточной фазы Ti_3Ni_4 (состояние 3, $d < 100$ нм, $H_v = 3,29$ ГПа). Трибологические испытания были выполнены при возвратно-поступательном движении контртела по схеме «шар плоскость» без смазки при комнатной температуре и нормальной нагрузке $F = 0,2$ Н. В качестве контртела использовали шар, диаметром $1,5$ мм из керамики Al_2O_3 . Скорость и амплитуда движения образца относительно контртела составляли 2 см/с и 5 мм, соответственно. Образцы для трибологических испытаний представляли собой полуцилиндры $20 \times 3,5$ мм, поверхность которых была отполирована до шероховатости $R_a = 150 \pm 50$ нм. Интенсивность износа W рассчитывали, используя выражение, рекомендованное ASTM G133. Исследование морфологии треков и элементный анализ проводили с использованием сканирующего электронного микроскопа.

На рис. 1а представлены зависимости коэффициента трения K_f от количества циклов движения контртела.

Видно, что уменьшение размера зерна способствует уменьшению коэффициента трения от $K_{f1} = 0,71 \pm 0,02$ (состояние 1) до $K_{f2} = 0,57 \pm 0,02$ (состояние 2), т.е. почти на 20 %. Значения коэффициентов трения сплавов в состоянии 2 и 3 практически совпадают и равны $0,57 \pm 0,02$ и $0,56 \pm 0,02$, соответственно. То есть, отжиг сплавов в УМЗ состоянии при температуре 430 °С не вызывает



а

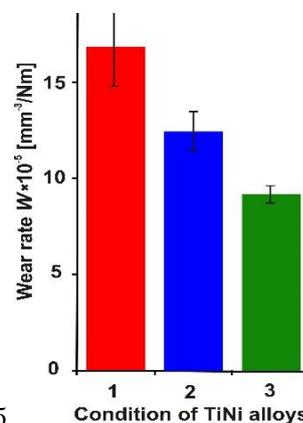


Рис. 1. Коэффициент трения (а) и износ (б) в состояниях: 1 – КЗ, 2 – наноструктурное, 3 – сост. 2 + отжиг

изменений коэффициента трения. Количественный анализ профилограмм позволил рассчитать интенсивность износа W для каждого из исследуемых состояний TiNi.

Рис. 1б демонстрирует, что интенсивная пластическая деформация вызывает уменьшение интенсивности износа на 26% (от $W_1 = 16,72 \times 10^{-5} \pm 2,25 \times 10^{-5}$ мм³/Нм до $W_2 = 12,28 \times 10^{-5} \pm 1,05 \times 10^{-5}$ мм³/Нм). Важно отметить, что отжиг сплава в наноструктурном состоянии вызывает дополнительное уменьшение интенсивности износа еще на 26% (от $W_2 = 12,28 \times 10^{-5} \pm 1,05 \times 10^{-5}$ мм³/Нм до $W_3 = 9,08 \times 10^{-5} \pm 0,42 \times 10^{-5}$ мм³/Нм). То есть измельчение структуры и последующая термообработка TiNi сплава обеспечивают двукратное увеличение износостойкости.

Сравнение изображений в сканирующем электронном микроскопе следов износа в 1 и 2 состояниях показало изменение доминирующих механизмов износа. Следы *расслоений* в КЗ состоянии свидетельствуют, что продукты износа выносятся за пределы трека, увеличивая тем самым интенсивность износа. В наноструктурном состоянии *расслоений* практически нет, но

появляются следы *абразивного механизма износа*. На изношенной поверхности TiNi сплава после отжига доминирует механизм *адгезионного износа*. Отжиг сплава в наноструктурном состоянии модифицирует структуру так, что вклад механизма абразивного износа снижается, а адгезионного механизма увеличивается. Следовательно, износостойкость TiNi сплавов зависит не только от размера зерна, но и от дизайна микроструктуры, а также от наличия включений нанодисперсных частиц Ti₃Ni₄.

Таким образом, уменьшение размера зерна в сплаве более, чем на два порядка, вызывает уменьшение коэффициента трения и интенсивности износа, а также повышает твердость. Это подтверждает прямую корреляцию твердости и износостойкости, характерную для многих материалов. С другой стороны, постдеформационный отжиг сплава в наноструктурном состоянии, не вызывающий заметных изменений размера зерен и твердости, все же приводит к дополнительному уменьшению интенсивности износа.

Благодарности

Автор благодарит ЦКП ТГУ им. Г.Р. Державина и ИМЕТ РАН за помощь в исследованиях.

- [1] Brailovski V. et al. Shape memory alloys: fundamentals, modeling and applications. – École de technologie supérieure, 2003.
- [2] Liang Y.N., Li S.Z., Jin Y.B., Jin W., Li S. Wear behavior of a TiNi alloy // Wear. – 1996. – Т. 198. – №. 1-2. – С. 236-241.
- [3] Clayton P. Tribological behavior of a titanium-nickel alloy //Wear. – 1993. – Т. 162. – С. 202-210.
- [4] Farhat Z.N. et al. Effect of grain size on friction and wear of nanocrystalline aluminum //Materials Science and Engineering: A. – 1996. – Т. 206. – №. 2. – С. 302-313.
- [5] Zhilyaev A. P. et al. Wear resistance and electroconductivity in copper processed by severe plastic deformation //Wear. – 2013. – Т. 305. – №. 1-2. – С. 89-99.
- [6] Misochenko A.A., Chertovskikh S.V., Shuster L.S., Stolyarov V.V. Influence of Grain Size and Contact Temperature on the Tribological Behaviour of Shape Memory Ti 49.3 Ni 50.7 Alloy //Tribology Letters. – 2017. – Т. 65. – С. 1-7.
- [7] Chertovskikh S.V., Shuster L.Sh., Stolyarov V.V. Triboengineering properties of nitinol produced by intensive plastic deformation // Friction and Wear. – 2005. – Т. 26. – № 1. – С. 80-83.
- [8] Stolyarov V.V., Shuster L.Sh., Migranov M.Sh., Valiev R.Z., Zhu Y.T. Reduction of friction coefficient of ultrafine-grained CP titanium //Materials Science and Engineering: A. – 2004. – Т. 371. – №. 1-2. – С. 313-317.
- [9] Dyakonov G.S., Gu C.F, Toth L.S., Valiev R.Z., Semenova I.P. Microstructure and mechanical properties of continuous equal channel angular pressed Titanium //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2014. – Т. 63. – №. 1. – С. 012067.

ФРЕТТИНГ ИЗНОС В УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОМ ТИТАНЕ

Столяров В.В.

vlstol@mail.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова
Российской академии наук, Москва, Россия.

Исследовано трибологическое поведение титана в условиях, приближенном к фреттингу. Износ и коэффициент трения УМЗ титана при комнатной и повышенной температуре сравниваются при малой и большой амплитуде смещения. Уменьшение амплитуды смещения от 300 до 50 мкм приближает условия трения к фреттингу и снижает износ, так и коэффициент трения. Повышение температуры от комнатной до 350 °С трансформирует традиционный положительный вид износа в отрицательный, сопровождающийся образованием окисной пленки и снижением коэффициента трения.

Ключевые слова: титан, износ, трение, фреттинг.

Введение

Фреттинг-износ является особым случаем трения двух тел при низких амплитуде $<0,5$ мкм и частоте 0,001 Hz циклических перемещений, приводящих к ускоренному разрушению [1]. В практическом плане, изучение фреттинг-износа важно для соединений, подвергаемых вибрационному износу. Титан и его сплавы часто эксплуатируются в подобных условиях. Поэтому исследования фреттинг износа являются актуальными, однако выполнены для материалов в крупнозернистом (КЗ) состоянии [2-4]. Среди внешних факторов, влияющих на фреттинг износ, температура испытаний и амплитуда перемещения, видятся наиболее важными при исследовании трения и износа. Предполагалось, что этот эффект связан в основном с более высокой твердостью поверхности [5]. Роль структурного измельчения в область наноразмеров для разных металлов и сплавов была обобщена в обзоре [6]. Однако большая часть исследований выполнена в условиях далеких от фреттинга. Недавние результаты неожиданно показали, что измельчение структуры методом равноканального углового прессования (РКУП) в случае фреттинг-трения при комнатной температуре повышает износ в УМЗ титане по сравнению с КЗ титаном [7]. Целью работы было сравнить влияние температуры и амплитуды перемещения на фреттинг поведение УМЗ Ti.

FRETTING WEAR IN ULTRAFINE GRAINED TITANIUM

Stolyarov V.V.

The tribological behavior of titanium under conditions close to fretting has been studied. The wear and friction coefficient of UFG Ti at room and elevated temperatures are compared for small and large displacement amplitudes. Reducing the displacement amplitude from 300 to 50 μm brings the friction conditions closer to fretting and reduces wear and friction coefficient. An increase in temperature from room temperature to 350 °C transforms the positive wear into a negative one, accompanied by the formation of an oxide film and a decrease in the friction coefficient.

Keywords: titanium, wear, friction, fretting.

Материалы и методы исследований

Исследовались пластины размером $2 \times 6 \times 43$ мм³ из титана Grade 4 в УМЗ состоянии ($d_3 = 0,45$ мкм), имевшие шероховатость $R_a \leq 0,15$ мкм. Испытания на фреттинг-износ проводили без смазки на трибометре CETR UMT-3M при возвратно-поступательном движении с амплитудой смещения $A = 50$ и 300 мкм и частотой 13 Гц. Эксперимент выполняли при нагрузке 3Н в течение 128 мин при 20 и 350°C на одних и тех же образцах. Общее количество циклов составляло 100000. Контртелом служил шарик $\varnothing 6$ мм из WC при нагрузке 3 Н. После каждого испытания морфология мест износа была исследована оптическим методом на микроскопе Olympus SZ. Суммарный линейный износ измерялся автоматически по показаниям инкрементального энкодера, установленном на шаговом двигателе.

Результаты и их обсуждение

Ниже показаны временные зависимости износа и $K_{тр}$ (рис. 1), а также их количественные характеристики в УМЗ Ti (табл. 1). Особенностью кривых износа и $K_{тр}$ является их быстрый переход в стационарную стадию. Предполагается, что отклонение от подобного поведения при 20 °С и максимальной амплитуде перемещения (кривая 2, рис. 2а) связано с известным для титана явлением налипания на индентор. Это подтверждается максимально высоким значением $K_{тр}$ и

периодическим появлением «крупных зубчиков» на кривых при комнатной температуре (кривая 2, рис. 2б). Отметим, что более мелкие зубчики связаны с микрошероховатостью. Влияние амплитуды смещения на износостойкость во всех случаях связано с изменением фактической длины трения и, соответственно, количеством продуктов износа. Наиболее интересные изменения обнаружены при повышении температуры – временные зависимости $K_{тр}$ ведут себя противоположно для разных амплитуд смещения (рис. 2г, кривые 1 и 2).

При нагреве до 350 °С и продолжительности испытания более 2 часов ряд факторов действуют разнонаправленно и с разной скоростью: рекристаллизация, сопровождающаяся ростом зерен и уменьшением микротвердости; старение с выделением наночастиц интерметаллидов Ti_2Fe и появлением абразивного трения; окисление поверхности. Первые два фактора должны повышать, а последний фактор снижать $K_{тр}$. Кроме того, с повышением амплитуды перемещения при постоянной частоте кратно повышается скорость трения. Повышение $K_{тр}$ и пересечение кривых 1 и 2 в середине испытания (рис. 2г) может свидетельствовать о более сильном влиянии твердых наночастиц, фракция которых во времени увеличивается. Определенное влияние имеет и частота процесса удаления окисной пленки и последующего ее восстановления.

Данные в табл. 1 показали, что повышение температуры или амплитуды смещения приводит к многократному повышению износа, смене его знака и снижению $K_{тр}$ в результате окисления поверхности. Результаты, отмеченные знаком * в табл. 1, являются исключением, обсуждены выше и требуют специального исследования.

Табл. 1 Износ и $K_{тр}$ УМЗ титана

А, мкм	Износ, мкм		$K_{тр}$	
	20 °С	350 °С	20 °С	350 °С
50	5	-25	0,3*	0,8*
300	20	-88	1,0	0,6

Вид пятен контакта показывает типичную для фреттинга темную зону прилипания (рис. 2а). В других зонах можно наблюдать следы микроскольжения (рис. 2б) и/или выноса частиц (обломков). На рис. 2б видна картина смешанного режима, при котором фреттинг и трение скольжения сосуществуют.

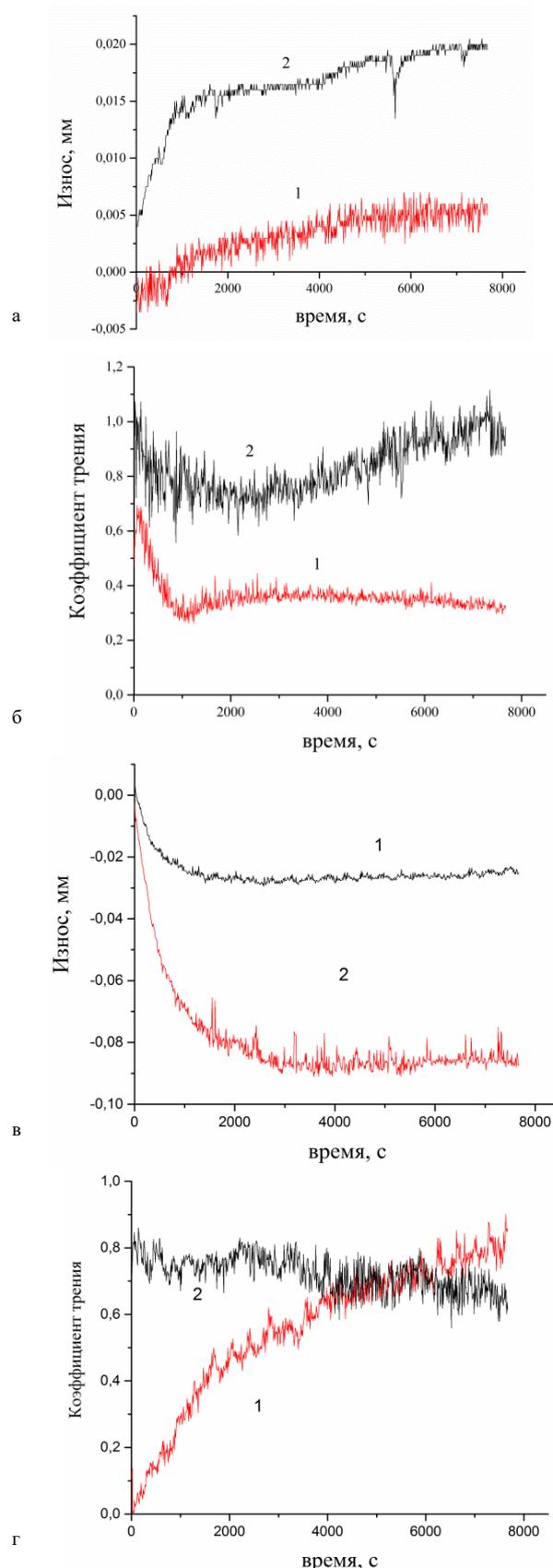


Рис.1. Зависимость износа (а, в) и коэффициента трения (б, г) от времени для УМЗ Ti при 20 (а,б) и 350 (в, г) °С: 1 – А=50 мкм; 2 – А=300 мкм.

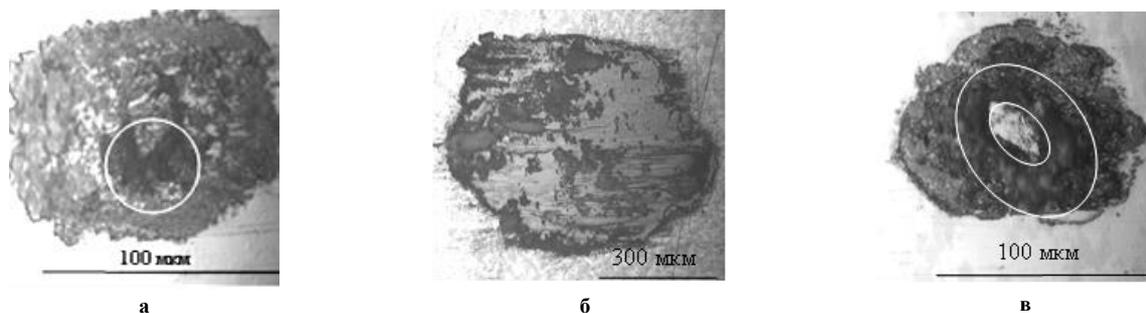


Рис. 2. Морфология мест контакта при 20 °С (а) и 350 °С (б) после 10^5 циклов: а – $A = 300$ мкм; б – $A = 50$ мкм. Зона контакта выделена белой линией

Для сравнения на рис. 2в приведена морфология места контакта для КЗ титана при комнатной температуре и амплитуде $A = 50$ мкм. Типичная картина фреттинга в виде светлого пятна наблюдается в центре зоны контакта.

В табл. 2 приведены средние значения радиуса R зон контакта, а также приблизительные отношения A/R для всех исследованных состояний титана и режимов испытаний. Логически ожидаемым результатом стало повышение среднего радиуса зоны контакта с повышением амплитуды смещения (рис. 2 и табл. 2). Оказалось также, что повышение температуры и, соответственно, степени окисления, резко уменьшает радиус зоны контакта R при максимальной амплитуде смещения (табл. 2).

Табл. 2. Соотношение зон контакта, амплитуд смещения и d

d , мкм	T , °С	A , мкм	R , мкм	A/R	A/d	Фреттинг
0,45	20	50	62 ± 15	0,77	$\sim 1 \times 10^2$	смешанный
		300	400 ± 5	0,75	$\sim 6 \times 10^2$	нет
	350	300	250 ± 50	1,2		смешанный

Видно, что фреттинг наблюдается при обеих температурах только в смешанном варианте, сопровождающемся следами скольжения. Чистый фреттинг в УМЗ титане не наблюдался даже при соблюдении критерия $A/R < 1$, установленному для обычных (крупнозернистых) материалов [8]. По-видимому прежний критерий не учитывает соотношение A/d , увеличение которого в наноструктурных материалах сдвигает границы фреттинга и механизм внутризеренного скольжения в нанометрическую область.

Заключение

При рассмотрении граничных условий возникновения фреттинг-износа кроме влияния внешних факторов, связанных с температурой, амплитудой смещения, частотой или нагрузкой, необходимо принимать во внимание роль дисперсности микроструктуры и ее соизмеримость с амплитудой смещения

- [1] Nowell D., Dini D., Hills D.A. Recent developments in the understanding of fretting fatigue // Engineering Fracture Mechanics. – 2006. – Т. 73. – С. 207-222.
- [2] Vadiraj A., Kamaraj M. Effect of surface treatments on fretting fatigue damage of biomedical titanium alloys // Tribology International. – 2007. – Т. 40. – С. 82-88.
- [3] Fridrici V., Fouvry S., Kapsa P. Fretting wear behaviour of a titanium alloy // In: Bhushan B. (eds) Fundamentals of Tribology and Bridging the Gap Between the Macro- and Micro/Nanoscales. - 2001. NATO Science Series (Series II: Mathematics, Physics and Chemistry). – Т. 10. Dordrecht: Springer.
- [4] Blanchard P., Colombie C, Pellerin V., Fayeulle S., Vincent L. Material effects in fretting wear: application to iron, titanium, and aluminum alloys // Metallurgical Transaction A. – 1991. – Т. 22. – С. 1535-1544.
- [5] Zhanga Y.S., Han Z. Fretting wear behavior of nanocrystalline surface layer of pure copper under oil lubrication // Tribology Letters. – 2007. – Т. 27. – P. 53-59.
- [6] Столяров В.В. Трибологические аспекты наноструктурных материалов // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2023. – Т. 15. – С. 840-850.
- [7] Pakhomov M. A., Gorlov D., Stolyarov V. Features of wear and friction in titanium // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2020. – Т. 996. – №. 1. – С. 012017.
- [8] Varenberg M., Etsion I., Halperin G. Slip index: a new unified approach to fretting // Tribology Letters. – 2004. – Т. 17. – №. 3. – С. 569-573.

МЕТОДИКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА В ЗОНЕ КОНТАКТА ТРИБОСОПРЯЖЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Сырбу С.А., Наумов А.Г.*, Колбашов М.А.

* syrbue@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России», Иваново, Россия.

В работе предложена методика предварительной оценки эффективности смазочного материала в зоне контакта трибосопряженных металлических поверхностей. В основу методики положено квантово-химическое моделирование процессов образования комплексов металлов со свободнорадикальными фрагментами и последних между собой. Если более энергетически выгодным окажется процесс комплексообразования, то смазочный материал будет работать эффективно. Использование методики проиллюстрировано на сплавах железа и титана.

Ключевые слова: смазочные материалы, квантовохимическое моделирование, сплавы железа и титана, энтальпия комплексообразования.

Введение

В настоящее время известно достаточно большое количество смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС), эффективно работающих в зоне контакта трибосопряженных металлических поверхностей. Однако не всегда применение того или иного СОТС приносит желаемый результат. Поскольку их подбор осуществляется эмпирическим путем. Поэтому проблема обоснования подбора смазочного материала и предсказания его эффективности, например, при резании на операции точения, представляется весьма актуальной. Исходя из вышесказанного, целью нашей работы является разработка методики предварительной оценки эффективности СОТС в зоне контакта трибосопряженных металлических поверхностей. Основные задачи исследования заключались в следующем. Провести квантово-химическое моделирование процессов образования комплексных соединений металлов со свободно радикальными фрагментами, образующимися при физической или химической активации молекул смазочного материала, а также процессов взаимодействия радикалов между собой. Рассчитать величины изменения энтальпии указанных

METHOD OF LUBRICANT EFFICIENCY PRELIMINARY ASSESSMENT IN THE CONTACT ZONE OF TRIBOSUPPORTED METAL SURFACE

Syrbu S.A., Naumov A.G., Kolbashov M.A.

The paper proposes a method for preliminary assessment of the lubricant effectiveness in the contact zone of triboconjugated metal surfaces. The method is based on quantum-chemical modeling of the metal complexes with free-radical fragments formation processes and the latter with each other. If the complex formation process turns out to be more energetically favorable, the lubricant will work effectively. The use of the method is illustrated on iron and titanium alloys.

Keywords: lubricants, quantum chemical modeling, iron and titanium alloys, enthalpy of complexation.

процессов. На основании их анализа определить наиболее энергетически выгодный процесс.

Материалы и методы

С помощью полуэмпирического метода РМЗ в идеальной газовой фазе было проведено квантово-химическое моделирование процессов образования комплексов железа и титана с вторичным и третичным радикалами, которые образуются при физической или химической активации поливинилового спирта, состава 1:1 и 1:2. Термодинамическая возможность образования данных структур оценивалась исходя из величин процессов изменения энтальпий комплексообразования в идеальной гипотетической газовой фазе, рассчитанных по следствию из закона Гесса на основе изменения РМЗ-энтальпий образования реагентов [1].

Результаты и обсуждение

Для теоретического обоснования вероятности образования комплексных соединений железа и титана на трибосопряженных металлических поверхностях контактной зоны при физико-химических взаимодействиях СОТС или их компонентов с ювенильными металлическими поверхностями используем термодинамический подход.

Предположим, что разделительные смазочные пленки, обуславливающие эффективность СОТС, образованы полимерными молекулами, которые иммобилизованы на ювенильных поверхностях металлов. Иммобилизация происходит за счет образования прочных ковалентных связей радикальных фрагментов макромолекул с атомами металлов. Однако стоит отметить, что макромолекулам достаточно сложно «закрыть» стерически труднодоступные зоны деформации (неровности). Это возможно свободно радикальным фрагментам, которые могут образовываться как при физической (коронным разрядом), так и химической (озонированием) активации полимерных молекул СОТС в случае благоприятствования процессу термодинамических факторов (энтальпийного и энтропийного). Иными словами, если образование связей свободнорадикальных фрагментов с атомом металла энергетически выгоднее, чем образование связей между ними, и отсутствуют пространственные затруднения для образования таких связей, разделительная смазочная пленка хемосорбируется на поверхности металла, и использование смазочного материала будет эффективным.

Проиллюстрируем выдвинутую гипотезу на примере поливинилового спирта, активированного коронным разрядом, эффективность использования которого в качестве СОТС доказана в работе [2].

При активации поливинилового спирта образуются вторичный $\text{CH}_3\text{-CH}(\text{OH})\text{-CH}^*\text{-CH}(\text{OH})\text{-CH}_2\text{-CH}_2(\text{OH})$ и третичный $\text{CH}_3\text{-C}^*(\text{OH})\text{-CH}_2\text{-CH}(\text{OH})\text{-CH}_2\text{-CH}_2(\text{OH})$ алкильные радикалы. Обозначим их R_2 и R_3 соответственно.

В рамках метода РМЗ была проведена геометрическая оптимизация вторичных и третичных радикалов, а также их комплексных соединений с атомарными железом и титаном состава $\text{R}_2\text{-Me}$; $\text{R}_2\text{-Me-R}_2$; $\text{R}_3\text{-Me}$; $\text{R}_3\text{-Me-R}_3$, где Me – атом металла. На рис. 1 и 2 в качестве примеров приведено геометрическое строение комплексов состава 1:1.

Результаты оценки термодинамической возможности образования комплексов состава 1:1 и 1:2 приведены в табл. 1. Аналогично были рассчитаны величины изменения энтальпии процессов соединения радикалов и образования ковалентной связи между ними по обменному механизму.

Анализ данных табл. 1 показывает, что процессы образования комплексов со вторичными и третичными углеводородными радикалами как атомарным железом, так и атомарным титаном

энергетически выгодны. Однако титан, имеющий большее химическое сродство к кислороду, обладает большим химическим сродством и к свободно-радикальным фрагментам СОТС. Энергия процесса комплексобразования, которую можно приравнять к энергии связи в образовавшихся комплексах, в комплексе Ti-R_2 в 2,5 раза больше, чем в комплексе Fe-R_2 . В случае комплекса Ti-R_3 энергия связи в 3,1 раза больше, чем в комплексе Fe-R_3 . Обнаруженный экспериментальный факт говорит о большей прочности связей как вторичного, так и третичного радикалов поливинилового спирта с титаном, иными словами, о более прочно хемосорбированной смазочной пленке на поверхности титана.

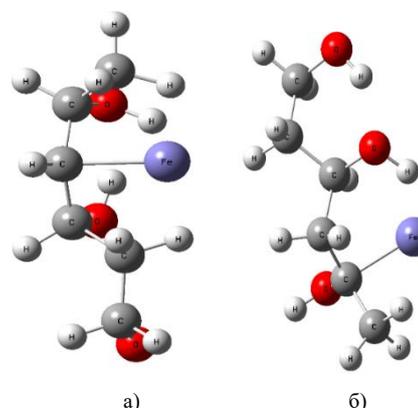


Рис. 1. Геометрическое строение комплексов состава Fe-R_2 (а); Fe-R_3 (б)

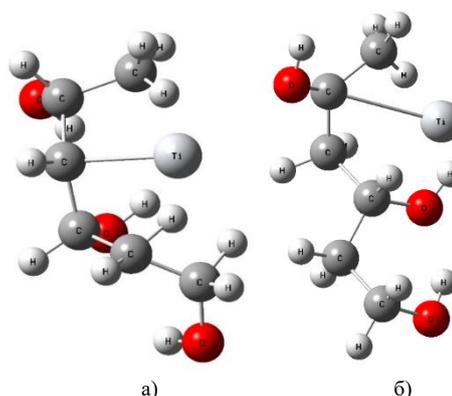


Рис. 2. Геометрическое строение комплексов состава Ti-R_2 (а); Ti-R_3 (б)

Табл. 1. Изменение энтальпии в процессе образования комплексов атомарных железа и титана с алкильными радикалами ($\Delta H_{\text{компл.}}$, ккал/моль)

R	$\Delta H_{\text{компл.}}$, ккал/моль			
	Fe+R	Fe+2R	Ti +R	Ti +2R
R ₂	-95,8	-252,4	-236,6	-526,1
R ₃	-72,3	-254,5	-224,3	-490,6

Соединение радикалов энергетически не выгодно, и требует затрат энергии в 104,5 ккал/моль и 86,2 ккал/моль при взаимодействии вторичных и третичных радикалов соответственно.

Заключение

Таким образом, в работе предложена методика, с помощью которой а priori с использованием методов квантовой химии можно предсказывать потенциальную эффективность смазочного материала в зоне контакта трибосопряженных металлических поверхностей. Для этого необходимо определить, какой из процессов: образование комплексов металлов со свободно-радикальными фрагментами, на которые распадается СОТС при физико-химическом воздействии, или соединение свободно-радикальных фрагментов между собой будет энергетически выгоднее. Если более энергетически выгоден процесс комплексообразования, то СОТС будет эффективным.

Кроме того, предложенная методика позволяет оценивать прочность химической связи разделительной смазочной пленки с поверхностью определенного металла в зоне контакта трибосопряженных металлических поверхностей. Это позволит предсказывать не только потенциальную эффективность смазочных материалов, но и осуществлять их целенаправленный подбор для определенных металлов.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (номер проекта 23-29-00288).

[1] Sheinin V.B., Shabunin S.A., Bobritskaya E.V., Ageeva T.A. Koifman O.I. Protonation Equilibriums of Porphin, 5,10,15,20-Tetraphenylporphin, 5,10,15,20-Tetrakis(4'-sulfonatophenyl) porphin in Methanol // *Macroheterocycles.* – 2012. – Т. 5. – С. 252-259.

[2] Репин Д.С., Наумов А.Г. Об эффективности активации полимерсодержащих смазочно-охлаждающих технологических средств при механической обработке металлов резанием // *Вестник УГАТУ.* – 2020. – Т. 24. – № 2(88). – С. 36-42.

МОДЕЛИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Тихомиров В.П., Измеров М.А.*

* m.izmerov@yandex.ru

ФГБОУ ВО «БГТУ», Брянск, Россия.

Рассмотрены модели контактного взаимодействия шероховатых поверхностей, учитывающие постоянство и разброс радиусов закругления вершин выступов. Показано различие в оценке силы трения для сравниваемых моделей. При постоянстве радиусов кривизны вершин выступов при упругом и пластическом контакте сила трения следует закону Амонтона, а при учете разброса радиусов кривизны – закон Амонтона нарушается.

Ключевые слова: фрактальные модели, фактическая площадь контакта, контактная жесткость, коэффициент трения

Введение

Эксплуатационные свойства неподвижных и подвижных соединений зависят от качества сопряженных поверхностей. Количественные параметры соединений определяются принимаемыми в расчетах моделями, которые включают подмодели поверхности, контактного взаимодействия с учетом физико-механических свойств материалов. Одной из известных моделей контактного взаимодействия является модель Гринвуда-Вильямсона (GW) [1].

Модель Гринвуда-Вильямсона

Для того, чтобы получить количественные оценки параметров контактного взаимодействия с помощью модели GW, поверхность принимается в виде набора сферических сегментов с одинаковым радиусом верхней части неровностей. При этом высоты упруго деформируемых сегментов имеют определенный вероятностный закон распределения.

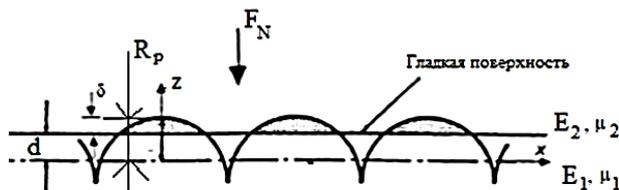


Рис. 1. Контакт шероховатой поверхности с гладкой

Приведем основные соотношения для оценки фактической площади контакта и нагрузки [1]

CONTACT MODELS OF ROUGH SURFACES

Tikhomirov V.P., Izmerov M.A.

The models of contact interaction of rough surfaces are considered, taking into account the constancy and variation of the radii of rounding of the peaks of the projections. The difference in the estimation of the friction force for the compared models is shown. When the radii of curvature of the vertices of the projections are constant in elastic and plastic contact, the friction force follows Amonton's law, and when taking into account the spread of the radii of curvature, Amonton's law is violated.

Keywords: fractal models, actual contact area, contact stiffness, coefficient of friction.

$$A_r = \pi N r R_q F_1(d^*),$$

$$F_N = \frac{4}{3} N E' r^{1/2} R_q^{3/2} F_{3/2}(d^*).$$

Здесь $N = \eta A_a$, где η – плотность выступов; A_a – номинальная площадь; r – радиус верхней части выступа; R_q – среднее квадратическое отклонение ординат профиля поверхности; $\frac{1}{E'} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}$, μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости.

Функции, входящие в вышеприведенные зависимости, имеют вид

$$F_n = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{d^*}^{\infty} (s - d^*)^n e^{-s^2/2} ds, \quad d^* = \frac{d}{R_q}.$$

Приведем зависимость фактической площади контакта от нормальной нагрузки при следующих исходных данных: $\eta = 300 \text{ мм}^{-2}$; $A_a = 100 \text{ мм}^2$; $R_q = 0,024 \text{ мкм}$; $r = 150 \text{ мкм}$. Относительный зазор между сопряженными поверхностями изменялся в пределах от 0,8 до 1,4. На рис. 2 приведена зависимость фактической площади контакта от нагрузки. Анализ полученной зависимости показал линейную зависимость площади от нагрузки. Следуя подходу, предложенному Ф. Боудену и Д. Тейбору [2], можно записать

$$F_f = \tau A_r,$$

где τ – сопротивление срезу молекулярных связей.

Принимая $\tau = const$, можно утверждать, что сила трения в данном случае определяется в соответствии с законом Амонтона

$$F_f = fF_N.$$

Здесь коэффициент трения $f = \tau/p_r$, p_r – фактическое давление.

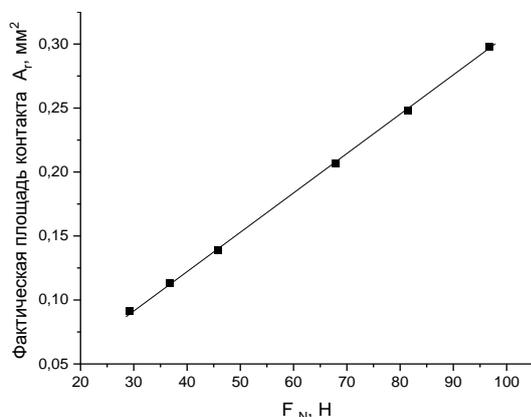


Рис. 2. Зависимость фактической площади контакта от нагрузки

Отказ о допущении постоянства радиусов закругления для всех выступов в отличие от модели GW был рассмотрен в работе [3]. Однако, в цитируемой работе Уайтхауса и Арчарда не приводится пример, который показал бы насколько влияние разброса радиусов влияет на выходные параметры контактного взаимодействия.

Микрофрактальная модель

Рассмотрим другой подход, позволяющий учитывать как распределение радиусов закругления выступов, так и вероятностное расположение пиков неровностей по высоте.

При повышенных нагрузках фрактальная модель не учитывает упругопластическое состояние неровностей. В этом случае более адекватной моделью является модель поверхности в виде набора сферических сегментов, параметры которой определяются фрактальными свойствами. В частности, распределение длин (рис. 3) подчинено степенному закону, который соответствует вероятностному закону распределения высот выступов.

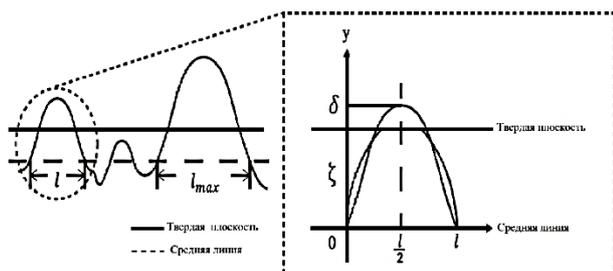


Рис. 3. Профиль и выступ поверхности

Распределение длин среза неровностей на любом уровне от вершины наибольшего выступа подчиняется зависимости

$$N(L > l) = \left(\frac{l_{max}}{l}\right)^{D_S-1}, \quad 2 < D_S < 3.$$

Размерное распределение имеет вид

$$n(l) = -\frac{dN}{dl} = (D_S - 1)l_{max}^{D_S-1}l^{-D_S}.$$

Профиль поверхности опишем уравнением

$$z(x) = G^{D_S-2}(\ln\gamma)^{1/2}l^{3-D_S} \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{l}\right)\right], \quad 0 < x < l.$$

Для единичного контакта с учетом следующего соотношения для деформации и радиуса закругления R

$$\omega = \frac{\pi l^2}{8R},$$

запишем

$$F_e^0 = 0.059\pi^{9/2}E^*G^{D_S-2}(\ln\gamma)^{1/2}l^{4-D_S}.$$

Нагрузка на всю поверхность равна

$$F_{Ne} = 0,059\pi^{9/2}E^*G^{D_S-2}(\ln\gamma)^{1/2}(D_S - 1)l_{max}^{D_S-1} \cdot \int_0^{l_{max}} l^{4-2D_S}dl = 0,059 \frac{D_S - 1}{5 - 2D_S} \pi^{9/2}E^*G^{D_S-2}(\ln\gamma)^{1/2}l_{max}^{4-D_S}, \quad 0 < l \leq l_{max}.$$

Фактическая площадь контакта зависит от фрактальной размерности и максимальной длины среза выступа

$$A_r = \frac{D_S - 1}{3 - D_S} l_{max}^2.$$

Связь между ФПК и нормальной нагрузкой носит нелинейный характер и приведена на рис. 4.

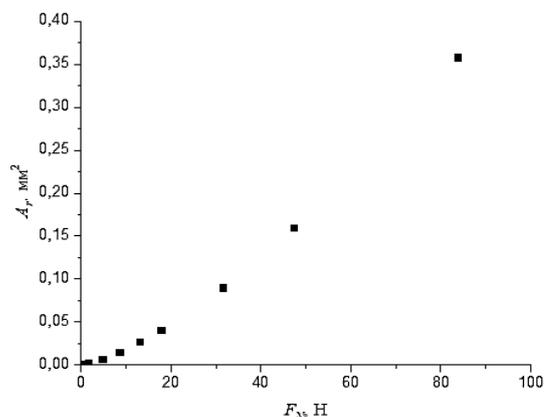


Рис. 4. Зависимость фактической площади контакта от нагрузки

Чтобы найти зависимость сближения от нагрузки используем выражение

$$l = \left(\frac{2}{\pi^3}\right)^{1/(3-D_S)} \frac{\omega^{1/(3-D_S)}}{G^{\frac{D_S-1}{3-D_S}} (\ln \gamma)^{\frac{1}{2(3-D_S)}}}$$

Сила трения в соответствии с рассматриваемой моделью не подчиняется закону Амонтона

$$F_f \neq fF_N.$$

В соответствии с этим определение фактической площади контакта необходимо для оценки силы трения:

$$F_f = (\tau_0 + \beta)A_r + F_{f\text{мех}}.$$

Здесь τ_0 и β – фрикционные показатели, характеризующие свойства (сопротивление на сдвиг) межконтактного образования; $F_{f\text{мех}}$ – механическая составляющая силы трения.

Механическая составляющая силы трения пропорциональна величине (И.В. Крагельский, Н.М. Михин и др. [4, 5])

$$F_{f\text{мех}} = k\sqrt{h/R}F_N,$$

где k – коэффициент, зависящий от деформационного состояния контакта; h – глубина внедрения индентора в деформируемое полупространство; R – радиус верхней части выступа, моделируемого сферическим сегментом.

Учитывая, что $A_r \propto F_N^m$, $m = \frac{2}{(4-D_S)} > 1$, запишем (в соответствии с рис. 4)

$$F_f \propto F_N^m.$$

Таким образом, учет влияния вероятностного распределения радиусов кривизны вершин выступов приводят к тому, что зависимость силы трения от нагрузки носит нелинейный характер, при этом имеет место нарушение закона Амонтона. Управление силой трения можно осуществить, в частности, за счет изменения таких параметров поверхности, как фрактальная размерность D_S и амплитуда фрактальной шероховатости G .

Коэффициент трения скольжения рассматриваемой модели без учета механической составляющей силы трения ($h \ll R$) определяется известной зависимостью

$$f = \frac{\tau_0}{p_r}.$$

Здесь фактическое давление $p_r = F_N/A_r$.

Для рассматриваемой модели в период приработки при постоянной нагрузке и росте фактической площади контакта имеет место рост коэффициента трения, что противоречит экспериментальным данным. Таким образом, чтобы согласовать эффект снижения коэффициента трения в процессе приработки следует в данном случае либо отказаться от понятия коэффициента трения, либо считать непостоянной величину τ_0 .

Выводы

1. Рассмотрены модели контактного взаимодействия шероховатых поверхностей, учитывающие постоянство и разброс радиусов закругления вершин выступов.

2. Показано различие в оценке силы трения для сравниваемых моделей. При постоянстве радиусов кривизны вершин выступов при упругом и пластическом контакте сила трения следует закону Амонтона, а при учете разброса радиусов кривизны – закон Амонтона нарушается.

[1] Greenwood J. A., Williamson J. B. P. Contact of nominally flat surfaces //Proceedings of the royal society of London. Series A. Mathematical and physical sciences. – 1966. – Т. 295. – №. 1442. – С. 300-319.

[2] Bowden F.P., Tabor D. Friction and lubrication of solids. Oxford University Press, 1954.

[3] Whitehouse D. J., Archard J. F. The properties of random surfaces of significance in their contact //Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences. – 1970. – Т. 316. – №. 1524. – С. 97-121.

[4] Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчета на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

[5] Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машин: Справочник. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МДО ПОКРЫТИЙ С МОДИФИЦИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ

¹Торская Е.В.*, ¹Шкалей И.В., ¹Степанов Ф.И., ¹Морозов А.В., ²Мальшев В.Н.

* torskaya@mail.ru

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия;

²РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Россия.

В работе изучается покрытие на высокопрочном алюминиевом сплаве, полученное методом микродугового оксидирования, при формировании которого в электролит в разных концентрациях добавлялись наноалмазы (НА) и микродисперсное серебро. Были проведены испытания на трение и износ при комнатной и повышенных температурах (100 °С и 200 °С), и исследованы дорожки трения и сечения образцов методами микроскопии. Получено, что износ модифицированных покрытий заключается только в сглаживании шероховатостей. Повышение температуры испытаний влечет за собой необходимость увеличивать концентрацию модификаторов для обеспечения стабильного коэффициента трения и предотвращения хрупкого разрушения. Образцы с максимальным объемом модификаторов, добавленных с электролит, имели коэффициент трения в диапазоне 0,34-0,37 при всех температурах.

Ключевые слова: МДО покрытие, трение, износ.

Введение

Широко используемые в авиационной и космической областях высокопрочные алюминиевые сплавы обладают малым удельным весом и стабильностью механических и прочностных свойств, но имеют малую устойчивость к коррозии и низкую износостойкость. Нанесение покрытия методом микродугового оксидирования (МДО) призвано устранить эти недостатки [1]. Кроме того, существует возможность их модификации путем добавления в электролит различных добавок. К перспективным добавкам в случае увеличения износостойкости покрытий можно отнести наноалмазы [2], для снижения коэффициента трения скольжения – серебро [3]. Целью данной работы является изучение трибологических свойств МДО покрытий с комплексным модификатором (порошок наноалмазов и мелкодисперсное серебро) в диапазоне температур от комнатной до 200 °С.

STUDY OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF PEO COATINGS WITH MODIFYING ADDITIVES

Torskaya E.V., Shkalei I.V., Morozov A.V., Stepanov F.I., Malyshev V.N.

The paper studies a coating on a high-strength aluminum alloy obtained by the microarc oxidation method, during the formation of which nanodiamonds (ND) and microdispersed silver were added to the electrolyte in different concentrations. Friction and wear tests were carried out at room and elevated temperatures (100 °C and 200 °C). Friction tracks and sample sections were studied using microscopy methods. It was found that the wear of the modified coatings consists only in smoothing out roughness. Increasing the test temperature entails the need to increase the concentration of modifiers to ensure a stable coefficient of friction and prevent brittle fracture. Samples with the maximum volume of modifiers added to the electrolyte had a friction coefficient in the range of 0.34-0.37 at all temperatures.

Keywords: PEO coating, friction, wear.

Материалы и методы

Для проведения исследований были подготовлены образцы размерами Ø50x7 мм из высокопрочного алюминиевого сплава марки В95, на которых было сформировано МДО покрытие. Для этого использовался базовый слабощелочной электролит, содержащий 2 г/л КОН + 8 г/л жидкого стекла (Na₂SiO₃·9H₂O) + 2 г/л гексаметафосфата натрия (Na₆P₆O₁₈), в который добавляли модификаторы: наноалмазы марки UD-SO-WS (JSC «SINTA») в виде суспензии и серебро в виде порошка марки ПС-1 (НПП «Дельта пасты») в пропорции 1:1 (0, 3, 6, 9 г/л каждого).

Трибологические испытания проводились на трибометре MFT-5000 (Rtec, США) в условиях сухого трения скольжения по схеме «шарик-диск» в соответствии с методикой ASTM G99-23 при температурах: комнатной (~23 °С, отн. влажность 45-50%), 100 и 200 °С. На шарик диаметром 10 мм из диоксида циркония (твердость > 1220 HV)

прикладывалась нормальная нагрузка 10 Н. Линейная скорость скольжения для всех тестов была равна 0,2 м/с, путь трения – 1000 м. Для увеличения полезной площади образцов испытания проводились на дорожках трения с номинальными радиусами 12, 16, 19, 21 мм и 12, 16, 20 мм при повышенных температурах. Перед стартом тестов с нагревом осуществлялась выдержка в течение часа для стабилизации температурного градиента по объему образца. Для каждого меняющегося параметра испытания (температура, нагрузка, материал) было выполнено по 3 теста.

На оптическом профилометре S Neox (Sensofar, Испания) было получено трехмерное изображение всей поверхности каждого образца. Сканирование осуществлялось при пониженной скорости и автоматизированной шивке одиночных кадров в одну область с использованием объектива 10X в конфокальном режиме. Изношенный объем образцов измерен средствами программного обеспечения профилометра.

Исследование морфологии поверхности образцов проводилось на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Quanta 650 (FEI, США) при ускоряющем напряжении 20 кВ в режиме низкого вакуума (остаточное давление 60 Па).

Результаты и обсуждение

В табл. 1 приведены исходные характеристики шероховатости образцов покрытий после шлифовки, их толщины, твердости и модуля упругости. Последние три характеристики определялись на торцевых срезах образцов.

Табл. 1. Исходные характеристики покрытий

Образец	R _a , мкм	Толщина, мкм	Твердость, HV	Модуль упругости, ГПа
1	1,44	60-70	1643	220
2	2,58	70-80	1072	194
3	2,43	60-70	1059	206
4	2,61	65-80	1376	218

Примечание. Стандартное отклонение не более 10%.

На рис. 1 приведены типичные кривые зависимости коэффициента трения от времени, полученные при комнатной температуре.

Начальное значение коэффициента трения, вероятно, зависит от шероховатости покрытий, поэтому оно меньше для образца 1. Со временем сила трения растет для всех образцов, при этом стабилизация наблюдается для образцов 3 и 4. Очевидно, что модификаторы способствуют уменьшению силы трения.

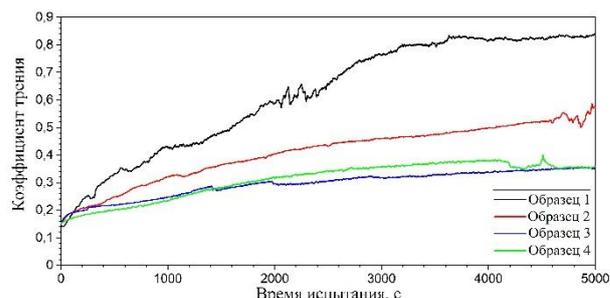


Рис. 1. Типичные зависимости коэффициента трения от времени для всех образцов

В табл. 2 сведены результаты измерения коэффициента трения. При температурах 100 и 200 °С также наблюдалось выкрашивание образцов покрытий 1 и 2. Для оценки значения коэффициента трения использовались данные, полученные в последние 30% времени испытания до выкрашивания либо до окончания эксперимента. В табл. 3 приведены данные по скорости износа.

Табл. 2. Коэффициент трения

Образец	Коэффициент трения при T, °С		
	Комн.	100	200
1	0,68	0,76	0,88
2	0,41	0,81	0,70
3	0,33	0,27	0,61
4	0,37	0,34	0,35

Примечание. Стандартное отклонение не более 10%.

Табл. 3. Скорость износа

Образец	Скорость износа, 10 ⁻⁵ мм ³ ·Н ⁻¹ ·м ⁻¹ при T, °С		
	Комн.	100	200
1	5,23	разрушилось	разрушилось
2	1,89	разрушилось	разрушилось
3	2,85	2,17	7,43
4	2,94	3,55	5,02

Сравнение результатов по трению и изнашиванию показывает, что значения коэффициента трения, зафиксированные в случаях выкрашивания покрытий образцов 1 и 2, достаточно высоки. Наиболее стабильные и слабо зависящие от температуры значения коэффициента трения показали образцы 4 с наибольшим количеством модификатора. Оценка объемного износа показала, что, в основном, за исключением случаев отслаивания покрытий, имеет место износ неровностей и сглаживание покрытия.

На рис. 2 представлены результаты исследования границ дорожек трения образцов 1 и 3 (испытания при комнатной температуре). Наличие циркония указывает на то, что продуктами износа, в основном, являются частицы шарика.

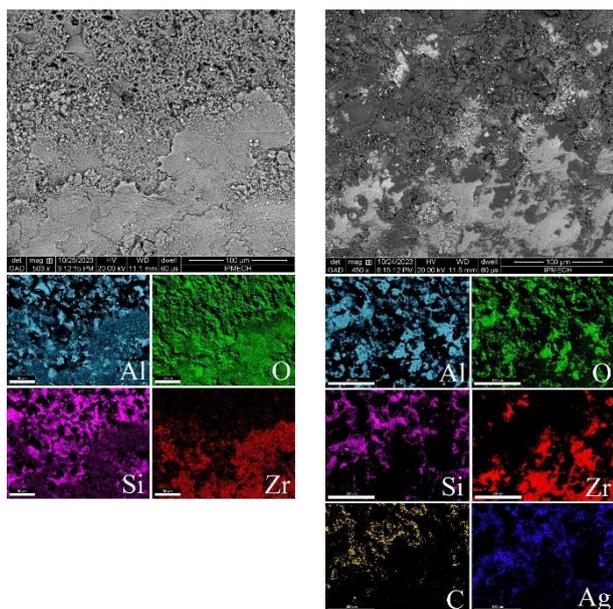


Рис. 2. СЭМ-изображения (в отраженных электронах) границы дорожки трения образцов 1 (слева) и 3 (справа) с распределением отдельных элементов по поверхности

Интересно отметить, что на образце 1 имеются сплошной слой третьего тела, практически скрывающий поверхность покрытия. На поверхности образца 3 частицы износа образуют конгломераты, оставляя свободной часть поверхности трения. Также интересен эффект температуры на поведение частиц износа (рис. 3).

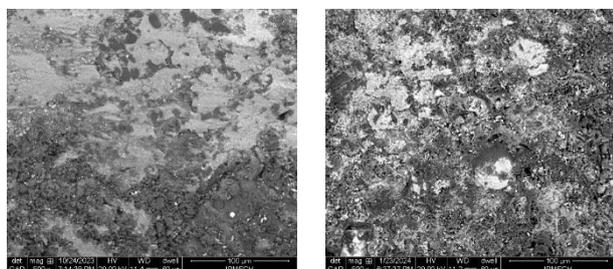


Рис. 3. СЭМ-изображения (в отраженных электронах) дорожек трения образца 4 при комнатной температуре (слева) и 200 °С (справа)

Частицы износа при увеличении температуры собираются в более плотные конгломераты. При температуре 200 °С на границах дорожки трения частиц заметно больше, чем в центре.

Как показали СЭМ исследования, верхний слой модифицированных покрытий содержит меньше пор, при этом в порах содержатся наноалмазы, способные принимать на себя нагрузку и, таким образом, препятствовать образованию микротрещин. Косвенно предположение об увеличении прочности за счет модификации подтверждается тем фактом, что при идентичной финишной механической обработке образцов шероховатость поверхности покрытия без модификаторов почти в

два раза меньше, чем для образцов 2 и 3. Серебро локализуется в тонких поверхностных слоях и, таким образом, не влияет на структуру материала, но влияет на процессы, происходящие при трении.

Начальные значения коэффициента трения определяются шероховатостью поверхности и меньше, для немодифицированных покрытий. Затем начинает изнашиваться шарик, а на поверхности покрытия происходит износ неровностей (за исключением случая образца 1). На поверхности образца 1 частицы износа шарика распределяются тонким ровным слоем, практически не оставляя свободной поверхности на дорожках трения. Таким образом, достаточно быстро образуются области, на которых происходит наиболее неблагоприятное фрикционное взаимодействие, а именно, одинаковых материалов. Для модифицированных образцов с серебром на поверхности трение происходит в менее критическом режиме, поскольку частицы износа собираются в конгломераты, оставляя часть поверхности покрытия свободной, что уменьшает долю неблагоприятного трения. Серебро также может выполнять функцию твердой смазки, особенно при повышенных температурах и в условиях температурных всплесков, возникающих при контакте неровностей.

Заключение

Износ покрытий минимален, его значения соответствуют изнашиванию неровностей. Изнашивается шарик, причем частицы износа существенно влияют на трение. В некоторых случаях при повышенных температурах покрытия разрушаются до подложки.

Стойкость к разрушению напрямую связана с количеством модификатора. Образцы с максимальным содержанием модификаторов в электролите (9 г/л НА + 9 г/л Ag) показали близкие значения коэффициента трения для всех исследованных температурных режимов – от 0,34 до 0,37, а также не разрушались в процессе испытания.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (номер проекта 22-49-02010).

[1] Sikdar S. et al. Plasma Electrolytic Oxidation (PEO) Process— Processing, Properties, and Applications // *Nanomaterials*. – 2021. – Т. 11. – № 6. – С. 1375.

[2] Tran Q.-P. et al. Diamond powder incorporated oxide layers formed on 6061 Al alloy by plasma electrolytic oxidation // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2018. – Т. 751. – С. 289-298.

[3] Qin Y. et al. Adaptive-lubricating PEO/Ag/MoS₂ multilayered coatings for Ti6Al4V alloy at elevated temperature // *Materials & Design*. – 2016. – Т. 107. – С. 311-321.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ВОДНОЙ ОСНОВЕ

Трофименко Б.П.*, Маркелов А.В., Кoryтов А.С.

* bog6741@yandex.ru

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Россия.

Статья посвящена исследованию трибологических свойств смазочных композиций на водной основе. Основная мысль работы заключается в том, что использование водных смазочных масел представляет собой перспективное направление для повышения экологичности и безопасности в машиностроении. Экспериментальная часть работы сосредоточена на исследованиях трибологических свойств смазочных композиций, включая коэффициенты трения, изменение ширины дорожки трения, изменение площади пятна износа, зависимости прироста температуры во времени. Результаты исследования показывают, что водные смазочные композиции могут обеспечивать приемлемые трибологические параметры, сопоставимые с традиционными нефтяными смазками, что утверждает их конкурентоспособность на рынке. Таким образом, основная тема исследования отражает важные аспекты сочетания эффективности смазочных материалов с экологической безопасностью, и стимулирует дальнейшие научные изыскания и практические разработки в этой области.

Ключевые слова: коэффициент динамической вязкости, коэффициент кинематической вязкости, водно-спиртовые растворы, вискозиметр, эбуллиоскоп, коэффициент трения, площадь пятна контакта, ширина дорожки трения.

Введение

Смазочные композиции важны для эксплуатации транспортно-технологических машин, так как они снижают трение между подвижными элементами. Это уменьшает износ и повреждения механизмов. Правильно подобранная смазка образует защитную пленку, которая снижает трение и износ деталей.

Смазочные композиции отводят излишнее тепло, образующееся при работе механизмов, предотвращая перегрев и ускоренный износ деталей. Кроме того, они защищают от коррозии и окисления, образуя защитный слой на поверхностях, что минимизирует контакт металла с воздухом и влагой, тем самым продлевая срок службы механизма. [1]

INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF WATER-BASED LUBRICANT COMPOSITIONS

Trofimenko B.P., Markelov A.V., Korytov A.S.

The article is devoted to the study of tribological properties of water-based lubricant compositions. The main idea of the work is that the use of aqueous lubricating oils is a promising direction for improving environmental friendliness and safety in mechanical engineering. The experimental part of the work is focused on studies of tribological properties of lubricating compositions, including friction coefficients, changes in the width of the friction track, changes in the area of the wear spot, and the dependence of temperature increase over time. The results of the study show that aqueous lubricant compositions can provide acceptable tribological parameters comparable to traditional petroleum lubricants, which confirms their competitiveness in the market. Thus, the main topic of the study reflects important aspects of combining the effectiveness of lubricants with environmental safety, and stimulates further scientific research and practical developments in this area.

Keywords: dynamic viscosity coefficient, kinematic viscosity coefficient, aqueous alcohol solutions, viscometer, ebullioscope, coefficient of friction, contact spot area, friction track width.

Выбор правильной смазочной композиции важен для оптимальной работы механизмов, так как различные механизмы требуют разные типы и вязкости смазочных материалов. Неправильный выбор может привести к недостаточной смазке и повреждению механизмов. [1]

Высокие экологические требования к транспортно-технологическим комплексам обязывают производителей смазок создавать биоразлагаемые продукты для снижения вреда окружающей среде. Поэтому разработка эффективных и экологически чистых смазочных композиций становится важной задачей. [2]

Неустановившиеся режимы работы, значительные перегрузки, субъективные качества оператора, техническое состояние машины,

погодные условия и другие факторы влияют на долговечность трущихся деталей. Этот показатель традиционно повышается за счет улучшения антифрикционных и противоизносных свойств поверхности трения. Исследования М.М. Хрущева, Б.Н. Костецкого, Б.И. Дерягина, И.В. Крагельского и других ученых привели к созданию фундаментальных положений о триботехнических свойствах соединений и новым методам восстановления и упрочнения деталей трибосопряжений. Наиболее эффективным способом повышения долговечности и надежности машин является модификация смазочных материалов. Основное внимание уделялось нефтяным смазкам, однако в связи с ухудшением экологической обстановки, всё больше работ, особенно зарубежных исследователей, посвящены замене нефтяных смазок более экологичными синтетическими композициями.

Материалы и методы

Вода является важным источником для жизни на Земле и обладает уникальными свойствами, применяемыми в различных областях, включая смазку механизмов. Она снижает трение и износ, что способствует продлению срока службы оборудования. Основные преимущества использования воды в качестве смазочного материала включают: высокую теплопроводность, что предотвращает перегрев механизмов; химическую инертность, не вызывающую повреждений поверхностей; высокие охлаждающие свойства; доступность и низкую стоимость; а также экологическую безопасность, поскольку вода не содержит токсичных компонентов. [3]

Одноатомные спирты – органические соединения, содержащие один атом углерода и группу гидроксила. Они обладают разнообразными физическими и химическими свойствами и широко используются в промышленности и медицине. Примеры одноатомных спиртов: метанол, этанол, пентан-1-ол, гексадекан-1-ол, пропан-2-ол. [4]

Глицерин (пропантриол-1, 2, 3) – трехатомный спирт, бесцветная вязкая жидкость без запаха, получаемая в основном при омылении жиров, а также из синтетического сырья (например, пропилена) и продуктов древесной муки или гидролиза крахмала. Основные физические свойства: температура плавления 17,9 °С, температура кипения 290 °С, гигроскопичен, растворим в воде и органических растворителях. [5]

Химические свойства глицерина типичны для одноатомных спиртов. Он реагирует с галогеноводородами и галогенидами, образуя моно- и дигалогенгидрины. Глицерин этерифицируется

карбоновыми и минеральными кислотами с образованием сложных эфиров. С азотной кислотой глицерин образует тринитрат (нитроглицерин), полученный в 1847 году. [5]

Для исследования изготовлено 5 образцов с содержанием загустителя 30, 40, 50, 60 и 70%.

Табл. 1. Составы образцов водно-спиртовых растворов

1	2	3	4	5
35% вода	30% вода	25% вода	20% вода	15% вода
35% ИПС	30% ИПС	25% ИПС	20% ИПС	15% ИПС
30%	40%	50%	60%	70%
глицерин	глицерин	глицерин	глицерин	глицерин

Смазочная способность прототипа исследовалась на стандартной машине трения 2070 СМТ-1, предназначенной для испытания на трение и износ металлов, сплавов и жестких пластмасс. Принцип действия заключается в стирании пары образцов под заданной силой. Схема трения: "вращающийся диск - неподвижный шар". Во время испытаний фиксируются частота вращения, момент трения, сила прижимания, величина износа и температура. Испытания проводятся с предельной нагрузкой до 5 кН, частотой вращения валов до 1500 об/мин и моментом трения до 20 Н·м. Испытываются пары сталь-сталь. Материал диска - сталь 45, закаленная с твердостью HV30 и шероховатостью Ra 0,06-0,08 мкм; материал шара - ШХ-15. Нагрузка на образец составляет от 200 до 700 Н при скорости скольжения 1 м/с. Смазочные свойства композиций характеризуются: шириной дорожки трения (h), коэффициентом трения (f), площадью пятна износа (S) и приростом температуры за 1000 м пробега (ΔT).

Результаты и обсуждение

Исследования влияния нагрузки на коэффициент трения были проведены для 5 образцов (табл. 1), согласно методике. Результаты исследований представлены на рис. 1.

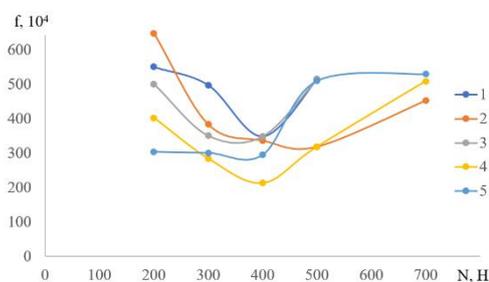


Рис. 1. Зависимости коэффициента трения от нагрузки: 1, 2, 3, 4, 5 – опытные образцы согласно табл. 1

Как видно из рис. 1 коэффициент трения изменялся от 0,0214 до 0,0649, что является показателем, соответствующим высоко-

качественным трансмиссионным минеральным и синтетическим маслам. У образцов 1 и 3 при нагрузке в 500 Н происходило схватывание роликов, у остальных такого не происходило. Наилучшие показатели были у образца 2.

Исследования влияния нагрузки на изменение ширины дорожки трения проводились для 5 образцов (табл. 1) по методике. Результаты исследования представлены на рис. 2.

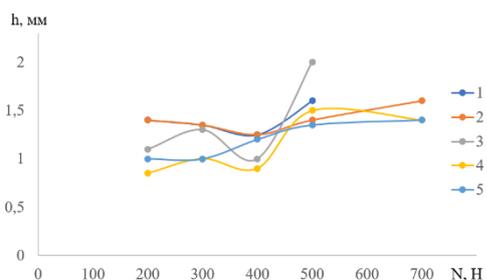


Рис. 2. Зависимости ширины дорожки трения от нагрузки: 1, 2, 3, 4, 5 – опытные образцы согласно табл. 1

Как видно из рисунка 2 дорожка трения изменялась от 0,9 до 2 мм, что является показателем, соответствующим высококачественным трансмиссионным минеральным и синтетическим маслам. У образцов 1 и 3 при нагрузке в 500 Н происходило схватывание роликов, у остальных такого не происходило. Наилучшие показатели были у образцов 2, 4 и 5.

Исследования влияния нагрузки на изменение площади пятна износа проводились для 5 образцов (табл. 1) по методике, изложенной ранее. Результаты исследования представлены на рис. 3.

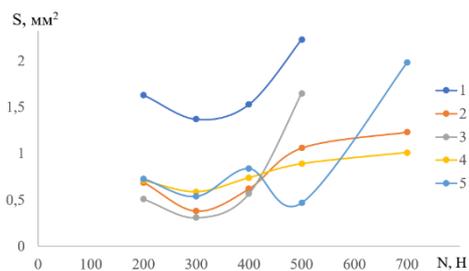


Рис. 3. Зависимости площади пятна износа от нагрузки: 1, 2, 3, 4, 5 – опытные образцы согласно табл. 1

Как видно из рис. 3 площадь пятна износа изменялась от 0,47 до 2,33 мм², что является показателем, соответствующим высококачественным трансмиссионным минеральным и синтетическим маслам. У образцов 1 и 3 при нагрузке в 500 Н происходило схватывание роликов, у остальных такого не происходило. Наилучшие показатели были у образцов 2 и 4. Исследования зависимости прироста температуры во времени от нагрузки проводились для 5 образцов (табл. 1) по методике,

изложенной ранее. Результаты исследования представлены на рис. 4.

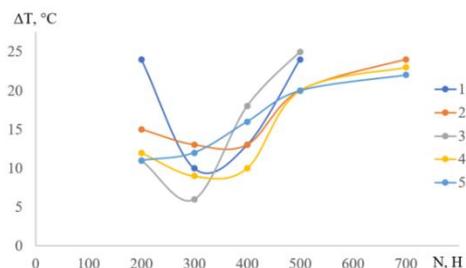


Рис. 4. Результаты зависимости прироста температуры во времени от нагрузки: 1, 2, 3, 4, 5 – опытные образцы согласно табл. 1

Как видно из рисунка 4 прирост температуры составил от 6 до 25 °С, что является показателем, соответствующим высококачественным трансмиссионным минеральным и синтетическим маслам. У образцов 1 и 3 при нагрузке в 500 Н происходило схватывание роликов, у остальных такого не происходило. Наилучшие показатели были у образцов 2, 4 и 5.

Заключение

С ухудшением состояния окружающей среды растет необходимость в разработках, направленных на замену нефтяных смазочных материалов более безопасными для природы синтетическими составами. Среди прочих такими являются смазочные материалы на водной основе.

В исследовании предложен смазочный материал, состоящий из воды, спирта и глицерина.

Были проведены исследования 5 прототипов (табл. 1) с различной концентрацией составляющих веществ на машине трения 2070 СМТ-1.

По результатам лабораторных испытаний лучшим себя показал образец 2 (табл. 1) содержащий 30% дистиллированной воды, 30% пропан-2-ол и 40% загустителя в виде пропантриол-1, 2, 3.

[1] Sagraloff N. et al. Investigations on the scuffing and wear characteristic performance of an oil free water-based lubricant for gear applications //Lubricants. – 2021. – Т. 9. – №. 3. – С. 24.

[2] Sagraloff N. et al. Development of an oil free water-based lubricant for gear applications //Lubricants. – 2019. – Т. 7. – №. 4. – С. 33.

[3] Вода как идеальное смазывающее вещество. Заглавие с экрана. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://iskonspb.ru/voda/voda-kak-idealnoe-smazocnoe-veshhestvo?ysclid=lry15fx5za533776154>. - Дата обращения 08.09.2024

[4] Одноатомные спирты: основные свойства и их влияние на химические реакции. Заглавие с экрана. Электронный ресурс. Режим доступа: <https://nauchniestati.ru/spravka/svoystva-odnoatomnyh-spirov/?ysclid=lry1bwn0u3288868022>. - Дата обращения 08.09.2024

[5] Физико-химические свойства глицерина и его применение. Заглавие с экрана. Электронный ресурс. Режим доступа: https://studopedia.net/2_32675_fiziko-himicheskie-svoystva-glitserina-i-ego-primenenie.html?ysclid=lry1ew2y4g240125356. - Дата обращения 08.09.2024

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СМАЗОЧНЫХ ПЛЕНОК ПРИ МИКРОДОЗИРОВАННОЙ ПОДАЧЕ СМАЗКИ

Труфанов О.П.*, Новиков В.В.

* oleg.trufanoff@gmail.com

Ивановский государственный университет, Иваново, Россия.

Проведена апробация методики определения долговечности смазочной пленки в условиях обедненной смазки при микродозированной подаче в узел трения. Получены результаты влияния на долговечность вида смазочных материалов, смазочных материалов, наличия в них присадок и наполнителей, а также степени отработки масла

Ключевые слова: смазка, долговечность, пленка, трение, изнашивание.

Введение

Смазочные материалы являются неотъемлемой частью узлов трения, обеспечивая ему требуемый режим работы и ресурс долговечности. Если по каким-то причинам смазка перестает поступать в узел трения или узел трения является закрытым, то тогда узел сохраняет свою работоспособность лишь непродолжительное время, пока оставшаяся смазка способна смазывать. Такой режим называется режим с обедненной смазкой. Исследовать трение в таком аварийном режиме – актуально, поскольку можно получить информацию о том, сколько узел может сохранять работоспособность.

Исследование долговечности смазочных слоев при обедненной смазке ведутся различными методами [1-3]. Единого подхода нет. Большинство исследований наносит смазочный материал контролируемой толщины, который нельзя применить для широкого спектра смазочных материалов.

Это делает затруднительным исследование свойств тонких слоев смазки сложного состава, например, пластичных, требует совершенствования экспериментальных методов исследования.

Цели и задачи исследования

Целью нашей работы является апробирование методики испытаний долговечности смазочных пленок на широко распространенной машине трения СМЦ-2 в условиях микродозированной подачи смазочного материала и определение долговечности ряда распространенных смазочных материалов.

THE STUDY OF THE LUBRICATING FILMS DURABILITY WITH A MICRODOSED SUPPLY OF LUBRICANT

Trufanov O.P., Novikov V.V.

The approbation of the methodology for determining the durability of the lubricating film in conditions of depleted lubrication with microdosed supply to the friction unit was carried out. The results of the influence on the durability of the type of lubricants, lubricants, the presence of additives and fillers in them, as well as the degree of oil refining were obtained

Keywords: lubrication, durability, film, friction, wear.

Задачи исследования:

— отработать методику исследований долговечности смазочной пленки на машине трения СМЦ-2 в условиях микродозированной подачи смазки;

— исследовать свойства ряда смазочных материалов на долговечность и сделать анализ полученных результатов.

Материалы и методы исследований

Исследования проводились на широко распространенной в лабораториях машине трения СМЦ-2. Для проведения испытания был использован пара трения диск-колодка. Диск изготавливался из стали 45 диаметром 50 мм и шириной 11 мм. Ролик был термически обработан (закалка и низкий отпуск). Твердость ролика составила 59 HRC. Колодка была получена из аналогичного ролика путем приработки. Испытания проводили при постоянной скорости скольжения – 200 об/мин (0,523 м/с) и нагрузка в 500 Н (номинальное давление на контакте – 6 МПа). Перед сопряжением диск и колодка протирались растворителем для устранения следов остаточной смазки. После включения узел трения прирабатывался при трении в сухую. В результате такого трения момент на валу возрастал до максимальных значений несмазанной пары трения.

После приработки на вращающийся ролик наносилась с помощью кисти микродоза исследуемого смазочного материала. Количество нанесенной смазки контролировалось взвешиванием кисти со смазкой до и после нанесения с помощью

аналитических весов с точностью до 0,1 мг. В ходе испытания фиксировали момент трения. При резком возрастании момента до значений трения до использования смазочного материала, машину останавливали и фиксировали время, которое понадобилось для износа смазки, а также вычисляли число циклов стойкости смазки N (рис. 1).

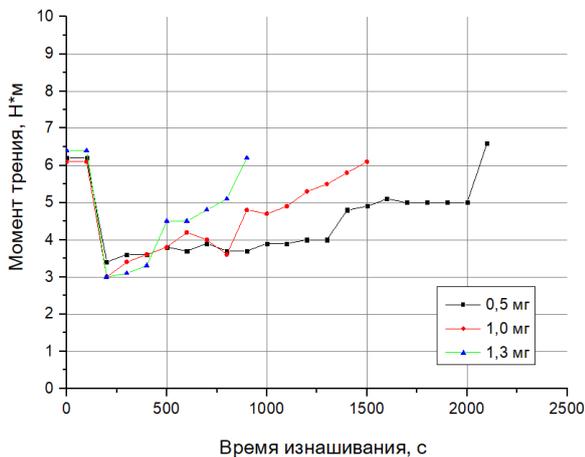


Рис. 1. Изменение момента трения при изнашивании смазочной пленки вазелинового масла

Для эксперимента использованы вазелиновое масло, вазелиновое масло с присадкой жидкого кристалла Х4, отработанное вазелиновое масло с присадкой жидкого кристалла Х4, пластичные смазочные материалы – ЦИАТИМ-201 и графитовая смазка.

При каждом смазочном материале проводили не менее 5-10 опытов. Разброс в нанесении количества смазочного материала дает нам возможность построить график зависимости между массой нанесенной смазки и долговечностью смазочной пленки и рассчитать методами регрессионного анализа коэффициент между массой нанесенной присадки и ее долговечностью – коэффициент долговечности (рис. 2).

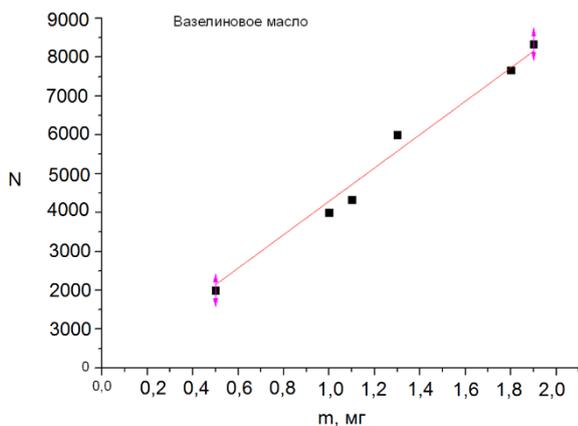


Рис. 2. Влияние массы микродозы смазочного материала на долговечность смазочной пленки

Результаты и их обсуждение

Результаты исследований выбранных смазочных материалов приведены на слайде. Значения коэффициента долговечности сведены в таблицу и представлены на диаграмме (рис. 2). По коэффициенту долговечности видно, что масла обеспечивают более высокую долговечность пленки, чем пластичные смазки. Например, вазелиновое масло имеет долговечность 4291 ± 92 цикл/мг, а ЦИАТИМ-201 – 1076 ± 26 цикл/мг. Это связано с текучестью масла, позволяющей ему восстанавливать пленку на поврежденных участках.

Табл. 1. Коэффициент долговечности смазочной пленки

Смазка	Коэффициент долговечности K, цикл/мг
Вазелиновое масло	4291 ± 92
ЦИАТИМ-201	1076 ± 26
Графитовая смазка	2386 ± 75
Вазелиновое масло + 2% Х4	4910 ± 236
Вазелиновое масло +2% х4 отработанное	4131 ± 245

Долговечность масла зависит от трибоактивных присадок. Добавление 2% антифрикционной присадки Х4 увеличивает долговечность пленки на 15%. Однако этот эффект в отработанном масле не обнаруживается. Коэффициент долговечности снижается до уровня базового масла. Сравнение пластичных смазок показало, что долговечность ЦИАТИМ-201 в два раза ниже, чем у графитовой смазки, что делает последнюю предпочтительнее для узлов трения.

Выводы

Испытанная нами методика определения долговечности смазочной пленки с помощью микродозированной подачи показала свою состоятельность. Исследования по этой методике показывают, что долговечность смазочного слоя прямо пропорционально зависит от количества смазочного материала в узле, что не противоречит данным, полученным другими исследователями.

Для количественной характеристики долговечности смазки мы предлагаем использовать коэффициент долговечности K – число циклов, в течении которых масса смазки способна обеспечить смазанное трение, отнесенное к ее весу, внесенному в исследуемый узел.

Исследованиями установлено, что жидкие масла обеспечивают большую долговечность смазочной пленки, чем пластичные смазки. Внесение в смазку трибоактивной присадки повышает долговечность смазочной пленки. Долговечность свежеприготовленной смазки с

присадкой выше, чем отработанной. Графитовая пластичная смазка более чем в два раза более долговечная, чем ЦИАТИМ-201.

[1] Крагельский И. В. Трение и износ. Изд. 2-е перераб. и доп. М., изд-во «Машиностроение», 1968. – 480 с.

[2] Решетов Д. Н., Детали и механизмы металлорежущих станков, т. 1. – М.: «Машиностроение», 1972. – 664 с.

[3] Новиков В.В., Федоров М.С., Сырбу С.А., Колбашов М.А. Моделирование изнашивания наноразмерных смазочных пленок при граничном трении в условиях обедненной смазки // Пожарная и аварийная безопасность. – 2022. – №1(24). – С. 22-26

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАДИАЛЬНЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ДЕФОРМАЦИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

Усов П.П.

usovp@mail.ru

Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Москва, Россия.

Предложена методика расчета минимальной толщины смазочного слоя и максимальной температуры в радиальном подшипнике скольжения с частичным углом охвата. Методика может быть использована для расчета опор валков прокатных станков и получена путем обработки большого количества решений неизоэтермической УГД задачи смазки подшипника. Расчет состоит в решении нелинейного уравнения относительно температуры на входе в рабочий зазор, используя шесть семейств кривых, и последующего определения максимальной температуры в смазочном слое и минимальной толщины смазочного слоя по приведенным графикам.

Ключевые слова: радиальный подшипник скольжения, УГД задача, минимальная толщина смазочного слоя, максимальная температура в подшипнике.

Введение.

В крупногабаритных радиальных подшипниках скольжения, например, в опорах валков прокатных станков, при высоких нагрузках деформации разделенных смазочным слоем поверхностей существенно изменяют форму зазора, что влечет к изменению распределения давления в смазочном слое и, соответственно, к изменению несущей способности смазочного слоя. Точный расчет крупногабаритных радиальных подшипников скольжения при высоких скоростях скольжения возможен только при учете деформаций поверхностей и тепловых процессов, протекающих в подшипнике. В работе [1] приведен метод решения

ENGINEERING METHODOLOGY FOR CALCULATING RADIAL SLIDING BEARINGS TAKING INTO ACCOUNT DEFORMATIONS OF FRICTION SURFACES.

Usov P.P.

A method for calculating the minimum film thickness and the maximum temperature in a radial sliding bearing with a partial coverage angle is proposed. The technique can be used to calculate the roll supports of rolling mills and is obtained by processing a large number of solutions to the non-isothermal EHD bearing lubrication problem. The calculation consists in solving a nonlinear equation with respect to the temperature at the entrance to the working gap using six families of curves, and then determining the maximum temperature in the lubricant layer and the minimum film thickness according to the graphs shown.

Keywords: radial sliding bearing, UGD task, minimum thickness of the lubricating layer, maximum temperature in the bearing.

плоской неизоэтермической УГД задачи смазки радиального подшипника скольжения с частичным углом охвата. Задача состоит в решении системы интегральных, дифференциальных и нелинейных алгебраических уравнений относительно давления, температуры, плотности, вязкости смазочного материала и толщины смазочного слоя. Решение данной системы уравнений является сложной задачей.

Путем обработки большого количества численных решений данной задачи была разработана инженерная методика, позволяющая получать приближенные, но близкие к точным значениям, значения минимальной толщины

смазочного слоя, температуры на входе в рабочий зазор и максимальной температуры в смазочном слое. Методика применима для подшипников с углом охвата $2\pi/3$.

Инженерная методика расчета.

Входными параметрами являются: E , ν – модуль упругости и коэффициент Пуассона вала и подшипника, R – радиус вала, L – длина подшипника, ψ – относительный радиальный зазор, u – скорость скольжения, W – нагрузка на подшипник, μ_{40} – вязкость масла при температуре 40°C , m – коэффициент зависимости вязкости смазочного материала от температуры, T_{ex} – температура смазки на входе во входной карман. Рассмотрим случай, когда количество масла, прокачиваемого через подшипник, задано и равно Q . Расчет производим следующим образом.

1. Задаем относительную погрешность ε , с которой требуется определить минимальную безразмерную толщину смазочного слоя.

2. Находим вязкость смазки при температуре T_{ex}

по формуле
$$\mu_{\text{ex}} = \mu_{40} \left(\frac{40}{T_{\text{ex}}} \right)^m$$

3. Вычисляем
$$S = \frac{\mu_{\text{ex}} u^2}{\lambda T_{\text{ex}}}, \quad V_0 = \frac{48 \mu_{\text{ex}} u}{RE' \psi^3},$$

$$K_2 = \frac{L \mu_{\text{ex}} u^2}{\rho_0 c Q T_{\text{ex}} \psi}$$

4. Задаем начальное приближение безразмерной минимальной толщины смазочного слоя H_{min} , которое обозначим $H_{\text{min}}^{(0)}$

5. По графику на рис. 1 находим значение параметра α_0 .

6. Решаем уравнение

$$f(t_c) = (t_c - 1) = K_2 \frac{q_0}{t_c^m} \exp \left[- \left(\alpha_0 + 0,0584 \frac{V_0}{t_c^m} \right) \frac{S}{t_c^{(m+1)}} \right] \quad (1)$$

относительно t_c . Для этого задаем несколько значений t_c . При каждом значении t_c вычисляем $V_c = V_0 / t_c^m$, используя графики на рис. 2 определяем $q_{T,0}$ и вычисляем правую часть выражения (1), равную значению $f(t_c)$. Далее строим график зависимости $f(t_c)$. На этом же рисунке строим график зависимости $(t_c - 1)$ от параметра t_c . Абсцисса точки пересечения графиков и будет решением уравнения (1) относительно t_c .

7. Вычисляем $S_t = S / t_c^{(m+1)}$ и по графикам на рис. 3 находим t_{max} .

8. Вычисляем параметры
$$\mu_m = \frac{\mu_{\text{ex}}}{(t_c t_{\text{max}})^m},$$

$$V_m = \frac{48 \mu_m u}{RE' \psi^3} = \frac{V_0}{(t_c t_{\text{max}})^m} = \frac{V_c}{t_{\text{max}}^m} \quad \text{и} \quad B = \frac{W \psi^2}{6 \mu_m u L}$$

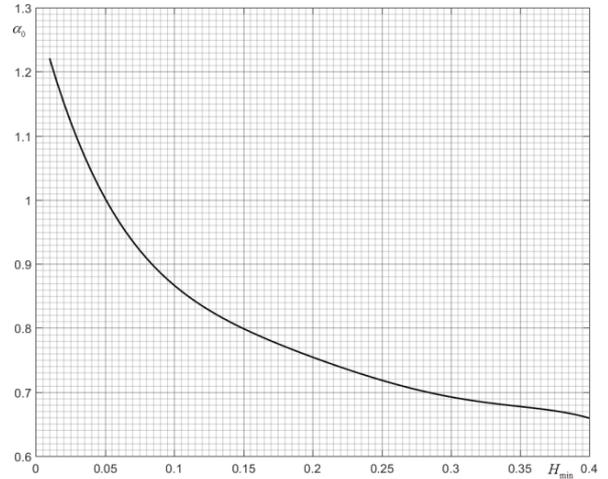


Рис. 1. Зависимость параметра α_0 от H_{min}

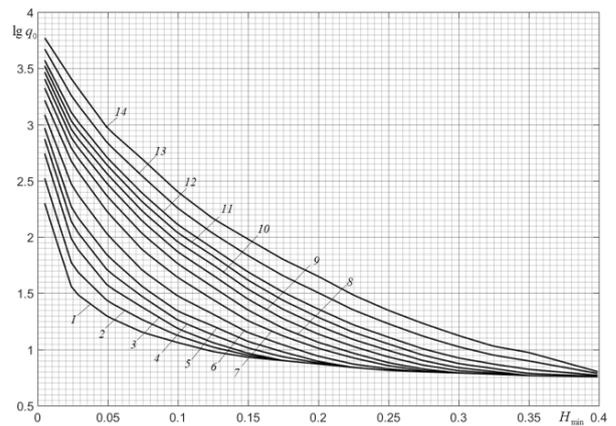


Рис. 2. Зависимость $\lg q_0$ от H_{min} при различных значениях параметра V_c : 1 – $V_c = 0$; 2 – $V_c = 0,05$; 3 – $V_c = 0,1$; 4 – $V_c = 0,15$; 5 – $V_c = 0,2$; 6 – $V_c = 0,3$; 7 – $V_c = 0,6$; 8 – $V_c = 1$; 9 – $V_c = 1,5$; 10 – $V_c = 2$; 11 – $V_c = 2,5$; 12 – $V_c = 3$; 13 – $V_c = 4$; 14 – $V_c = 5$

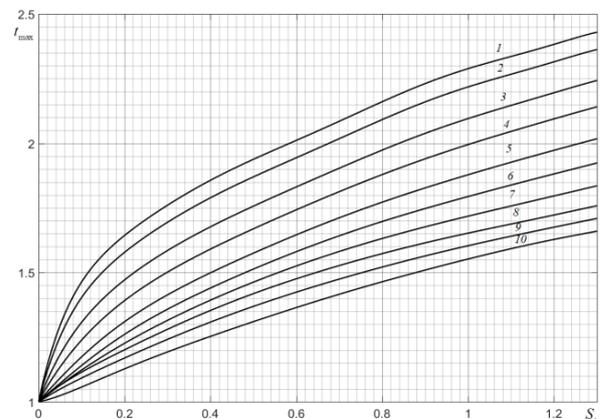


Рис. 3. Зависимости t_{max} от параметра $S_t = S / t_c^{(m+1)}$ при различных значениях H_{min} : 1 – $H_{\text{min}} = 0,01$; 2 – $H_{\text{min}} = 0,02$; 3 – $H_{\text{min}} = 0,04$; 4 – $H_{\text{min}} = 0,06$; 5 – $H_{\text{min}} = 0,09$; 6 – $H_{\text{min}} = 0,12$; 7 – $H_{\text{min}} = 0,16$; 8 – $H_{\text{min}} = 0,22$; 9 – $H_{\text{min}} = 0,3$; 10 – $H_{\text{min}} = 0,4$

9. Используя графики на рис. 4-6 и полученные значения V_m и B определяем новое значение H_{min} , которое обозначим $H_{min}^{(1)}$.

10. Проверяем выполнение условия $|H_{min}^{(0)} - H_{min}^{(1)}| / H_{min}^{(1)} < \varepsilon$.

11. Если это условие не выполняется, корректируем значение H_{min} и повторяем вычисления по пунктам 4-10. Коррекцию H_{min} и повторение вычислений по пунктам 4-10 повторяем до тех пор, пока условие в п. 9 не выполнится.

12. После выполнения условия в п. 9 определяем $h_{min} = H_{min} \psi R$, $T_c = t_c T_{ex}$, $T_{max} = t_{max} T_c$.

Расчеты по указанной методике для подшипника с параметрами $E = 200 \text{ ГПа}$, $\nu = 0,3$, $R = 0,09 \text{ м}$, $L = 0,135 \text{ м}$, $\psi = 0,004$, $u = 10 \text{ м/с}$, $K = \frac{W}{(2RL)} = 8 \frac{\text{МН}}{\text{м}^2}$, $W = 0,1944 \text{ МН}$, масло Т22, $\mu_{40} = 0,03$, $m = 2$, $T_{ex} = 303 \text{ К}$, $Q = 1,9 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$ дали результаты: $h_{min} = 5,54 \text{ мкм}$, $T_c = 313 \text{ К}$, $T_{max} = 351,8 \text{ К}$.

В работе [2] получены следующие результаты экспериментальных исследований данного подшипника при данной скорости и данной нагрузке на подшипник: $h_{min} = 6 \text{ мкм}$, $T_c = 313 \text{ К}$, $T_m = 350 \text{ К}$. Здесь T_m – средняя температура масла в нагруженной зоне подшипника. Данная температура должна быть меньше максимальной температуры в смазочном слое T_{max} . Сопоставление результатов расчета и эксперимента показывает их хорошее совпадение.

[1] Албагачиев А.Ю., Усов П.П. Неизотермическая упругогидродинамическая задача для радиального подшипника скольжения // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2023. – №4. – С. 12-19.

[2] Опоры скольжения тяжелых машин / Снеговский Ф.П. – М.: Машиностроение, 1969. – 224 с.

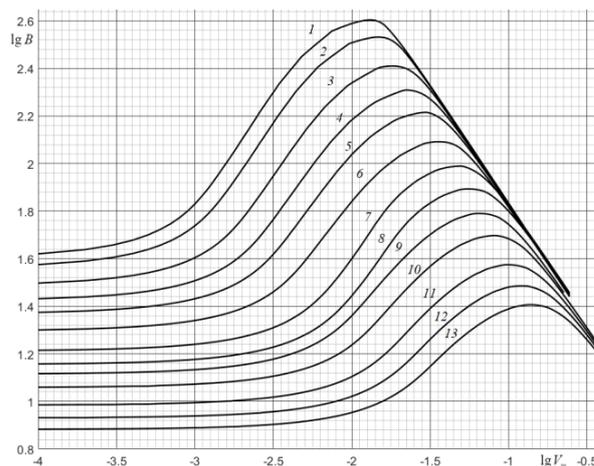


Рис. 4. Зависимости $\lg B$ от $\lg V_m$ при различных значениях H_{min} : 1 – $H_{min} = 0,01$; 2 – $H_{min} = 0,011$; 3 – $H_{min} = 0,013$; 4 – $H_{min} = 0,015$; 5 – $H_{min} = 0,017$; 6 – $H_{min} = 0,02$; 7 – $H_{min} = 0,022$; 8 – $H_{min} = 0,25$; 9 – $H_{min} = 0,03$; 10 – $H_{min} = 0,034$; 11 – $H_{min} = 0,04$; 12 – $H_{min} = 0,045$; 13 – $H_{min} = 0,05$

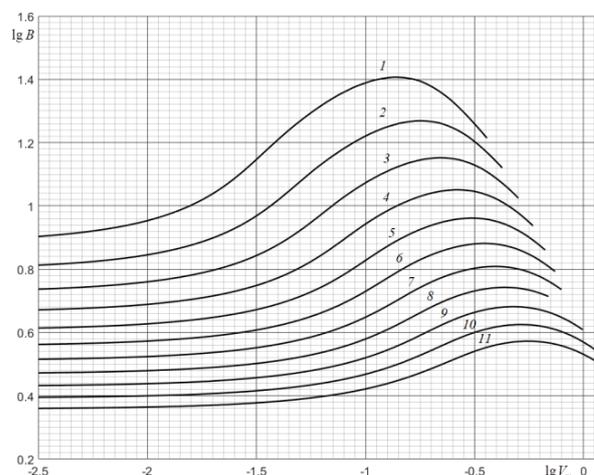


Рис. 5. Зависимости $\lg B$ от $\lg V_m$ при различных значениях H_{min} : 1 – $H_{min} = 0,05$; 2 – $H_{min} = 0,06$; 3 – $H_{min} = 0,07$; 4 – $H_{min} = 0,08$; 5 – $H_{min} = 0,09$; 6 – $H_{min} = 0,1$; 7 – $H_{min} = 0,11$; 8 – $H_{min} = 0,12$; 9 – $H_{min} = 0,13$; 10 – $H_{min} = 0,14$; 11 – $H_{min} = 0,15$

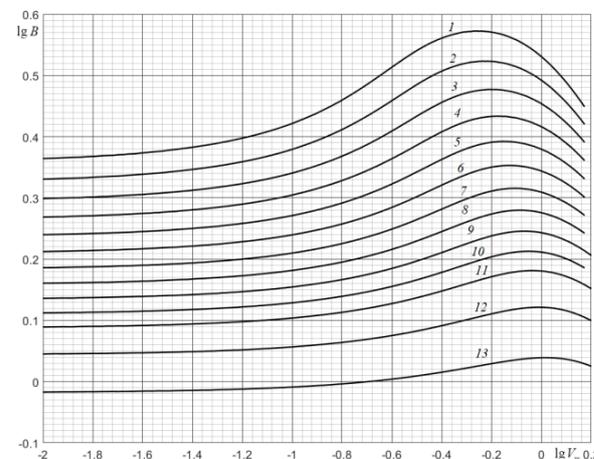


Рис. 6. Зависимости $\lg B$ от $\lg V_m$ при различных значениях H_{min} : 1 – $H_{min} = 0,15$; 2 – $H_{min} = 0,16$; 3 – $H_{min} = 0,17$; 4 – $H_{min} = 0,18$; 5 – $H_{min} = 0,19$; 6 – $H_{min} = 0,2$; 7 – $H_{min} = 0,21$; 8 – $H_{min} = 0,22$; 9 – $H_{min} = 0,23$; 10 – $H_{min} = 0,24$; 11 – $H_{min} = 0,25$; 12 – $H_{min} = 0,27$; 13 – $H_{min} = 0,3$;

АДАПТИВНО-ДИССИПАТИВНАЯ МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ КОНТАКТА ТРЕНИЯ

Федоров С.В.

fedorov@klgtu.ru

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», Калининград, Россия.

Структурно-энергетический взгляд на природу процесса трения позволяет обобщить ряд физических закономерностей этого природного феномена. Обосновано общее системно-эволюционное свойство контакта трения. Адаптивно-диссипативный механизм эволюции контакта трения обосновывает принцип оптимальной совместимости трущихся поверхностей в прикладных задачах, что актуально для фундаментальных основ трибологии как современной междисциплинарной науки и инженерии.

Ключевые слова: трение, эволюция, энергия, адаптация, элементарная трибосистема, диссипация, совместимость, синергия.

Введение

Контакт трения живет своей собственной жизнью – он эволюционирует – приспосабливается, меняет свои размеры, состояние и свойства. Материальная система трибологического контакта, находящаяся под спектром внешнего воздействия, стремится обеспечить свою сохранность и реализовать наивысшую долговечность (сопротивление разрушению). По каким закономерностям протекает процесс приспособления трущихся поверхностей и каков общий механизм этого приспособления?

Метод исследования

Рассматривается структурно-энергетическая схема (интерпретация) процесса объемной и поверхностной пластической деформации твердых тел В.В. Федорова [1], имеющая теоретическое и экспериментальное обоснование (рис. 1).

Соответственно, работа трения – это работа совместной деформации и разрушения трущихся поверхностей. Здесь естественно акцентируется принцип совместимости трущихся поверхностей Н.А. Буше и важность учета работы трения. Согласно схеме рис. 1 уравнение баланса трения имеет классический двучленный вид – накопление внутренней энергии деформации и ее высвобождение – рассеяние. Собственно, и механизм эволюции контакта трения сводится к двухстадийной схеме приспособления.

ADAPTIVE-DISSIPATIVE MODEL OF THE EVOLUTION OF FRICTION CONTACT

Fedorov S.V.

A structural and energy view of the nature of the friction process allows us to generalize a number of physical patterns of this natural phenomenon. The general system-evolutionary property of friction contact is substantiated. The adaptive-dissipative mechanism of the evolution of friction contact substantiates the principle of optimal compatibility of rubbing surfaces in applied problems, which is relevant for the fundamental foundations of tribology as a modern interdisciplinary science and engineering.

Keywords: friction, evolution, energy, adaptation, elementary tribosystem, dissipation, compatibility, synergy.

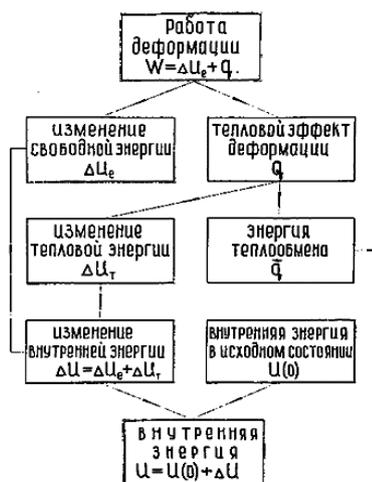


Рис. 1. Схема энергетического баланса процесса пластической деформации и разрушения твердых тел [1]

Работу w_f внешних сил F при трении на пути l для единицы деформируемого (контактного) объема [2] можно представить следующим образом:

$$w_f = w_{plast} = \Delta u_e + q; \quad (1)$$

$$\dot{w}_f = \dot{w}_{plast} = \dot{u}_e + \dot{q}. \quad (2)$$

Здесь $\dot{w}_f = dw_f/dt$ – мощность трения (диссипации) энергии; $\dot{u}_e = du_e/dt$ – скорость накопления скрытой энергии в деформируемых (контактных) объемах; $\dot{q} = dq/dt$ – мощность теплового эффекта пластической деформации (трения).

Выделим на контакте двух неровностей (рис. 2) общую малую (единичную) точку и запишем для контактного объема этой точки, принадлежащей обоим материалам, составляющих пару трения, следующее:

$$w_f = \Delta u_{e1} + \Delta u_{e2} + q_1 + q_2; \quad (3)$$

$$\dot{w}_f = \dot{u}_{e1} + \dot{u}_{e2} + \dot{q}_1 + \dot{q}_2. \quad (4)$$

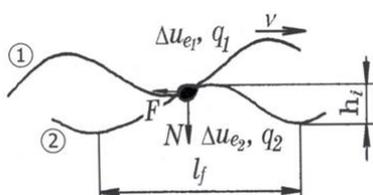


Рис. 2. Условная схема контакта твердых тел при трении [2]

Данные уравнения (1)-(4) показывают, что с термодинамической точки зрения работу сил трения w_f (мощность трения \dot{w}_f) можно условно разделить на две специфические части. Первая часть работы трения w_f связана с изменением в деформируемых (контактных) объемах материалов скрытой (потенциальной) энергии Δu_{e1} ; Δu_{e2} различного рода элементарных дефектов и повреждений, зарождающихся и накапливающихся в деформируемых объемах. Эта энергия является однозначной и интегральной характеристикой субмикро- и микроструктурных изменений, которые протекают в пластически деформируемых объемах материалов [1, 2]. Она является мерой деформационного упрочнения и повреждаемости материалов. Вторая часть работы трения w_f связана с процессами динамического возврата, сопровождающимися высвобождением скрытой энергии и тепловым эффектом трения q_1, q_2 . Эта энергия связана с движением и уничтожением различного рода элементарных дефектов противоположных знаков, выходом их на поверхность, залечиванием обратимых субмикроскопических нарушений сплошности и т.д.

Согласно [1, 2] и рис. 1 тепловой эффект трения q следует представить в виде суммы двух составляющих Δu_T и \dot{q} . Первая составляющая Δu_T представляет тепловой эффект трения в виде эффекта саморазогрева контактного объема с температурой T_f :

$$\Delta u_T = \int_{\theta}^{T_f} \rho c dT, \quad (5)$$

где θ – температура материала до деформирования; ρ, c – плотность и теплоемкость материала.

Вторая составляющая \dot{q} представляет так называемую «транзитную» составляющую [1]

теплого эффекта трения, которая по существу характеризует динамическую диссипативную составляющую трения [2].

В наиболее общем случае уравнения (3) и (4) следует представить с учетом реальных (не единичных) размеров трибоконтакта V_{f1} и V_{f2} :

$$W_f = \Delta U_{e1} + \Delta U_{e2} + Q_1 + Q_2 = \Delta U_{e\Sigma} + Q_{\Sigma}; \quad (6)$$

$$\dot{W}_f = \dot{U}_{e1} + \dot{U}_{e2} + \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 = \dot{U}_{e\Sigma} + \dot{Q}_{\Sigma}, \quad (7)$$

где $\Delta U_{e\Sigma} = \Delta u_{e1}V_{f1} + \Delta u_{e2}V_{f2}$ и $\dot{U}_{e\Sigma} = \dot{u}_{e1}V_{f1} + \dot{u}_{e2}V_{f2}$ – изменение и скорость изменения накопленной скрытой энергии в контактных объемах пары трения; Q_{Σ} и \dot{Q}_{Σ} – тепловой эффект трения и его мощность; V_{f1}, V_{f2} – контактные (деформируемые) объемы материалов 1 и 2 пары трения (рис. 2).

Решая уравнения (6) и (7) относительно силы трения, получим обобщенные уравнения для силы трения:

$$F_l = \frac{\Delta U_{e1} + \Delta U_{e2} + Q_1 + Q_2}{l} = \frac{\Delta U_{e\Sigma}}{l} + \frac{Q_{\Sigma}}{l}; \quad (8)$$

$$F_t = \frac{\dot{U}_{e1} + \dot{U}_{e2} + \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2}{v} = \frac{\dot{U}_{e\Sigma}}{v} + \frac{\dot{Q}_{\Sigma}}{v}. \quad (9)$$

Соответственно, представим обобщенные уравнения для коэффициента трения μ :

$$\mu_l = \frac{\Delta U_{e1} + \Delta U_{e2} + Q_1 + Q_2}{Nl} = \frac{\Delta U_{e\Sigma}}{Nl} + \frac{Q_{\Sigma}}{Nl}; \quad (10)$$

$$\mu_t = \frac{\dot{U}_{e1} + \dot{U}_{e2} + \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2}{Nv} = \frac{\dot{U}_{e\Sigma}}{Nv} + \frac{\dot{Q}_{\Sigma}}{Nv}. \quad (11)$$

Здесь F_l ; F_t и μ_l ; μ_t – значения силы и коэффициента трения, соответствующих пути трения l , и соответственно их значения в единицу времени t .

Таким образом, **термодинамический анализ процесса пластической деформации и разрушения объема твердого тела позволяет получить обобщенные (двучленные) соотношения для работы W_f и мощности трения \dot{W}_f , силы трения F и коэффициента трения μ** , что соответствует современным представлениям о двойственной природе трения [3-6 и др.].

Структурно-энергетическая интерпретация коэффициента трения скольжения [2] имеет вид:

$$\mu = \mu_{adapt} = \frac{F}{N} = \frac{\Delta U_{ei}}{\mu^* N l} = \frac{V_f \Delta u_e}{\mu^* N l}; \quad \mu^* = 1. \quad (12)$$

Коэффициент трения – обобщенный параметр сопротивления относительно перемещению (движению) поверхностей, ибо он отражает долю энергии, которая «уничтожается» трением в виде

запасенной потенциальной энергии ΔU_e , по отношению к параметру μ^*Nl – работе внешних сил (энергии внешнего относительного движения). Нагрузка N воспринимается как квазимасса трения, совершающая на пути l работу.

Результаты и обсуждение

Наиболее показательно закономерности эволюции контакта трения отражены структурно-энергетической диаграммой эволюции трущихся поверхностей (рис. 3). Эта диаграмма построена на основе совместного рассмотрения уравнений энергетического баланса трения и обобщенных экспериментальных кривых трения типа кривых П. Конти, И.В. Крагельского и др. [3-6]

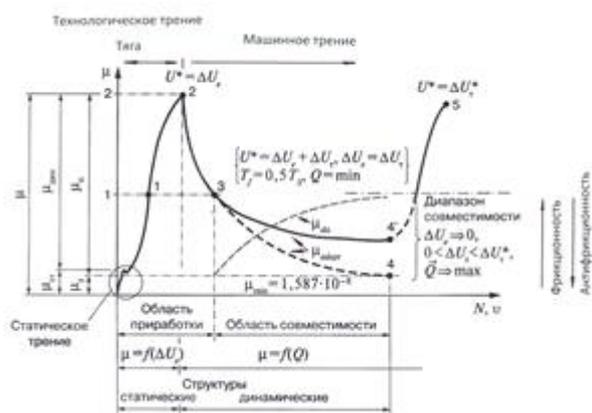


Рис. 3. Структурно-энергетическая диаграмма эволюции трущихся поверхностей (контакта трения) [2]. Обозначение на осях: N, v – нагрузка и скорость; $\mu_{ст}, \mu_{дин}, \mu_{упр}, \mu_{пл}$ – статический, динамический, упругий, пластический коэффициенты трения; T_f, T_S – температура вспышки в контактном объеме трения в точке 3 и температура плавления

Возрастающий участок коэффициента трения – это первый этап адаптации контакта трения. Он связан с преобладанием микропроцессов накопления внутренней потенциальной энергии $\Delta U_{e\Sigma}$ и уменьшением размера деформируемого объема (контакта) V_f . В точке 2 достигается наименьший объем трения V_f^* , накопивший предельную плотность энергии Δu_e^* . Образуется элементарная трибосистема – самостоятельный динамический трансформатор энергии.

Ниспадающий участок коэффициента трения – это второй этап адаптации. На этом этапе преобладают микропроцессы высвобождения и динамического рассеяния \vec{Q}_Σ накопленной энергии. Здесь элементарная трибосистема эволюционирует только структурно при неизменном ее размере – шарнире внутреннего трения (деформируемого объема).

Наиболее характерным свойством эволюции трения является свойство самоорганизации [7] в области точек 1-2-3, которое тесно связано со свойством синергии – совместности действий равновесных состояний деформируемого объема.

При идеальной эволюции контакта трения существует упругая симметрия (рис. 3) между начальным и конечным (наноструктурным) состояниями трибосистемы (контакта трения).

Взаимное ротационно-колебательное движение механических (нано) квантов [7] относительно друг друга внутри элементарной трибосистемы при идеальной эволюции определяет состояние наиболее совершенной диссипативной структуры трения. Собственно, такое состояние описывается уравнением состояния квазиидеального твердого тела [7], состояния, когда взаимодействие между элементами структуры (механическими квантами) минимизировано – состояние идеальной упругости квазивязкого течения. Это аналог идеального термодинамического цикла Карно.

Механические кванты как трибосистемы в их упругом взаимодействии реализуют наивысшую совместимость трибоматериалов и соответственно максимум долговечности элементарной трибосистемы.

Заключение

При эволюции контакта трения исходная макросинергия двух противоположных, балансовых тенденций процесса трансформации энергии при трении преобразуется в уникальную наноструктурную синергию подсистемных состояний аттрактивного свойства деформируемого контакта трения.

[1] Фёдоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твёрдых тел. – Ташкент: ФАН, 1979. – 168с.
 [2] Fedorov S.V. The Mystery and clarity of Leonardo da Vinci's coefficient of friction //Journal of Materials. – 2023. – Т. 1. – №. 1. – С. 8-20.
 [3] Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчётов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
 [4] Bowden F.P. and Tabor D. The Friction and Lubrication of Solids. – Oxford: Oxford University Press, 2001.
 [5] Fleischer G. Die Tross' schen Erkenntnisse aus heutigen Sicht //1st Arnold Tross Kolloquium. Germany: Hamburg. – 2005. – С. 215-242.
 [6] Bassani R. Tribology. – Pisa: Pisa university press, 2013.
 [7] Федоров С.В. О структурной сверхпластичности третьего тела по модели механического (нано) кванта // Трение и износ. – 2024. – Т. 45. – № 2. – С. 160-170.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ТЕКСТУРЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА СЦЕПЛЕНИЕ И НАЧАЛО СКОЛЬЖЕНИЯ УПРУГИХ ТЕЛ

Цуканов И.Ю.*, Любичева А.Н.

* ivan.yu.tsukanov@gmail.com

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

В работе представлено моделирование трения покоя для текстурированной поверхности в виде синусоидальной волнистости в паре с упругим телом на основе механики контактного взаимодействия. При моделировании использовались две модели материала упругого тела – упругое основание Ишлинского и упругая полуплоскость (модель сплошной среды). Показано существенное влияние высоты выступов текстуры и их взаимного влияния на процесс перехода от трения покоя к трению скольжения.

Ключевые слова: трение покоя, трение скольжения, упругое тело, текстура, контактная задача.

Введение

Известно, что при постоянной нормальной силе коэффициент трения покоя, фиксируемый как отношение максимальной сдвигающей силы к вертикальной нагрузке на контактирующие тела отличается от коэффициента трения скольжения, фиксируемого после начала относительного движения тел, на некоторую величину. При этом, для многих трибологических материалов характерен скачкообразный переход от трения покоя к трению скольжения, особенно при сухом трении (рис. 1).



Рис. 1. Зависимость силы сухого трения от времени при стравивании

Скачкообразное изменение силы (коэффициента трения) в некоторых случаях может приводить к вибрациям в сопряжении и динамической неустойчивости процесса трения, что, в конечном счете, сказывается на надежности работы пары трения. Во многих практических

INFLUENCE OF SURFACE TEXTURE GEOMETRY ON THE ADHERENCE AND SLIDING INITIATIVE OF ELASTIC BODIES

Tsukanov I.Yu., Lyubicheva A.N.

The paper presents the modeling of static friction for a textured surface in the form of sinusoidal waviness in a pair with an elastic body based on the mechanics of contact interaction. In the modeling, two models of the elastic body material were used - the Ishlinsky elastic base and the elastic half-plane (an elastic solid model). The significant influence of the height of the texture asperities and their mutual influence on the process of transition from static friction to sliding friction is shown.

Keywords: static friction, sliding friction, elastic body, texture, contact problem.

приложениях, в том числе связанных с передвижением человека или грузов для управления сцепными свойствами в паре используются нанесение текстуры на одну или обе контактирующие поверхности. Часто в качестве пары трения используется сочетание более жесткого тела с низко модульным упругим (вязкоупругим) материалом. Управление геометрическими параметрами такой текстуры, нанесенной, как правило, на более жесткую поверхность представляет собой актуальную техническую задачу, направленную на снижение негативных процессов, сопровождающих переход от трения покоя к трению скольжению. Сформировать теоретические основы для реализации такой задачи можно на основе механики фрикционного взаимодействия.

Постановка контактной задачи

В качестве примера рассмотрим один из типичных вариантов геометрической текстуры поверхности в виде синусоидальной волнистости вида:

$$f(x) = A \sin^2(\pi x / L), \quad (1)$$

где A – высота профиля; L – период; $A < L$.

Схема контактной задачи показана на рис. 2.

К каждому выступу текстуры, определенному на одном периоде, приложена постоянная вертикальная нагрузка P . Затем выступам текстуры

сообщается некоторое горизонтальное смещение $\delta_x = Vt$, где V – скорость перемещения, t – время. Указанный кинематический способ задания граничного условия соответствует физической картине процесса начала скольжения. В результате предварительного смещения контактирующих тел возрастает касательная нагрузка Q , являющаяся искомым параметром.

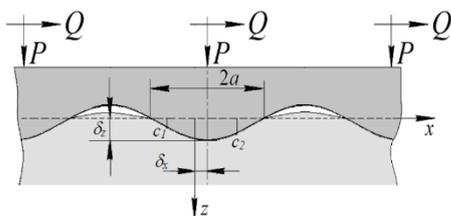


Рис. 2. Схема контактной задачи при предварительном смещении текстурированной поверхности

Указанная задача является задачей контактного взаимодействия при частичном проскальзывании [1]. В центре зоны контакта $a_1 < x < a_2$ находится область сцепления $c_1 < x < c_2$, по краям которой расположены зоны проскальзывания. В первом приближении предполагается, что действие сил трения в зоне проскальзывания подчиняется закону Амонтона, хотя экспериментальные исследования [2, 3] показывают существенные его нарушения при переходном процессе от сцепления к проскальзыванию.

Необходимо отметить, что особенностью задачи является то, что в отличие от микрогеометрии поверхностей (например, волнистости) высота профиля несущественно меньше расстояния между выступами. Таким образом, силы трения будут направлены по касательной к профилю (рис. 3).

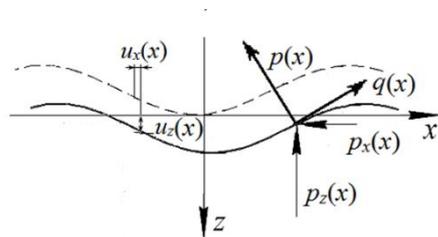


Рис. 3. Силовая схема при предварительном смещении текстурированной поверхности

Наиболее простой моделью материала для изучения предварительного смещения является упругое основание Ишлинского, которое состоит из независимых упругих стержней (пружин), которые могут не только деформироваться в вертикальном направлении, но и отклоняться от вертикального положения. Горизонтальные u_x и вертикальные u_z

перемещения основания связаны с горизонтальными p_x и вертикальными p_z усилиями соотношениями:

$$p_x(x) = k_x u_x(x), \quad p_z(x) = k_z (f(\pm a) - f(x)), \quad (2)$$

где k_z и k_x – жесткости пружин в горизонтальном и вертикальном направлении, соответственно. Уравнения равновесия в такой постановке записываются для проекций реакций упругой среды на горизонтальную и вертикальную оси, т.е.

$$x < 0:$$

$$p(x) = -p_x(x) \sin(\varphi(x)) + p_z(x) \cos(\varphi(x)); \quad (3)$$

$$q(x) = p_x(x) \cos(\varphi(x)) + p_z(x) \sin(\varphi(x)),$$

$$x > 0:$$

$$p(x) = p_x(x) \sin(\varphi(x)) + p_z(x) \cos(\varphi(x)); \quad (4)$$

$$q(x) = p_x(x) \cos(\varphi(x)) - p_z(x) \sin(\varphi(x)).$$

Задача для упругого основания подробно рассмотрена в [4]. Особенностью такой постановки является пренебрежение взаимным влиянием элементов текстуры, что не всегда является допустимым, особенно для моделирования переходного процесса.

Наряду с задачей для упругого основания была рассмотрена задача для упругой полуплоскости, то есть для модели сплошной среды при допущении малых деформаций, несжимаемого материала полуплоскости. В предположении, что в зоне проскальзывания горизонтальные касательные смещения быстро убывают, было принято допущение, что на нормальные смещения влияют только постоянные касательные смещения в зоне сцепления.

Условие контакта запишется следующим образом:

$$\sqrt{u_z(x)^2 + u_x(x)^2} = \delta_z - f(x - \delta_x), \quad (5)$$

где δ_z и δ_x – вертикальное и горизонтальное смещение тел.

В зонах проскальзывания действует закон трения Амонтона:

$$q(x) = -\mu p(x); \quad c \leq |x| \leq a; \\ a = \frac{-a_1 + a_2}{2}; \quad c = \frac{-c_1 + c_2}{2}, \quad (6)$$

где μ – коэффициент трения.

Вместо линейных коэффициентов (жесткостей) в (2) в постановке для упругой полуплоскости используются следующие интегральные операторы

$$u_z(x) = \frac{2(1-\nu^2)}{EL} \int_{-a_1}^{a_2} p_z(\xi) \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi(x-\xi)}{L} \right) d\xi; \quad (7)$$

$$u_x(x) = \frac{2(1-\nu^2)}{EL} \int_{-a_1}^{a_2} q_x(\xi) \operatorname{ctg} \left(\frac{\pi(x-\xi)}{L} \right) d\xi, \quad (8)$$

E , ν – модуль Юнга и коэффициент Пуассона материала упругой полуплоскости ($\nu = 0,5$ для несжимаемого материала).

Поставленная задача решалась в предположении применимости теории Каттанео-Миндлина [1] для определения горизонтальных усилий. При этом из уравнений (3) и (4) следует, что в области проскальзывания коэффициент пропорциональности между горизонтальными и вертикальными усилиями отличается от μ и равен

$$\mu^* = \frac{\mu + (A/2)\sin(\varphi(x))}{1 - \mu(A/2)\sin(\varphi(x))}, \quad (9)$$

где $\sin(\varphi(x)) = f'(x)$; $\cos(\varphi(x)) = 1$ при $f'(x) < 1$.

Полученное численно-аналитическое решение задачи позволило определить влияние геометрических параметров текстуры на контактные характеристики.

Результаты и обсуждение

На рис. 4 и 5 показаны графики зависимостей отношения полной горизонтальной силы к вертикальной, определяемых по формулам (10), от относительного размера зоны сцепления c/a для моделей упругого основания и упругой полуплоскости при фиксированном размере области контакта.

$$P = \int_{-a_1}^{a_2} p_z(x)dx; \quad Q = \int_{-a_1}^{a_2} p_x(x)dx \quad (10)$$

При небольшой области контакта обе модели материала показывают схожие результаты. Область проскальзывания a - c увеличивается плавно с ростом горизонтального смещения (силы Q), особенно при больших Q . Это связано с тем, что при малых нагрузках взаимное влияние выступов текстуры на контактные характеристики так же мало, и они определяются в большей степени геометрией выступов/впадин текстуры.

С увеличением нормальной силы, и, соответственно, размера области контакта a для случая упругой полуплоскости график существенно меняется и при определенном значении касательной силы, меньшей чем μP происходит скачкообразное изменение размера зоны сцепления, связанное с изменением конфигурации контакта, и нарушением граничных условий, что является косвенным свидетельством переходного процесса в паре.

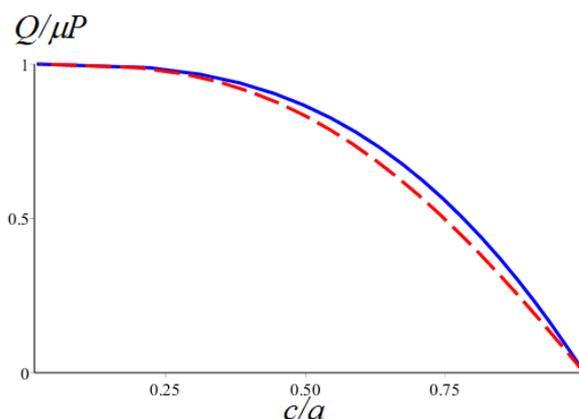


Рис. 4. Зависимость касательной силы от размера зоны сцепления для модели упругого основания: $L = 2\pi$, $A = 0,03$, при $a = 1,9$ (сплошная линия) и $a = 1$ (штриховая линия)

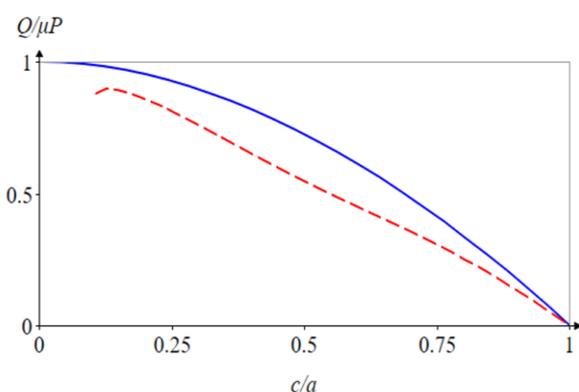


Рис. 5. Зависимость касательной силы от размера зоны сцепления для модели упругой полуплоскости: $L = 2\pi$, $A = 0,03$, при $a = 1,9$ (сплошная линия) и $a = 1$ (штриховая линия)

Заключение

Разработанные модели фрикционного взаимодействия позволяют проводить оценку геометрических параметров текстуры на процесс перехода от трения покоя к трению скольжения.

Благодарности

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации 124012500437-9).

- [1] Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 510 с.
- [2] Svetlizky I., Fineberg J. Classical shear cracks drive the onset of dry frictional motion // Nature. – 2014 – Т. 509. – С. 205-208.
- [3] Weber B., Suhina T., Brouwer A.M., Bonn D. Frictional weakening of slip interfaces // Science Advances – 2019 – Т. 5. – № 4. – С. eaav7603.
- [4] Lyubicheva A.N., Tsukanov I.Y. The influence of 2D periodic surface texture on the partial slip problem for elastic bodies// European Journal of Mechanics - A/Solids – 2022 – Т. 91. – 104405.

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТВЕРДОСПЛАВНОГО РЕЗЦА ДОРОЖНОЙ ФРЕЗЫ ПОСРЕДСТВОМ УМЕНЬШЕНИЯ ЧИСЛА ПОР В РЕЗЦЕ

¹Шалыгин М.Г., ²Рамазанов Г.Х.*

* tts-dm@yandex.ru

¹ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет», Брянск, Россия;

²ООО «Спектр Брянск строй», Брянск, Россия.

Рассмотрен износ резца дорожной фрезы. Проведены исследования кристаллитов в дорожном резце из твердосплавного материала. Определена пористость материала резца. Установлено, что резец, обработанный лазером имеет меньшую пористость. Установлено, что на износ образца влияет число пор в твердосплавном материале.

Ключевые слова: твердый сплав, дорожная фреза, износ, пористость.

Введение

Барабан дорожной фрезы с резцами относится к быстроходным рабочим органам, имеющим повышенные скорости обработки асфальтобетона. Принимая во внимание, что при увеличении как линейной скорости относительного перемещения, так и угловой скорости вращения фрезы, возрастают затраты, связанные с потерей мощности, повышается износ рабочих инструментов. Высокая твердость (12-16 ГПа) и прочность (10-30 МПа) частиц гранита, входящих в состав асфальтобетона, вызывает интенсивное разрушение корпуса резца под действием сложного механизма изнашивания частицами закрепленного и незакрепленного абразива, с наличием локальных ударных нагрузок и пластического оттеснения микрообъемов металла [1, 2].

Материалы и методы

Объектом исследования являлся материал твердосплавного резца дорожной фрезы. Было исследовано 2 образца. Образец 1 – твердосплавной резец дорожной фрезы до эксплуатации. Образец 2 – твердосплавной резец дорожной фрезы до эксплуатации, обработанный лазером (длина волны 50 нм; мощность 25 Вт; площадь пятна-0,05 мм; частота – 30 Гц) для уменьшения числа пор в твердосплавном резце с целью повышения его износостойкости.

Исследование фазового состава образцов и дифракционных максимумов для последующего

INCREASING THE WEAR RESISTANCE OF THE CARBIDE CUTTER OF THE ROAD MILLING CUTTER BY REDUCING THE NUMBER OF PORES IN THE CUTTER

Shalygin M.G., Ramazanov G.H.

The wear of the cutter of a road milling cutter is considered. Studies of crystallites in a road cutter made of carbide material have been carried out. The porosity of the cutter material is determined. It was found that the laser-treated cutter has a lower porosity. It was found that the number of pores in the carbide material affects the wear of the sample.

Keywords: hard alloy, road milling cutter, wear, porosity.

расчета микронапряжений и размера области когерентного рассеивания (ОКР) проводилось на рентгеновском дифрактометре общего назначения ДРОН-7. Определение содержания углерода в образцах проводили объемным баритовым методом. Данный метод определения содержания углерода в сплаве основан на сжигании навески образца в силитовой печи при температуре 1200-1350 °С. При этом образовавшийся углекислый газ поглощают раствором гидроксида бария, избыток которого титруют раствором щавелевой кислоты в присутствии индикатора – фенолфталеина. Для данного исследования были приготовлены растворы 0,1н щавелевой кислоты, титрованный раствор 0,13н Ва(ОН)₂ и спиртовой раствор фенолфталеина, а также подготовлено оборудование: силитовая печь, кварцевая трубка, 2 поглотительные склянки, силиконовый шланг для соединения оборудования и герметичности, кислородный баллон, пипетка Мора на 20 мл и бюретка для титрования.

Опыт проводили следующим образом: собрав установку, разогрели печь до температуры 1300 °С и начали пропускание тока кислорода через всю систему в течение 5 минут для того, чтобы вытеснить воздух, который заполняет установку. Далее, не прекращая пропускать кислород через систему, поочередно в поглотительные склянки добавили по 20 мл 0,13н Ва(ОН)₂. Отключив ток кислорода, в самое горячее место кварцевой трубки

поместили предварительно взвешенную навеску образца около 0,2 г, затем заново включили его подачу. После того, как сжигание образца закончилось, слили из поглотительных склянок растворы щелочи, взяли аликвоту в размере 10 мл и титровали 0,1н раствором щавелевой кислоты в присутствии фенолфталеина до исчезновения окраски индикатора.

Для проверки достоверности методики эксперимент провели с графитом, зная, что содержание углерода в нём 100-процентное.

Исследование фазового состава образцов. Полученные рентгенограммы обрабатывались в программе «Match!». На полученных рентгенограммах всех образцов последовательно проведено:

- отделение фона;
- сглаживание при помощи Фурье преобразований;
- профильный анализ (определение положений и максимальных интенсивностей).

В автоматическом режиме производился поиск совпадений рентгенограмм с рентгенограммами эталонов из баз данных PDF-2 от Международного центра дифракционных данных (ICDD) содержащей более 117000 записей для быстрой и точной идентификации фаз и базы COD-Inorg более 78000 записей.

Анализ рентгенограмм позволяет сказать, что образцы №1, №2, эталонный порошок WC однофазные с кристаллической структурой соответствующей карбиду вольфрама WC. Значение Критерия совпадения (Figure of Merit, FOM), показывающий качество совпадения экспериментальной и стандартной дифрактограмм составляет для Образец №1 FOM = 0,8126, Образец №2 FOM = 0,8050, эталонный порошок WC FOM = 0,8918. У образцов №1 и №2 наблюдается наличие уширения пиков относительно образца WC (инструментальное уширение). Следует отметить, что в образце №1 изменились соотношения интенсивностей и наблюдаются систематический сдвиг пиков в область дальних углов. Связанный очевидно с присутствием в кристаллической решетке примесей атомов кобальта (связующий материал, используемый для изготовления твердосплавных изделий).

Для исследования уширения были исследованы два рефлекса на углах 2θ в Рефлекс I в районе 53° и Рефлекс II в районе 124° у образцов №1, №2, эталонный порошок WC. Программа «Предварительная обработка» предназначена для определения набора характеристик каждого

отражения дифрактограммы, полученной при съемке на рентгеновских дифрактометрах ДРОН-7, ДРОН-6, ДРОН-4, STOE, HUBER.

Обработка дифрактограмм проводилась в два этапа. На первом этапе методом первой и второй сглаженных производных определяются фон и положение дифракционных максимумов. Фон аппроксимируется полиномом первой степени. Точки фона и характеристики максимумов пиков определяются по первой квадратичной и второй кубической сглаженным производным.

Производные и их стандартные отклонения рассчитываются для всех точек интервала. Для расчета стандартных отклонений используется закон распределения вероятности Пуассона. Сглаживание – это процесс усреднения. Координаты максимумов пиков уточняются

Испытания на износ проводили на спроектированной установке имитирующей работу барабана дорожной фрезы (рис. 1). Асфальтобетонную смесь изготавливали в соответствии с ГОСТ Р 58406.2-20 (рис.2) [3].



Рис. 1. Установка для испытаний на износ



Рис. 2. Установка для испытаний на износ

Результаты и обсуждение

Полученные параметры рефлексов являются входными данными для расчета микронапряжений и ОКР. В данной работе процедура расчета размеров блоков и микродеформаций осуществляется по методу вторых моментов по алгоритму, описанному в статье Н.П. Дымченко и др., реализованная в программе из пакета PDWin «Расчёт ОКР и микронапряжений». По данным рассчитывались вторые моменты для профилей, которые линейно сглаживались. Результаты расчета микронапряжений и размера областей когерентного рассеяния приведены в табл. 1.

Исследование поверхности образца №1. Участок образца №1 имеет рельеф с перепадом в 40 нм. При построении сечения поверхности на данном участке установлен размер зерен порядка 17-22 нм. Произведен анализ шероховатости. Средняя шероховатость R_a определена как 2,062 нм. Полосы высокой проводимости связаны с возвышениями на рельефе и близким контактом с кантилевером в момент прохождения по участку образца №1 (рис. 2).

Исследование поверхности образца №2. После обработки лазером образец имеет шероховатую поверхность с размером кристаллитов на поверхности около 4 нм. Средняя шероховатость R_a определена 0,4391 нм. Установлено, что участок образца, обработанного лазером имеет зерна около 10 нм (рис. 3).

При сопоставлении рисунков 3 и 4 хорошо видны участки с низкой проводимостью, которые являются более темными. При этом на рис. 3 отчетливо видны кристаллиты, которых не видно на рис. 4. Различие участков по проводимости обусловлено различной проводимостью различных карбидов и связующего элемента. Совсем черные участки обладают нулевой проводимостью и вероятнее всего являются порами между кристаллитами, полученными при спекании твердого сплава. Так, на образце, обработанном лазером число черных участков значительно меньше. Таким образом лазерная обработка твердого сплава позволяет уменьшить число пор, однако, для определения физико-химической природы данного явления требуются дополнительные исследования. Испытания на износ позволили установить большую износостойкость образцов, обработанных лазером. Масса образца 1 после испытаний составила 303,4 г, масса образца 2 – 312,4 г за путь трения, равный выборке толщины слоя асфальта в 150 мм.

Табл. 1. Результаты расчёта микронапряжений и размера областей когерентного рассеяния

Параметр	Образец №1	Образец №3, обработанный лазером
Размер кристаллитов, Å	275,95	136,36
Микродеформации, $\langle \epsilon^2 \rangle$	-1,10966E-06	2,428038E-06

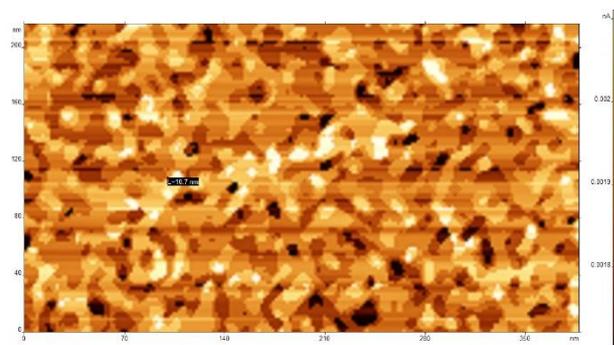


Рис. 2. Исследование проводимости участка образца №1

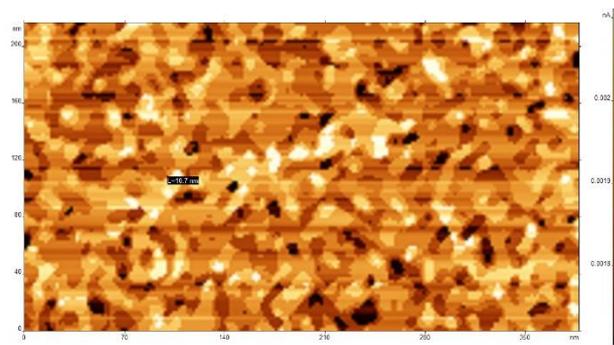


Рис. 3 Исследование проводимости участка образца №2, обработанного лазером

Заключение

При исследовании структуры материала твердосплавного резца дорожной фрезы выполнено определение дефектности и напряжений кристаллической решетки, стехиометрических соотношений основных элементов (W, Ni, Co), поверхностной проводимости, проведена обработка поверхности исследуемого материала лазером и выполнено сравнительное определение указанных характеристик.

[1] Рамазанов Г.Х. Износ инструмента дорожной фрезы и модели эффективности резания // Научные технологии в машиностроении. 2023. – №1. – С. 42-48.

[2] Рамазанов Г.Х. Проблема износостойкости резца дорожной фрезы // Строительные и дорожные машины. – 2023. – №3. – С. 24-26.

[3] Попов С.Н., Антонюк Д.А. Методика производственных испытаний материалов резца дорожной фрезы в условиях изнашивания закрепленным абразивом //Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2007. – №. 2. – С. 155-162.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ ПОЛИУРЕТАНА С КАРБОНИЗИРОВАННЫМ НАНОСЛОЕМ

Шкалей И.В.*, Торская Е.В.

* ioann_shiva@list.ru

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

Проведено экспериментальное исследование фрикционных характеристик полиуретанов, отличных по свойствам, с карбонизированным нанослоем, получаемым ионно-плазменной обработкой поверхности (с различными параметрами), в паре с шариком в режиме однонаправленного скольжения при постоянных нагрузке и скорости. Рассчитаны уравнения регрессии и построена зависимость коэффициента трения от нагрузки и скорости скольжения. Проведен анализ влияния флюенса (количество ионов на единицу поверхности за время обработки) на шероховатость поверхности, адгезионную и деформационную силы трения. Показано, что результат обработки с относительно малым флюенсом зависит от жесткости материала: для более жесткого полиуретана коэффициент трения снижается в сочетании с незначительным изменением шероховатости, а для менее жесткого получен стабильно высокий коэффициент трения и повышенная шероховатость.

Ключевые слова: полиуретан, поверхностная обработка, нанослой, трение скольжения, адгезионная сила трения, деформационная сила трения.

Введение

Полиуретаны (ПУ), являясь полимерами и обладая реологическими свойствами, относятся к синтетическим эластомерам и работоспособны в условиях больших нагрузок, а также отрицательных и повышенных температур. Применение полиуретановых материалов в различных приложениях обусловлено присущим им широким диапазоном различных характеристик, в частности, механических и трибологических. В данной работе образцы полиуретанов изготовлены по распространенной литьевой технологии, которая используется для изготовления изделий сложной формы и покрытий на жестком основании [1]. Ионно-плазменная обработка поверхности приводит к образованию карбонизированного нанослоя, который в свою очередь изменяет интегральные характеристики полиуретана: шероховатость [2] и механические и реологические свойства [3].

FRICITION OF POLYURETHANE WITH CARBONIZED NANOLAYER

Shkalei I.V., Torskaya E.V.

Friction characteristics of different polyurethanes with carbonized nanolayer obtained by ion-plasma surface treatment were studied in contact with ceramic ball in unidirectional sliding mode at constant load and speed. Regression equations were calculated; the dependence of friction coefficient on load and sliding velocity was obtained. The effect of fluence (the number of ions per unit surface during the treatment) on surface roughness, adhesive and deformation components of friction force was analyzed. It was concluded that the result of treatment with relatively small fluence depends on rigidity of the material: for more rigid polyurethane, the friction coefficient decreases (in combination with an insignificant change in roughness), and for a less rigid one, a consistently high friction coefficient along with an increase in roughness.

Keywords: polyurethane, surface treatment, nanolayer, sliding, adhesive friction, deformation friction.

В данной работе полиуретан представляет интерес, как материал с высоким коэффициентом трения. Это важно для некоторых приложений, к примеру, для подошвы спец. обуви [4], где предъявляются высокие требования по сцепным свойствам.

Целью работы является анализ влияния поверхностной обработки, приводящей к образованию карбонизированного нанослоя, на коэффициент трения скольжения двух полиуретановых материалов, отличающихся механическими и реологическими свойствами.

Материалы и методы

Объект исследования – образцы полиуретана двух композиций ПУ1 и ПУ2, рецептуры которых отличаются по пропорциям отвердителя (МОКА и Полифурит ПТМЭГ1000Т) к форполимеру (уретановый ЭП СКУ ПТ-74). Полиуретаны изготовлены по литьевой технологии, поверхность которых обрабатывали ионами азота с энергией

20 кэВ при различном времени обработки, соответствующем флюенсу 10^{15} (номер образцов с индексом 1) и 10^{16} (номер образцов с индексом 2) ионов/см² [1, 2]. Для сравнения были использованы образцы без поверхностной обработки (номер образцов с индексом 0).

Модуль упругости определялся на основе экспериментальных данных, полученным методом инструментального индентирования на сканирующем нанотвердомере «НаноСкан-4D» (ТИСНУМ, Россия). В качестве индентора использовался керамический шарик диаметром 2,1 мм, который вдавливался в образцы с разной линейной скоростью: 1000 мН/с и 4 мН/с. При этом для разных типов материалов варьировалась нагрузка и время теста (выдержка 2 с под нагрузкой не изменялась). Для материала ПУ1₀ нагружение до 1000 мН осуществлялась за 1 с, а для материала ПУ2₀ – до 200 мН за 0,2 с; в другом случае – до 1000 мН за 250 с и до 200 мН за 50 с, соответственно. Для каждой скорости/материала было выполнено по 3 повтора.

Трибологические испытания проводились на машине трения УМТ-3 (Cetr, США) в режиме однонаправленного трения при скольжении жесткого керамического шарика диаметром 1,5 мм по поверхности исследуемых материалов при постоянных нагрузке и скорости. Эксперименты выполнены в соответствии с методикой двухфакторного планированного эксперимента [5]. Зависимость коэффициента трения получена на основе серий тестов, в которых пределы изменения нагрузки (от 5 до 100 г) и скорости скольжения (от 0,1 до 1 мм/с) задавали на трех уровнях: минимальном, среднем и максимальном. Для каждой выбранной комбинации параметров эксперимент повторялся трижды.

Для оценки наногеографии поверхности использовался бесконтактный оптический 3D профилометр S neox (Sensofar-Tech, Испания) в конфокальном режиме с объективами 20X и 150X.

Результаты и обсуждение

Кривые индентирования были использованы для расчета длительного и мгновенного приведенного модуля упругости на основе соотношения [6]:

$$d^{3/2} = \frac{3P}{4\sqrt{RE^*}}, \quad E^* = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (1)$$

Расчетные мгновенный и длительный приведенные модули упругости E^* для материала ПУ1₀ составили 52,5 МПа и 45,9 МПа, для материала ПУ2₀: 8,8 МПа и 6,1 МПа,

соответственно. Таким образом, первый материал является практически упругим, а второй – вязкоупругим и существенно более податливым.

В табл. 1 представлены параметры шероховатости поверхности всех исследуемых материалов до и после трибологических испытаний.

Табл. 1. Параметры шероховатости поверхности до и после испытаний

Образец	Параметр шероховатости S_a , нм	
	исходной поверхности	после трения
ПУ1 ₀	2,7	4,4
ПУ1 ₁	2,5	6,2
ПУ1 ₂	9,0	21,3
ПУ2 ₀	4,4	18,9
ПУ2 ₁	12,7	38,5
ПУ2 ₂	22,1	68,0

На рис. 1 представлены зависимости коэффициента трения от нагрузки при фиксированной скорости для материалов первой (ПУ1_x) и второй (ПУ2_x) группы. Материалы, для которых зависимость от скорости отсутствует, представлены одной линией, в противном случае скорость зафиксирована при трех значениях.

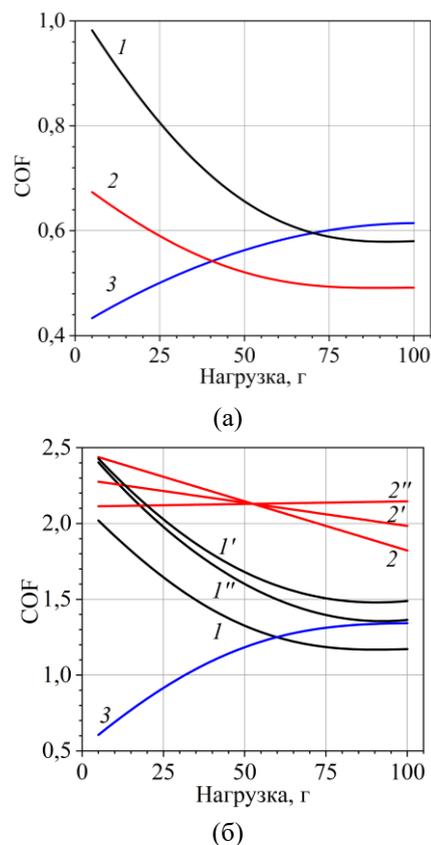


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения (COF) от нагрузки при фиксированной скорости для образцов ПУ1_x (а) и ПУ2_x (б): 0,1 мм/с (1, 2), 0,55 мм/с (1', 2') и 1 мм/с (1'', 2''); без поверхностной обработки (1, 1', 1''), флюенс 10^{15} (2, 2', 2'') и флюенс 10^{16} (3)

Данные по вязкоупругим свойствам материалов в сочетании с информацией о геометрии поверхности и режиме поверхностной обработки дают достаточную информацию для анализа и объяснения результатов, представленных на рис. 1.

Материал ПУ₁₀ является практически упругим, поэтому деформационная составляющая силы трения может не учитываться. Образцы первой группы независимо от поверхностной обработки демонстрируют независимость коэффициента трения от скорости. Полиуретан обладает значительной поверхностной энергией, соответственно, адгезия является основной причиной возникновения фрикционных сил. Для ПУ₁₀ и ПУ₁₁ контакт остается сплошным, поскольку шероховатость поверхности невелика, и сила трения не зависит от нагрузки. Соответственно, коэффициент трения будет обратно пропорционален нагрузке. Разница в абсолютных значениях коэффициента трения для этих образцов, вероятно, обусловлена изменением поверхностной энергии за счет карбонизированных нанослоев, частично экранирующих адгезию. В случае материала ПУ₁₂ увеличение шероховатости приводит к дискретности контакта, фактическая площадь контакта и оба компонента силы трения возрастают с увеличением нагрузки, в результате зависимость коэффициента трения от нагрузки становится возрастающей. В случае вязкоупругого материала ПУ₂₀ на силу трения существенно влияет ее деформационная составляющая, что проявляется в зависимости силы трения от скорости. Материал ПУ₂₀ соответствуют сочетанию адгезионной составляющей, убывающей с увеличением нагрузки, и деформационной составляющей, демонстрирующей немонотонную зависимость от скорости, силы трения. Наличие жесткого поверхностного слоя уменьшает деформационную составляющую силы трения, как для материала ПУ₂₂ (нет зависимости коэффициента трения от скорости), а эффект нагрузки аналогичен материалу ПУ₁₂. Для материала ПУ₂₁ можно предположить, что карбонизированный слой является несплошным и слабо влияет на адгезионные силы и не уменьшает деформационную составляющую силы трения. В результате, зависимость коэффициента трения от нагрузки при низкой скорости является характерной для сплошного контакта (т.е. уменьшение коэффициента трения при росте нагрузки), а при высокой скорости эта зависимость сглаживается за счет эффекта всплывания для вязкоупругого материала при высокой скорости скольжения, приводящего к дискретности контакта.

Заключение

В работе исследовано влияние ионно-плазменной обработки поверхности на изменение топографии и фрикционные свойства двух полиуретановых материалов. Результаты индентирования показали, что материалы различаются по жесткости и реологическим свойствам.

Показано, что силы трения, возникающие при скольжении по поверхности полиуретана керамического шарика, имеют адгезионную природу. Для полиуретана с выраженными вязкоупругими свойствами добавляется деформационная составляющая силы трения. Поверхностная обработка приводит к появлению относительно жестких карбонизированных нанослоев. В случае обработки с большим флюэсом уменьшается поверхностная энергия, которая отвечает за силы адгезии, и полностью нивелируется деформационная составляющая силы трения. Эффект обработки с относительно малым флюэсом зависит от свойств изучаемых материалов. Для более жесткого полиуретана шероховатость практически не изменяется и снижается коэффициент трения. Для менее жесткого – существенный рост шероховатости и стабильно высокий коэффициент трения (от 1,82 до 2,44).

Таким образом, поверхностная обработка является средством управления коэффициентом трения полиуретана и обеспечения его стабильно высоких фрикционных свойств.

Благодарности

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации 124012500437-9).

- [1] Kisilitsyn V.D. et al. Анализ механических свойств полиуретановых материалов, изготовленных по растворной и литьевой технологиям // Bulletin of Perm University. Physics. – 2020. – № 1. – С. 17-25.
- [2] Чудинов В.С. et al. Polyurethane modified by plasma ion implantation // NANOCON 2018 – Conference Proceedings. – Ostrava: TANGER Ltd., 2019. – С. 295-299.
- [3] Torskaya E.V. et al. Sliding contact of coated viscoelastic solids: model and experiment // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1474. – №. 1. – С. 012033.
- [4] Sato S. et al. Dry sliding friction and Wear behavior of thermoplastic polyurethane against abrasive paper // Biotribology. – 2020. – Т. 23. – С. 100130.
- [5] Bukovsky P.O., Morozov A.V., Kirichenko A.N. Influence of running-in on the friction coefficient of C/C composite materials for aircraft brakes // Journal of Friction and Wear. – 2020. – Т. 41. – № 4. – С. 326-332.
- [6] Contact Mechanics / Johnson K.L. – Cambridge University Press, 1985.

ИНЖЕНЕРНЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТРИБОЛОГИИ КОМПОЗИТОВ

Шпенев А.Г.

kel-a-kris@list.ru

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

В статье обозначены подходы к моделированию трения и изнашивания волокнистых композитов, пригодные к практическому применению для используемых в промышленности материалов. Показана целесообразность использования тех или иных моделей для разных классов материалов и условий эксплуатации. Обозначена связь между моделями изнашивания и моделями разрушения волокнистых композитов.

Ключевые слова: композиты, углеродное волокно, трение композитов, углеродные композиты.

Введение

Первые шаги в моделировании изнашивания неоднородных (гетерогенных) материалов были предприняты Хрущёвым и Бабичевым. Ими была предложена гипотеза равных линейных скоростей изнашивания для разных компонентов композита [1]. Позднее эта модель была усовершенствована Горячевой с соавторами [2,3] с учётом нелинейного характера зависимости скорости изнашивания от контактного давления и упругих деформаций поверхности. Феноменологический подход, учитывающий процессы разрушения структуры композитного материала при изнашивании, был предложен Зум-Гарром [4]. Шаги по направлению к моделированию механизмов разрушения композитных материалов при трении были позже предприняты, как для волокнистых композитов [5,6], так и для наполненных частицами материалов [7].

Моделирование композита с волокнами, перпендикулярными поверхности трения

С целью создания пригодной для практического применения модели изнашивания волокнистого материала, была поставлена задача об изнашивании представительного объёма волокнистого композита, содержащего одно волокно (рис. 1). Было получено решение в одномерной постановке (модель Винклера), данное решение аналогично балочному подходу описания механики волокнистого композита («shear-lag» теория [8]) и позволяет описать расслоение волокна и матрицы вблизи поверхности трения, а также неравномерный износ композита с образованием поверхностного рельефа [9].

ENGINEERING APPROACHES TO MODELING COMPOSITE TRIBOLOGY

Shpenev A.G.

The article outlines approaches to modeling friction and wear of fiber composites that are suitable for practical application for materials used in industry. The feasibility of using certain models for different classes of materials and operating conditions is shown. The relationship between wear models and fracture models of fiber composites is indicated.

Keywords: composites, carbon fiber, composite friction, carbon composites.

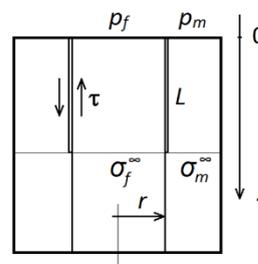


Рис. 1. Постановка краевой задачи для представительного объёма волокнистого композита

Был смоделирован циклический процесс, состоящий из отламывания выступающего над поверхностью матрицы кончика волокна с последующим его ростом, который присутствует при трении углерод-углеродных композитов [10] (рис. 2).

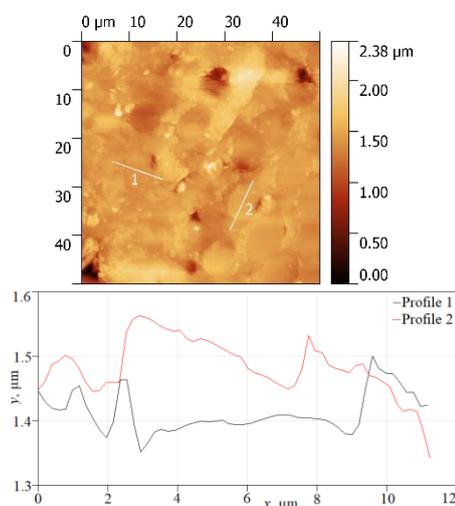


Рис. 2. Поверхность трения углеродного композита на основе карбонизированных волокон и газофазной матрицы в области волокон, перпендикулярной поверхности трения: СЗМ-изображение (сверху) и профиль (снизу)

Для моделирования влияния неоднородного температурного расширения волокна и матрицы была построена модель изнашивания представительного объёма, в трёхмерной постановке, учитывающая наличие радиальных напряжений и деформаций [11]. Была получена зависимость размера области расслоения волокна и матрицы от температуры для разных сочетаний коэффициентов температурного расширения (для углеродных волокон эти коэффициенты лежат в широком диапазоне значений и могут быть отрицательными для некоторых направлений кристаллической симметрии) (рис. 3).

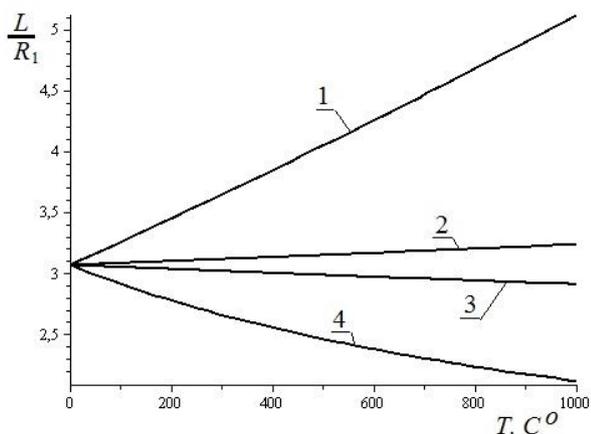


Рис. 3. Зависимость размера зоны проскальзывания между волокна волокном и матрицей от температуры для различных значений радиальных коэффициентов температурного расширения. 1 – $\alpha_{rt}-\alpha_{rm}=-10^{-6}$, $\alpha_{zt}-\alpha_{zm}=10^{-5}$; 2 – $\alpha_{rt}-\alpha_{rm}=-10^{-6}$, $\alpha_{zt}-\alpha_{zm}=-10^{-7}$; 3 – $\alpha_{rt}-\alpha_{rm}=10^{-6}$, $\alpha_{zt}-\alpha_{zm}=-10^{-8}$; 4 – $\alpha_{rt}-\alpha_{rm}=10^{-5}$, $\alpha_{zt}-\alpha_{zm}=10^{-7}$

Необходимые для этих моделей константы материалов могут быть получены с помощью стандартных механических испытаний (упругие константы компонентов композита) и индентирования (соотношение износостойкости компонент и условия на границе раздела волокно/матрица).

Моделирование композита с волокнами, параллельными поверхности трения

В случае волокон, залегающих параллельно поверхности трения важным параметром, влияющим на изнашивание материала, становится угол между направлением трения и направлением оси волокон. Существующие модели изнашивания часто не учитывают этот параметр [12], либо не учитывают механизм разрушения поверхности трения за счёт выкрашивания остатков волокна [13,14] рис. 4.

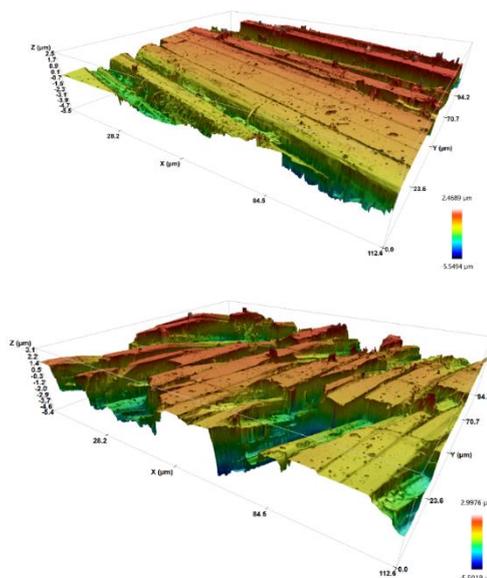


Рис. 4. 3D профилограммы типичных участков с волокнами, залегающими под малым углом к направлению скольжения (сверху) и с волокнами, залегающими под углом, близким к прямому к направлению скольжения (снизу)

Для описания этого процесса была построена модель изнашивания материала [15], рассматривающая процесс выкрашивания остатков волокна через призму усилия, действующего на край границы волокно/матрица (рис. 5).

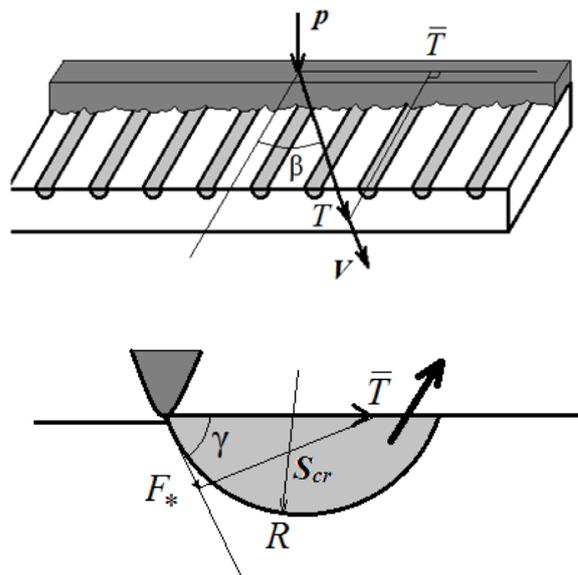


Рис. 5. Расположение волокон в композите по отношению к направлению скольжения контртела (сверху) и схема сил, действующих на единичное волокно (снизу)

На рис. 6 показана полученная зависимость скорости изнашивания композитного материала от среднего контактного давления и угла между направлением трения и направлением залегания волокон.

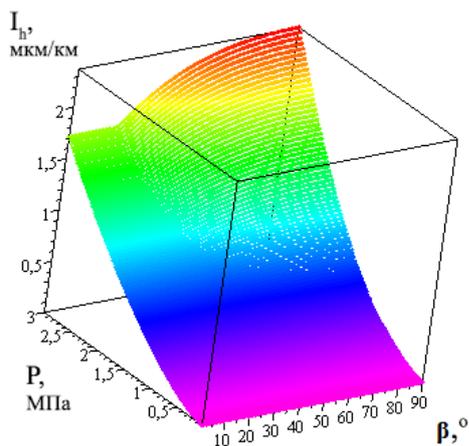


Рис. 6. Зависимость скорости изнашивания I_h от контактного давления P и угла β между направлением трения и направлением залегания волокон

Модель носит феноменологический характер, однако её параметры могут быть получены из трибологического эксперимента по схеме «кольцо-диск», при котором на одном и том же образце реализуются разные углы залегания волокон относительно направления трения.

Заключение

Развитые автором и обозначенные в данной работе подходы к моделированию трения и изнашивания волокнистых композитов сочетают относительную простоту с учётом механизмов разрушения поверхности трения, имеющих место при работе реальных материалов. Это позволяет им находить применение при разработке и создании композитов трибологического назначения на основе углеродного волокна и углеродной матрицы, используемых в машиностроении и авиастроении.

Благодарности

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации 124012500437-9).

[1] Абразивное изнашивание. / Хрущев М.М., Бабичев М.А. – М.: Наука, 1970. – 252 с.

[2] Горячева И.Г., Добычин М.Н. Изнашивание неоднородно упрочненных поверхностей // Трение и износ. – 1986. – Т. 7. – №6. – С. 985.

[3] Горячева И.Г., Торская И.В. Контактные задачи при наличии износа для тел с переменным по поверхности коэффициентом износостойкости // Трение и износ. – 1992. – Т. 13. – № 1 – С. 185-194.

[4] Zum-Gahr K.H. Abrasive wear of two-phase metallic materials with a coarse microstructure. // in: K.C. Ludema (Ed.), International Conference on Wear of Materials, American Society of Material Engineering, Vancouver. – 1985. – С. 793.

[5] Rodriguez-Temblequ. Friction and wear modelling in fiber-reinforced composites // Comput. Model Eng. Sci. – 2014. – Т. 102. – С. 183-210

[6] Yen B., Dharan C.K.H. A model for the abrasive wear of fiber-reinforced polymer composites // Wear. – 1996. – Т. 195. – С. 123-127.

[7] Gun Y. Lee, C.K.H. Dharan, R.O. Ritchie. A physically-based abrasive wear model for composite materials // Wear. – 2002. – Т. 252. – С. 322-331.

[8] Clyne T.W. A simple development of the shear lag theory appropriate for composites with a relatively small modulus mismatch // Materials Science and Engineering: A. – 1989 – Т. 122(2). – С. 183-192

[9] Shpenev A. Model of composite wear with abrasive particles //Advanced Materials: Proceedings of the International Conference on “Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications”, PHENMA 2017. – Springer International Publishing, 2018. – С. 459-468.

[10] Kasema H., Bonnamya S., Rousseau B. Friction of Carbon-Carbon composites: wear mechanisms as a function of the temperature in the contact // CARBON. – 2007 – Т. 2. – С. 1292-1298

[11] Shpenev A.G. Temperature effect on the process of wear of a fibrous composite under high load conditions // Materials Physics and Mechanics. – 2020. – Т. 44. – №. 2. – С. 229-237.

[12] Goryacheva I.G., Makhovskaya Yu.Yu. Modeling of fiber composite wear // Advanced Structured Materials. – 2021. – Т. 141. – С. 163-174.

[13] Cheng B, Kortschot M. An energy-based model for the wear of unidirectional carbon fiber reinforced epoxy // Journal of Composite Materials. – 2020. – Т. 54. – №. 28. – С. 4535-4544.

[14] Sharma M., Rao I.M., Bijwe J. Influence of fiber orientation on abrasive wear of unidirectionally reinforced carbon fiber-polyetherimide composites //Tribology International. – 2010. – Т. 43. – №. 5-6. – С. 959-964.

[15] Shpenev A.G., Bukovskiy P.O. Influence of the Fiber Bedding Direction on the Fiber Composite Wear //Journal of Friction and Wear. – 2023. – Т. 44. – №. 1. – С. 23-29.

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДОРАСТВОРИМОГО ТОПОКОМПОЗИТА ПРИ МОДИФИЦИРОВАНИИ ИМ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛИСТОВЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКИ

Шульга Г.И., Рудяшко Г.В., Скринников Е.В., Колесниченко А.О., Самойленко М.Н.

g.shulga41@mail.ru

Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия.

В современном машиностроении находят широкое применение технологии получения осесимметричных деталей из листовых сталей холодной глубокой вытяжкой. Для вытяжки осесимметричных деталей из коррозионностойких сталей разработан водорастворимый экологически безопасный топокомпозит ТК-2, состоящий из подсмазочного и смазочного покрытий. Разработана методика испытаний технологических покрытий на торцевой машине трения «по свежему следу». Проведены сравнительные триботехнические испытания водорастворимого подсмазочного покрытия ПВ-4 топокомпозита ТК-2 и применяемого в производственных условиях покрытия на основе цапонлака НЦ-62. Показаны преимущества триботехнических свойств топокомпозита ТК-2.

Ключевые слова: топокомпозит, коррозионностойкая сталь, глубокая вытяжка, подсмазочное покрытие, смазочное покрытие, триботехнические свойства, цапонлак.

Введение

В серийном и массовом производствах современного машиностроения повышение долговечности штампового инструмента при вытяжке осесимметричных изделий из листовых легированных сталей с высоким качеством поверхностей является актуальной научно-производственной проблемой [1-3]. Вытяжка осесимметричных изделий из листовых коррозионностойких сталей типа 12Х18Н10Т представляет сложную задачу, так как последние обладают повышенной склонностью к адгезионному взаимодействию со штамповым инструментом.

При формообразовании заготовки в осесимметричное изделие при использовании не достаточно эффективных технологических смазочных средств или покрытий на радиусе матрицы возможно возникновение адгезионного схватывания, развивающегося по дислокационно-вакансионному механизму. При формообразовании

TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF WATER-SOLUBLE TOPOCOMPOSITE IN DEEP DRAWING OF ALLOY STEEL SHEETS

Shulga G.I., Rudyashko G.V., Skrynnikov E.V., Kolesnichenko A.O., Samoylenko M.N.

In modern mechanical engineering, the technology of producing axisymmetric parts from sheet steels by cold deep drawing is widely used. For the extraction of axisymmetric parts made of corrosion-resistant steels, a water-soluble environmentally safe topocomposite TC-2 has been developed, consisting of a pre-lubricating and lubricating coated. A method of testing technological coatings on an end friction machine "on a fresh track" has been developed. Comparative tribotechnical tests of the CW-4 water-soluble pre-lubricating coating of the TC-2 topocomposite and the NC-62 capon varnish coating used in production conditions were carried out. The advantages of tribotechnical properties of TC-2 topocomposite are shown.

Keywords: topocomposite, corrosion-resistant steel, deep drawing, pre-lubricating, lubricating coatings, tribotechnical properties, capon varnish.

фланец заготовки подвергаются вначале действию сжимающих, а затем растягивающих напряжений, что способствует разрыхлению поверхностных оксидных плёнок заготовки на радиусе матрицы.

При многократных циклах проведения технологических процессах вытяжки, изделий из листовых сталей в результате усталостных процессов происходит разрушение поверхностных слоёв матрицы и пуансона, а образующиеся продукты износа могут наносить риски на штамповом инструменте и деформируемой заготовке.

Для глубокой вытяжки коррозионностойких сталей в качестве подсмазочных покрытий рекомендуют применять полимерные покрытия с использованием органически растворителей [1]. Пленкообразователем таких покрытий является нитроцеллюлоза – НЦ-62, НЦ-134, наполнителями пигменты, перхлорвиниловый лак ХВ 5179 (ХВЛ-21) с добавлением трикрезилфосфата, а летучим

растворителем – смесь ацетона, бутилацетона, толуола.

На поверхность листовых заготовок при высоких коэффициентах предельной деформации листовой коррозионностойкой стали из растворов электролитов наносят медные, цинковые покрытия, металлические покрытия из расплавов солей [4].

Такие технологические покрытия имеют существенные недостатки. Они не в полной мере обеспечивают долговечность штампового инструмента, качество поверхностей деформируемых заготовок. Для их нанесения и снятия требуются агрессивные, токсичные электролиты, органические растворители, оказывающие вредное воздействие на организм человека. Утилизация отработавших электролитов, расплавов солей затруднительна, вследствие чего происходит загрязнения окружающей среды.

Актуальной проблемой современного машиностроения является создание для узлов трения современных машин, механизмов, приборов нового класса конструкционных материалов топокомполитов [5-7], а также топокомполитов для технологических процессов вытяжки, глубокой вытяжки изделий из легированных листовых сталей [2,3]. Наносимые покрытия могут быть однослойными, двухслойными, многослойными, градиентными, композиционными, комбинированными.

Цели и задачи исследования

Целью работы является разработка технологического водорастворимого двухслойного экологически безопасного топокомполита для глубокой вытяжки листовых легированных сталей,

Задача исследования - разработка методики испытаний таких покрытий и исследование триботехнических свойств топокомполита .

Технологический водорастворимый топокомполит ТК-2 для глубокой вытяжки легированных и коррозионностойких листовых сталей, который представляет собой двухслойное покрытие – технологическое водорастворимое подмазочное покрытие ПВ-4 и технологическое водорастворимое смазочное покрытие ВСП-4. Приповерхностный слой данного подмазочного покрытия обеспечивает высокую адгезию к листовой заготовке, которое обеспечивает также нагрузочные свойства и относительное удлинение заготовки без разрыва покрытия, а смазочное покрытие оказывает смазочное действие топокомполита при вытяжке листовых легированных сталей.

Методика исследования

В лабораторных условиях для определения удельной силы (коэффициента) трения при

проведении сравнительных испытаний подмазочного и смазочного покрытий и их сочетаний использован на торцевой машине трения имитирующий метод скольжения "по свежему следу". При реализации данного метода цилиндрический индентор с контактирующей поверхностью в виде сферы скользит по плоскости диска и дополнительно перемещается по радиусу диска с нанесенным на его поверхность испытуемых покрытий. Начальный диаметр контакта d между сферой индентора радиуса R и плоскостью до начала скольжения контактирующих поверхностей определяли по методике, описанной в литературе [8].

Индентор диаметром 10 мм, длиной 15 мм, радиусом сферы 5 мм изготавливали из стали У8 с последующей термообработкой до твердости HRC 58-60. Контрольный образец – диск \varnothing 350 мм изготавливали из стали 40X7 с шероховатостью поверхности $Ra = 1,6-3,2$ мкм. Испытания проводили при изменении скорости диска от 0 до 2,5 м/с.

Частоту вращения диска устанавливали цифровым тахометром ЦАТ-3М. Силы трения, возникающие при скольжении индентора, измеряли методом тензометрирования. Сигнал с тензодатчиков поступал на тензоусилитель Т-5А и фиксировался светолучевым осциллографом, весовой износ индентора измеряли на лабораторных весах ВЛР-200. Начальная нагрузка на индентор составляла 200 Н. Для определения критического значения ее ступенчато повышали на 200 Н. Длина пути трения при испытании покрытий составляла 20 м.

Результаты и обсуждение

Разработанное водорастворимое технологическое подмазочное покрытие ПВ-4 лишено недостатков покрытия на основе цапон-лака НЦ-62. Дисперсию покрытия ПВ-4 наносили на заготовки из водного раствора. После выполнения технологических операций вытяжки, глубокой вытяжки покрытие ПВ-4 удаляли окунанием изделий в ванны с водой при температуре 80-90°C. Использование водных растворов подмазочного покрытия ПВ-4 при их нанесении и снятии позволяет избавиться от использования токсичных растворителей, оказывающих вредное воздействие на операторов, устранить пожаровзрывоопасность технологических процессов.

Результаты сравнительных испытаний подмазочных покрытий на основе цапонлака НЦ-62 и ПВ-4 приведены на рисунках 1 и 2, и в табл. 1.

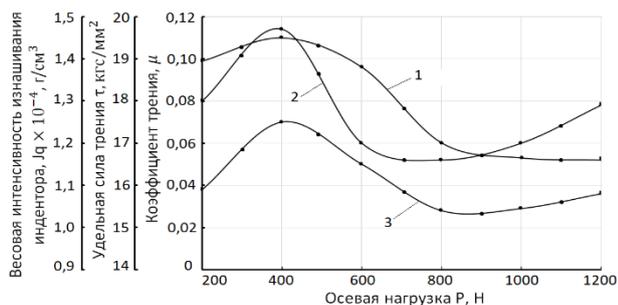


Рис. 1. Испытание покрытия на основе цапонлака НЦ-62 со скоростью вращения диска 0 – 2,5 м/с, зависимость от осевой нагрузки P: 1 – коэффициент трения μ ; 2 – удельной силы трения τ ; 3 – весовой интенсивности изнашивания индентора J_q

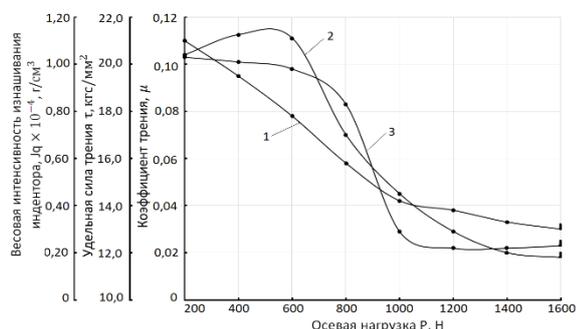


Рис. 2. Испытание подсмазочного покрытия ПВ-4 со скоростью вращения диска 0 – 2,5 м/с, зависимость от осевой нагрузки P: 1 – коэффициент трения μ ; 2 – удельной силы трения τ ; 3 – весовой интенсивности изнашивания индентора J_q

Табл.1. Результаты сравнительных испытаний подсмазочных покрытий НЦ-62 и ПВ-4

Параметры	Показатели	
	НЦ-62	ПВ-4
Критическая нагрузка заедания, Н	1200	1600
Осевая нагрузка, Н	800-1200	1000-1600
Коэффициент трения μ	0,06-0,07	0,04-0,03
Удельная сила трения τ , г/см ³	16,7-18,0	14,3-12,3
Весовая интенсивность изнашивания J_q , г/см ³	$(1,04-1,09) \cdot 10^{-4}$	$(0,35-0,38) \cdot 10^{-4}$

Анализ результатов сравнительных испытаний, приведенных на рис. 1, 2, табл. 1 показал, что покрытия на основе цапонлака НЦ-62 до критической нагрузки заедания $R_{K1} = 1200$ Н подсмазочное покрытие ПВ-4 до критической нагрузки заедания $R_{K2} = 1600$ Н защищали поверхность вращающегося диска от непосредственного контакта индентора. С увеличением нагрузки P, скорости диска V, коэффициенты трения μ , удельные силы трения τ пар трения индентор – диск с подсмазочным покрытием ПВ-4, индентор – диск с покрытием на основе цапон-лака НЦ-62 уменьшались.

При нанесении на деформируемую заготовку топокомпозита ТК-2 – подсмазочного полимерного покрытия ПВ-4 и смазочного покрытия ВСП-4, устраняется непосредственное контактирование штампового инструмента и деформируемого изделия, локализуются сдвиговые деформации в граничных смазочных слоях топокомпозита, содержащего фрактальные кластеры, антифрикционные добавки [1-3, 9]. В результате повышается долговечность штампового инструмента, улучшатся качество поверхностей осесимметричных изделий.

Заключение

Разработанный топокомпозит ТК-2 может быть использован при глубокой вытяжке листовых легированных сталей. Он наносится на поверхности окунанием листовых заготовок в водные дисперсии полимера и смазочного покрытия, повышает долговечность штампового инструмента, обеспечивает необходимое качество поверхности, не оказывает вредного воздействия на операторов. После проведения технологических операций вытяжки легко смывается водой или в водном щелочном растворе. Отрабатанные водные дисперсии покрытий могут использоваться в строительных растворах.

- [1] Грудев А.П., Зильберг Ю.В., Тилик В.Т. Трение и смазки при обработке давлением: справочник – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.
- [2] Шульга Г.И., Колесниченко А.О., Скринников Е.В. и др. Влияние водорастворимого технологического ретиваметаллизанта РВ-18 на величины напряжений при глубокой вытяжке листовых сталей //Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2021. – №. 1 (209). – С. 43-49.
- [3] Шульга Г.И., Черников Н.С., Колесниченко А.О. и др. Триботехнические свойства водорастворимого топокомпозита при глубокой вытяжке листовых легированных сталей //Фундаментальные основы механики. – 2024. – №13. – С.59-67.
- [4] Каржавин В.В. Металлические покрытия, наносимые в расплавах солей, их исследования в процессах обработки металлов давлением //Трение и износ. – 1992. – Т.13. – № 3. – С. 141-150.
- [5] Воронин Н.А. Топокомпозиты – новый класс конструкционных материалов триботехнического назначения. Ч. 1. //Трение и износ. – 1999. – Т. 20. – № 3. – С. 313-320.
- [6] Воронин Н.А. Топокомпозиты – новый класс конструкционных материалов триботехнического назначения. Ч. 2. // Трение и износ. – 1999. – Т. 20. – № 5. – С. 533-544.
- [7] Воронин Н.А. Актуальные проблемы создания топокомпозитов //Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2011. – Т.13 – №4(3). – С. 695-698.
- [8] Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости – М.: Машиностроение, 1979. – 191 с.
- [9] Белый В.А., Свириденко А.Н., Петроковец М.И., Савкин В.Г. Трение и износ материалов на основе полимеров – Минск: Наука и техника, 1976. – 432 с.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАШИНЫ ТРЕНИЯ МТА-2	
Абрамов К.А., Тюленев Д.Г., Пилюгин С.М.	3
МОДЕЛИРОВАНИЕ СУХОГО ТРЕНИЯ	
Албагачиев А.Ю., Кушнир А.П.	6
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ	
Албагачиев А.Ю., Мухтарова А.Б.	8
ВЛИЯНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ МЕДНО-ЦИНКОВОГО ПОКРЫТИЯ ТИПА «ЛАТУНИ» НА РАБОТУ СОПРЯЖЁННОЙ ПАРЫ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ	
Архипов В.Е., Москвитин Г.В., Пугачев М.С.	10
ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ К ЗАДИРУ КОНТАКТНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ФРИКЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ В РЕЖИМЕ МЕТАЛЛОПЛАКИРОВАНИЯ	
Береснева В.Л., Корнеев А.А.	13
ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФОТОПОЛИМЕРА В ПАРЕ СО СТАЛЬЮ 40Х	
Бирюков В.П., Горюнов Я.А.	16
ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ НА КОЭФФИЦИЕНТЫ ТРЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ	
Бирюков В.П., Якубовский А.А.	19
ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ОДНОСТОРОННЕГО ДИСКРЕТНОГО КОНТАКТА ДЛЯ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ УПРУГОЙ ПОЛОСЫ	
Бобылев А.А.	21
ТРИБОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИТИОФОСФАТНЫХ ПРИСАДОК ПО РД 50-531-85	
Большаков А. Н., Щербаков Ю.И.	24
ТВЁРДОСМАЗОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ	
Броновец М.А., Буковский П.О.	26
СРАВНЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ КЕРАМИЧЕСКИХ ОКСИДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ В ЭЛЕКТРОЛИТАХ РАЗЛИЧНОГО СОСТАВА	
Быкова А.Д., Марков М.А., Кравченко И.Н., Кузнецов Ю.А.	29
ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАСТИЧНОГО СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА РАЗЛИЧНОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ	
Ващишина А.П., Шалыгин М.Г., Ващишин С.П.	32
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ	
Ветрова С.М., Барчукова А.С., Бубнова С.О.	34
СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИСПЫТАНИЯ СТАЛЕЙ В АБРАЗИВНОЙ СРЕДЕ	
Ветрова С.М., Барчукова А.С., Бубнова С.О.	36

К АНАЛИЗУ ДОВЕРИТЕЛЬНОЙ ВЕРОЯТНОСТИ	
Войнов К.Н., Буяновский И.А.	39
ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ СУЩЕСТВОВАНИЯ И ПРИНЦИПОВ УПРАВЛЕНИЯ КАВИТАЦИОННЫМИ ПОТОКАМИ ЖИДКОЙ СМАЗКИ В ЗАТОПЛЕННОМ ЩЕЛЕВОМ КАНАЛЕ	
Воронин Н.А., Пухальский В.А.	41
СОЗДАНИЕ ОБОБЩЕННОГО БЛОКА РЕЖИМОВ РАБОТЫ МАШИН С УЧЕТОМ ПРОЦЕССОВ, ПРИВОДЯЩИХ К ДЕГРАДАЦИИ ИЗДЕЛИЯ	
Гадолина И.В., Побегайло П.А.	44
ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАКОРОТКИХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ И КОРРОЗИОННУЮ СТОЙКОСТЬ НИТРИДА ТИТАНА	
Газизова М.Ю., Смирнов Н.А., Ахмадеев Ю.Х., Газизов М.Р., Кудряшов С.И.	47
ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ СУХИХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ	
Гайдар С.М., Пикина А.М., Узлов А.А.	50
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНЦЕНТРАТА СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ	
Гайдар С.М., Пикина А.М., Черемушкин М.А.	53
ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАНАТНОЙ СМАЗКИ РОСОЙЛ- ТОРСИОЛ-35	
Гильманов Т.И., Головин В.П., Абрамов А.Н., Тюленев Д.Г.	55
ВЛИЯНИЕ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ В РАЗЛИЧНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ	
Головин В.П., Шолом В.Ю., Жернаков В.С., Гильманов Т.И.	58
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ ПРОМЕЖУТОЧНОЙ СРЕДЫ НА КОНТАКТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ИЗНАШИВАНИЕ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ	
Горячева И.Г.	61
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ВАЛИКОВ И ОСЕЙ ТОРМОЗНОЙ РЫЧАЖНОЙ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОВЗОВ	
Даровской Г.В., Бобриков Ю.В., Шеховцов К.В.	63
ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИСПЫТАНИЙ НА СТОЙКОСТЬ К АБРАЗИВНОМУ ИЗНОСУ	
Денисов О.В., Малышев В.Н.	66
МЕТОДИКА НАНЕСЕНИЯ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ШЛИФОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТИ	
Дербуш Д.А., Шалыгин М.Г.	69
ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ КОМПЛЕКСНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК, ПРИГОТОВЛЕННЫХ НА РАЗЛИЧНЫХ НЕФТЯНЫХ МАСЛАХ	
Дмитриев А.В., Золотова П.Н., Кокотова А.А.	72
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИРАБОТКИ МНОГОТОЧЕЧНОГО ИЗНАШИВАЮЩЕГОСЯ КОНТАКТА	
Егоров И.М.	74

МОДИФИКАЦИЯ НАНОЧАСТИЦ МАГНЕТИТА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА СВОЙСТВА СМАЗОК	
Задошенко Е.Г.	77
ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК С ГИБРИДНОЙ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗОЙ	
Ивахник А.В., Жорник В.И., Зейналов Э.	79
ИССЛЕДОВАНИЕ СМАЗОК С ГИБРИДНОЙ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗОЙ В СОСТАВЕ ЛИТИЕВЫХ СОЛЕЙ И ЦЕЛЛЮЛОЗЫ	
Ивахник А.В., Жорник В.И., Ивахник В.П.	82
ЭФФЕКТ БЕЗЫЗНОСНОСТИ В КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЯХ	
Ипатов А.Г., Харанжевский Е.В., Макаров А.В.	85
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В КОНИЧЕСКИХ МЕЛЬНИЦАХ	
Карцев И.С.	88
АНАЛИЗ РАБОТЫ И ПРИЧИНЫ ПОТЕРИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АКСИАЛЬНО-ПОРШНЕВЫХ НАСОСОВ	
Карцев С.В., Абдулхаликов В.С.	91
АПРИОРНОЕ РАНЖИРОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИЗНАШИВАНИЕ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ ТРЕНИЯ	
Карцев С.В., Елагин С.Г.	94
СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПОДГОТОВКЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПОД ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ	
Карцев С.В., Святяшук Н.Н.	96
ВЛИЯНИЕ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР АРКТИЧЕСКОГО РЕГИОНА НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЛЕДЯНОГО НАЛЕТА В ЗОНЕ КОНТАКТА КОЛЕСА ЛОКОМОТИВА С РЕЛЬСОМ	
Керопян А.М.	99
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОМОЩИ ТЕХНОЛОГИИ МИНЕРАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ	
Кислов С.В., Бурмистров А.В., Балаш П.В., Сказочкин А.В.	102
АЛГОРИТМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ИЗНОСА ШАРОВОГО ШАРНИРА	
Клачков В.А.	105
О ТРИБОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ	
Клюев В.А., Савенко В.И.	108
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ЖИРНОКИСЛОТНОГО СОСТАВА НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ЖИРОВ	
Ковалева И.Н.	111

ВЛИЯНИЕ МЕТАЛЛОПЛАКИРУЮЩЕЙ ПРИСАДКИ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОТОРНОГО МАСЛА	
Коноплев В.Е., Лапсарь О.М., Баранов Е.А.	113
ФТОРСОДЕРЖАЩАЯ ПРИСАДКА К МОТОРНОМУ МАСЛУ	
Коноплев В.Е., Лапсарь О.М., Сытьков Е.С.	116
РАЗРАБОТКА МАШИНЫ ТРЕНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ИЗ СТЕКЛОЭПОКСИДНОГО АНТИФРИКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА	
Константинов Е.О., Прожега М.В.	118
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА АВТОМАТИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА ИЗНОСА НА ГАЗОПРОВОДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРЕЖЕННОЙ ОЦЕНКИ СИГНАЛОВ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛНОВОДОВ	
Корнеев Р.В., Скотникова М.А.	120
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА АВТОМАТИЗАЦИИ МОНИТОРИНГА ИЗНОСА НА ГАЗОПРОВОДЕ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДОПОЛНЕННОЙ РЕАЛЬНОСТИ	
Корнеев Р.В., Скотникова М.А.	123
ВЛИЯНИЕ СВОЙСТВ ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЫ НА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК	
Корнеев С.В., Бакулина В.Д., Мачехин Н.Ю., Анисимов Д.С.	126
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДОБАВКИ ОКСИДА ГРАФЕНА НА АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЛИТИЕВЫХ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УСЛОВИЯХ ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ	
Коровушкин В.В., Шилов М.А., Усольцева Н.В., Прожега М.В.	129
ПРИНЦИП НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ В ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	
Короткевич С.В., Буяновский И.А., Плескачевский Ю.М.	131
ОЦЕНКА МИКРОТВЕРДОСТИ И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ НА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВАХ	
Кузнецов Ю.А., Кравченко И.Н., Грибакин А.А.	134
ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ УЗЛОВ ТРЕНИЯ, СОДЕРЖАЩИХ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫЕ СМАЗОЧНЫЕ СРЕДЫ	
Куксенова Л.И., Савенко В.И.	137
МОДЕРНИЗАЦИЯ МАШИНЫ ТРЕНИЯ СМЦ	
Кулаков О.И., Бирюков В.П.	140
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КРИВОЙ ГИЛЬБЕРТА НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПОЛИЛАКТИДНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ	
Кулаков О.И., Иванов Г.Ю., Фролов А.Д.	142
МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНАШИВАНИЯ НЕРАВНОМЕРНО УПРОЧНЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ СМАЗКИ В ЗАЗОРЕ	
Любичева А.Н., Мезрин А.М.	145

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ РЕЗЬБЫ ЛЕГКОСПЛАВНЫХ НКТ	
Малышев В.Н., Почес Н.С.	148
ИСПЫТАНИЯ ДИТИОФОСФАТНЫХ ПРИСАДОК ТЕМПЕРАТУРНЫМ МЕТОДОМ В УСЛОВИЯХ ГРАНИЧНОЙ СМАЗКИ	
Масько С.В., Самусенко В.Д.	151
ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА РЕЖУЩЕМ ИНСТРУМЕНТЕ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО ТЕКСТУРИРОВАНИЯ	
Мигранов М.Ш., Гусев А.С., Оплеснин С.С., Тюрина Ю.А.	154
ЭФФЕКТИВНОСТЬ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ	
Мигранов М.Ш., Кочетов А.С., Мигранова А.У., Оплеснин И.С.	157
КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРАФЕНОВЫХ ПРИСАДОК НА АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦЕНТРАЛЬНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО ПЛАНИРОВАНИЯ 2 ПОРЯДКА	
Мишаков С.Ю., Хопин П.Н.	160
СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС В ЗОНАХ КОНТАКТА БЕЗ И С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ТРЕНИЯ	
Москвитин Г.В., Навроцкий Р.А.	163
СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ	
Мухтарова А.Б.	166
ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИТЫ В ТРИБОТЕХНИКЕ	
Мышкин Н.К., Григорьев А.Я.	168
МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СКОРОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАНИЧНОГО СМАЗОЧНОГО СЛОЯ	
Новиков В.В., Голубева М.А.	170
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АРМИРОВАННЫХ ФЕНОЛФОРМАЛЬДЕГИДНЫХ КОМПОЗИТОВ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ ДИСПЕРСНЫМИ ДОБАВКАМИ	
Панова М.О., Буяев Д.И., Храмова С.А.	173
ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАСЛЯНЫХ СОЖ	
Пилюгин С.М., Тюленев Д.Г. Гильманов Т.В., Шолом А.В., Абрамов К.А.	176
ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕТРАЭДРИЧЕСКОГО АМОРФНОГО УГЛЕРОДНОГО ПОКРЫТИЯ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ТРЕНИИ	
Поплавский А.И., Галкина М.Е., Газизова М.Ю., Ковалева М.Г., Харченко В.А.	179
СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРЕСС-ФОРМ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ	
Попорецкий Д.И., Прожега М.В., Ромашков Е.В., Крылова С.Е.	182

РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛОПЛАКИРУЮЩИХ НАНОТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ЛЕГКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ	
Прокопенко А.К., Корнеев А.А., Морозов А.И., Береснева В.Л.	185
АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ТОРЦОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ	
Пухальский В.А., Офицеров О.О.	187
КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ТОРЦОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЗЕРВОВ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ	
Пухальский В.А., Офицеров О.О., Бодунов Д.М.	189
РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕМКМПЛЕКТА ФИЛЬТРА ТОНКОЙ ОЧИСТКИ ТОПЛИВА ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ Д-243 В ДИЗЕЛЬНОМ ТОПЛИВЕ, КУКУРУЗНОМ, ПОДСОЛНЕЧНОМ РАПСОВОМ, СОЕВОМ МАСЛЕ	
Руденко И.И.	192
ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИОННЫХ ЖИДКОСТЕЙ В КАЧЕСТВЕ ПРОТИВОИЗНОСНЫХ ПРИСАДОК ДЛЯ ПОЛИАЛКИЛЕНГЛИКОЛЕЙ	
Семенов Н.А., Пугачев Н.А., Песковец А.В., Тонконогов Б.П.	195
Трибомониторинг электроимпульсной вибрации в контактных соединениях силового энергетического оборудования	
Скворцов О.Б., Сташенко В.И.	197
ИССЛЕДОВАНИЕ ОСЕВОЙ СИЛЫ НАСОСНЫХ СТУПЕНЕЙ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ УСЛОВИЯХ	
Смирнов Н.И., Смирнов Н.Н.	200
РАЗМЕРНЫЙ ЭФФЕКТ СТРУКТУРЫ ПРИ ТРЕНИИ В СПЛАВЕ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ	
Столяров В.В.	203
ФРЕТТИНГ ИЗНОС В УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТОМ ТИТАНЕ	
Столяров В.В.	206
МЕТОДИКА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА В ЗОНЕ КОНТАКТА ТРИБОСОПРЯЖЕННЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	
Сырбу С.А., Наумов А.Г., Колбашов М.А.	209
МОДЕЛИ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	
Тихомиров В.П., Измеров М.А.	212
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МДО ПОКРЫТИЙ С МОДИФИЦИРУЮЩИМИ ДОБАВКАМИ	
Торская Е.В., Шкалей И.В., Степанов Ф.И., Морозов А.В., Малышев В.Н.	215
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ВОДНОЙ ОСНОВЕ	
Трофименко Б.П., Маркелов А.В., Корытов А.С.	218

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СМАЗОЧНЫХ ПЛЕНОК ПРИ МИКРОДОЗИРОВАННОЙ ПОДАЧЕ СМАЗКИ	
Труфанов О.П., Новиков В.В.	221
ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАДИАЛЬНЫХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ДЕФОРМАЦИЙ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ	
Усов П.П.	223
АДАПТИВНО-ДИССИПАТИВНАЯ МОДЕЛЬ ЭВОЛЮЦИИ КОНТАКТА ТРЕНИЯ	
Федоров С.В.	226
ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИИ ТЕКСТУРЫ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА СЦЕПЛЕНИЕ И НАЧАЛО СКОЛЬЖЕНИЯ УПРУГИХ ТЕЛ	
Цуканов И.Ю., Любичева А.Н.	229
ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ТВЕРДОСПЛАВНОГО РЕЗЦА ДОРОЖНОЙ ФРЕЗЫ ПОСРЕДСТВОМ УМЕНЬШЕНИЯ ЧИСЛА ПОР В РЕЗЦЕ	
Шалыгин М.Г., Рамазанов Г.Х.	232
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ ПОЛИУРЕТАНА С КАРБОНИЗИРОВАННЫМ НАНОСЛОЕМ	
Шкалей И.В., Торская Е.В.	235
ИНЖЕНЕРНЫЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТРИБОЛОГИИ КОМПОЗИТОВ	
Шпнев А.Г.	238
ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДОРАСТВОРИМОГО ТОПОКОМПОЗИТА ПРИ МОДИФИЦИРОВАНИИ ИМ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛИСТОВЫХ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ГЛУБОКОЙ ВЫТЯЖКИ	
Шульга Г.И., Рудяшко Г.В., Скринников Е.В., Колесниченко А.О., Самойленко М.Н.	241

Подписано в печать 12.12.2024 г.
Формат 60x84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл.-печ. л. - 29,1. Тираж - 25 экз. Заказ № 280.
Отпечатано в типографии ИМАШ РАН.
119334, г. Москва, ул. Бардина, 4.