



**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ ИМ. А.А. БЛАГОНРАВОВА
МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ТРИБОЛОГИИ
при информационной поддержке журналов
«Трение и износ» и «Сборка в машиностроении, приборостроении»**

ТРИБОЛОГИЯ - МАШИНОСТРОЕНИЮ
посвящённая 100-летию со дня рождения выдающегося
учёного проф. Р.М. Матвеевского

**Труды XI международной научно-технической
конференции**

1 - 3 ноября 2016 года

Москва 2016 год

**РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ ИМ. А.А. БЛАГОНРАВОВА
МЕЖВЕДОМСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ТРИБОЛОГИИ
при информационной поддержке журналов
«Трение и износ» и «Сборка в машиностроении, приборостроении»**

ТРИБОЛОГИЯ – МАШИНОСТРОЕНИЮ

**Труды XI Международной научно-технической конференции,
посвящённой 100-летию со дня рождения выдающегося
учёного проф. Р. М. Матвеевского**

1–3 ноября 2016 года

Сборник тезисов докладов

Москва 2016 год

УДК 531.43/.46(063)
ББК 34.413.1я431
Т67

Редакционный совет конференции:

А.Ю. Албагачиев, И.А. Буяновский, А.Н. Большаков, В.А. Глазунов,
М.Н. Зеленская, В.Д. Самусенко, И.Ю. Цуканов, Д.Г. Эфрос.

Трибология – машиностроению : Труды XI международной научно-технической конференции. — М.: Институт компьютерных исследований, 2016. — 290 с.

ISBN 978-5-4344-0384-9

В сборнике приводятся результаты исследований, выполненных за последние годы трибологами различных стран.

Работы посвящены исследованию процессов трения и изнашивания трибосопряжений, теории и практике смазочного действия, методам защиты поверхностей трения от износа, снижению энергетических потерь при относительном смещении деталей узлов трения. Особое внимание обращено на развитие идей и методов трибологического исследования, предложенных проф. Р.М.Матвеевским.

Значительное число докладов описывает свойства новых и улучшение качества материалов и покрытий трибологического назначения.

В некоторых докладах излагаются новые подходы к объяснению процессов происходящих на контактирующих поверхностях при относительном их смещении при трении. Приведены доклады, посвященные экологическим проблемам, непосредственно связанным с применением смазочных материалов, влиянием этого применения на окружающую природную среду.

Сборник рассчитан на научных работников, инженеров, конструкторов и специалистов, занимающихся проектированием или эксплуатацией машин, оборудования и приборов.

Доклады в сборнике расположены в алфавитном порядке фамилий первого автора, список докладов (содержание) приведен в конце сборника.

УДК 531.43/.46(063)
ББК 34.413.1я431

ISBN 978-5-4344-0384-9

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук, 2016

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ВЫБОРА СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Абрамов А.Н. (abramov@rosoil.ru)

ХТЦ УАИ, Уфа, Россия.

Предложена методология оценки контактного взаимодействия заготовки с инструментом в процессах холодного деформирования металлов, которая дает возможность сократить время и материальные затраты на промышленные испытания смазочных материалов, выбрать технологию подготовки поверхности заготовок, удовлетворяющую требованиям технологического процесса, повысить ресурс работы инструмента, снизить себестоимость и повысить качество получаемых изделий.

Ключевые слова: холодная обработка металлов давлением, контактное трение, смазочный материал, триботехнические свойства.

Введение

Несмотря на большое количество работ, в литературе отсутствует общепринятая концепция пластического трения, используются различные законы трения, иногда совпадающие, а иногда, совершенно отличные от законов трения в узлах деталей машин [1-5].

К сожалению, на сегодняшний день, используя стандартные и известные методы испытаний определить триботехнические свойства и выбрать смазочный материал для всего многообразия процессов холодного деформирования металлов не предоставляется возможным. Следовательно, выбор смазочных материалов для конкретного технологического процесса необходимо проводить с использованием схем деформирования, которые максимально моделируют условия трения в этом технологическом процессе.

Методы испытаний

С целью повышения достоверности определения триботехнических свойств и выбора смазочных материалов при проектировании технологических процессов холодного деформирования металлов, в лабораториях ХТЦ УАИ помимо общепринятых (стандартных) методов испытаний смазочных материалов на экспериментальных установках, смоделированы наиболее типовые операции процессов холодной обработки металлов давлением: прямое выдавливание, редуцирование, волочение, осадка, листовая штамповка формообразования внутренней резьбы (рис. 1) [6-8].

Экспериментальную оценку температурной стойкости смазочных материалов [9] при трении проводятся по ГОСТ 23.221-84 с использованием модернизированной четырехшариковой машины трения (ЧМТ-1) при постоянной нагрузке и ступенчатом повышении объемной температуры образцов погруженных в смазочный материал.

Результаты

В результате такого подхода к проблеме контактного трения в процессах холодного деформирования металлов и сплавов была разработана методология исследований контактного взаимодействия заготовки с инструментом (рис. 2).

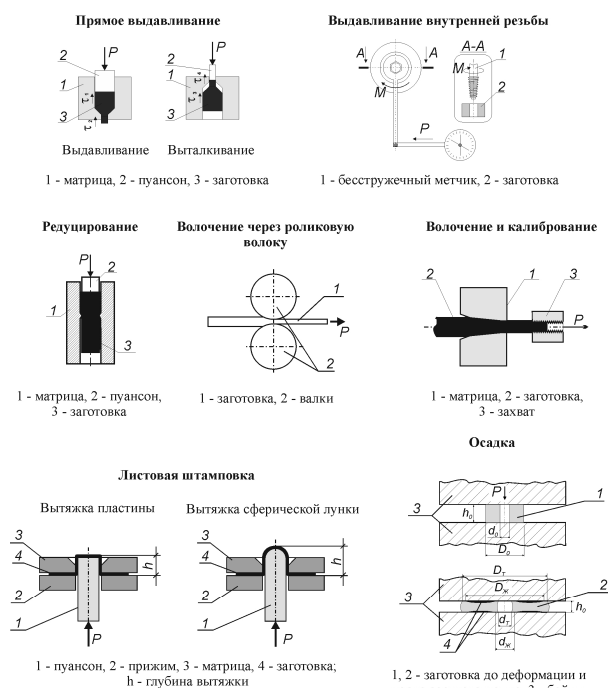


Рис. 1. Схемы деформирования заготовок, используемые при определении триботехнических свойств смазочных материалов.

С помощью предложенной методологии были выявлены:

- экспериментальные зависимости силовых, деформационных, кинематических и параметров трения процессов холодного деформирования металлов от вязкости смазочного материала, содержания химически-активных, поверхностно-активных присадок и наполнителей в смазочных материалах;
- области применения смазочных материалов различной физико-химической природы по показателю задиристости;
- параметры шероховатости поверхности заготовок после деформирования в зависимости от применяемого смазочного материала;
- зависимости температурной стойкости смазочных материалов от их химической природы.

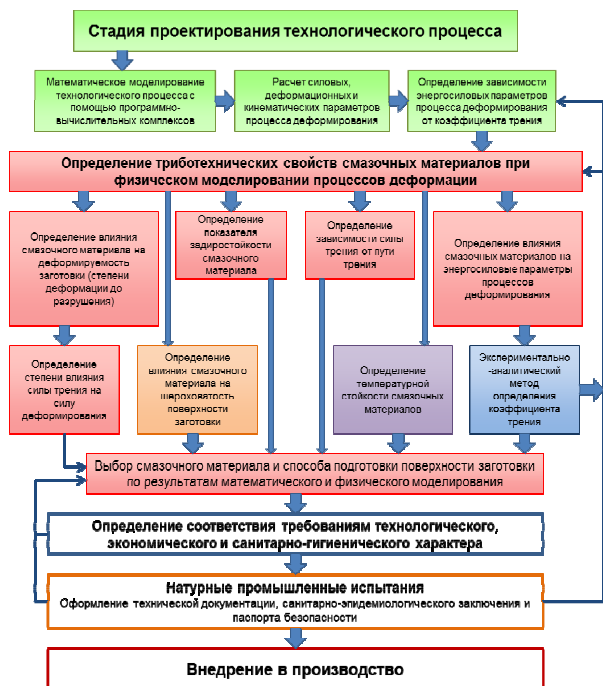


Рис. 2. Методология исследований контактного взаимодействия заготовки с инструментом для процессов холодной обработки металлов давлением с применением смазочных материалов.

Такой подход позволил разработать композиции новых технологических смазочных материалов для процессов холодного объемного деформирования и листовой штамповки сталей и сплавов, применяемых в настоящее время на металлургических и машиностроительных предприятиях России и ближнего зарубежья под маркой «Росойл». Внедрение новых смазочных материалов позволило заменить дорогостоящие импортные смазочные материалы.

Вывод

Предложен и апробирован комплексный подход к решению проблемы выбора технологических смазочных материалов для процессов холодной обработки металлов давлением, который позволяет в лабораторных условиях, с достаточной для практики точности, определять необходимые триботехнические характеристики смазочных материалов для разных условий трения между заготовкой и инструментом.

[1] Грудев А.П. Трение и смазки при обработке металлов давлением. / А.П. Грудев, Ю.В. Зильберг, В.Т. Тилик. Справ. Изд. - М.: Металлургия, 1982. - с.312.

[2] Исаченков Е.И. Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением. - М.: Машиностроение, 1978. - 208 с.

[3] Леванов А.Н. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением. / А.Н. Леванов, В.Л. Колмогоров, Б.Р. Буркин, Ю.В. Ашпуг, Ю.И. Спасский. - М.: Металлургия, 1976. - 416 с.

[4] Зильберг, Ю.В. Закон и модели пластического трения. / Ю.В. Зильберг //Изв. ВУЗов. Черная металлургия. - 2000. - №11. - с. 22-24.

[5] Алиев И.С. Методы и устройства для исследования контактного пластического трения при объемном пластическом деформировании. Алиев И.С., Крюгер К. // КШП, 2008г. №1, с. 3-11.

[6] Патент 2376601 Российская Федерация, МПК: G01N33/30. Способ оценки противозадирных свойств технологических смазочных материалов для холодной обработки металлов давлением / Абрамов А.Н., Шолом В.Ю., Майстренко А.В., Тюленев Д.Г. и др., ООО ХТЦ УАИ, заявл. 25.03.2008; опубл. 20.12.2009.

[7] Патент № 253857 Российская Федерация, Способ оценки силы и коэффициента трения при холодной обработке металлов давлением и устройство для его реализации / Абрамов А.Н., Гизатуллин Р.И., Тюленев Д.Г., Боткин А.В., Корытова О.С., Филиппова Н.А.;УГАТУ - № 2013135603/15; заявл.29.07.2013 опубл. 10.01.2015.

[8] В.Ю. Шолом, А.Н. Абрамов, Р.И. Гизатуллин, Д.Ф. Пузырьков, Д.Г. Тюленев Исследование зависимости коэффициента трения от пути трения при глубокой вытяжке с применением технологических смазок // Кузнечно-штамповочное производство. 2014. №5. С.17-22.

[9] Матвеевский Р.М. Температурная стойкость граничных смазочных слоев и твердых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов./ Матвеевский Р.М., Изд-во «Наука», М.,1971, 228 с.

О ВЛИЯНИИ НЕПОЛНОЦЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА КАЧЕСТВО ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ СОЗДАВАЕМЫХ МАШИН

Авилкин Ю.М. (avilkin37@yandex.ru)

Москва, Россия.

В докладе рассмотрено влияние неполноценных исследований в отраслевых НИИ на качество трибоузлов разрабатываемых машин за последние 50 лет.

Ключевые слова: трение, трибосопряжения, неполноценные исследования, качество трибосопряжений.

В 2015г. опубликован доклад ЮНЕСКО по науке, в котором указывается, что Россия в 2013г. потратила на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы (НИОКР) 24,8млрд. долл. США, что составляет 1,7% от мировых расходов. Для сравнения: США потратили 396,7; Китай – 290,1; Япония-141,4; Бразилия-31,3. Недостаточное финансирование НИОКР в отраслевых институтах приводит к неполноценным исследованиям,

следствием которых является некачественная разработка как трибосопряжений, так и новой техники в целом, выражающаяся в недостаточном ее техническом ресурсе, низкой надежности и неконкурентоспособности. Ниже приведены характерные технические разработки.

К 1965г. предприятие «Уралмашзавод» (бывш. г.Свердловск), являющийся лидером в изготовлении энергоемких буровых установок и

поршневых нефтебуровых насосов, приступил к массовому производству новых насосов У8-6 и У8-7 с приводной мощностью до 1065 л.с. и максимальным давлением нагнетания глинистого бурового раствора до 32 МПа. В новых насосах была внедрена более надежная и широко применяемая за рубежом конструкция жесткого крепления в гидроблоке цилиндрической втулки с независимой регулируемой затяжкой уплотнения цилиндрической втулки (УЦВ), посредством завинчивания центрального нажимного болта. Новые насосы предварительно были успешно испытаны на стенде «Уралмашзавода» при нагнетании ими технической воды [2]. Однако, при эксплуатации новые насосы оказались ненадежными из-за заклинивания в резьбовом трибоузле нажимного болта, вследствие проникновения и накопления в резьбовом соединении мелкодисперсных абразивных частиц кварцевого песка и утяжелителя (барита или гематита). Явления заклинивания нажимных болтов наблюдались автором во многих регионах с 1972 по 1980 г.г.: в ПО «Нижневолокнесть», в ПО «Оренбургнефть» и в др., что приводило к разгерметизации втулки в гидроблоке и выводу из строя гидроблока – наиболее трудоемкого и дорогостоящего узла насоса. Попытка применить в насосах У8-6 импортзамещенные УЦВ, изготовленные по разработке ВНИИнефтемаша, аналогичные УЦВ фирмы «Мареп» (Франция), не дали положительных результатов. Стойкость новых уплотнений снизилась на 30%. Анализ зарубежной и упрощенной отечественной разработок показал, что в зарубежной конструкции УЦВ затягивается тремя болтами с резьбой, аналогичной М36, гаечным ключом, а в отечественной – одним центральным болтом М65 при помощи стального лома. Крутящий момент, передаваемый гаечным ключом, составляет 2068 Н.м. (ГОСТ 2838-80), а ломом – 700. Повышенный диаметр резьбы центрального нажимного болта требует приложения к нему повышенного крутящего момента, что было недостаточным в отечественной разработке. Решением в создавшейся ситуации явилась предложенная автором разработка нового комплекта УЦВ, повысившая герметизацию втулки в гидроблоке и принесящая увеличение стойкости уплотнения в 3 и более раза [3], а также - разработка съемной насадки на головку центрального болта, позволившая использовать гаечный ключ с крутящим моментом до 8694 Н.м [4].

В период с 1970 по 1974 г.г. на стендах ВНИИнефтемаша проводились экспериментальные исследования по изучению закономерностей изнашивания подвижных уплотнительных узлов гидравлической части нефтебуровых насосов, в частности, поршней двустороннего действия [5]. Ресурсные испытания опытных поршней проводились в эксплуатационных условиях и показывали увеличение их ресурса по сравнению с серийно-выпускаемыми базовыми поршнями в 1,8...2 раза. Однако, перед изготовлением установочной партии новых поршней разработчиком без предвари-

тельных исследований в конструкцию сборного поршня СПМ было внесено изменение – были изменены формы периферийной части опорного пластмассового кольца и тыльной части сопрягаемой с кольцом резиновой уплотнительной манжеты. Установочная партия измененных сборных поршней была направлена в 4 региона страны на испытания (по 50 шт. в каждый). Результаты испытаний установочной партии измененных поршней оказались неудовлетворительными, т.к. в трех регионах страны (в ПО «Трознефть», в ПО «Башнефть» и в ПО «Татнефть») ресурс опытных поршней оказался в 2,5...3 раза ниже ресурса базовых поршней. По результатам проведенных испытаний в 1979 г. ВНИИнефтемаш не рекомендовал сборные поршни СПМ к постановке на серийное производство, а впоследствии институтом были разработаны и рекомендованы к производству новые сборные поршни типа ПДС и ПТС с резинотканевыми уплотнительными манжетами повышенной долговечности, показавшие при испытаниях в трех регионах страны увеличение ресурса от 3 до 8 раз [6]. В этот же период автором был разработан самосмазывающийся многоцветный сборный поршень с улучшенным режимом трения (СПСВ-150), испытанный на сверхглубокой скважине в Шебелинском УБР ВПО «Укргазпром» [7,8]. Средняя наработка базовых монолитных резинометаллических поршней за два года эксплуатации насосов У8-6М составляла 9,5 час (от 7 до 12 час). Ресурс одного сменного комплекта уплотнения нового поршня СПСВ-150 оказался в 19,5 раз выше, чем у базового монолитного поршня и в 2,5 раза выше ресурса сборного поршня СПМ-150 (первоначальный вариант), работавшего в параллельном цилиндре насоса У8-6М. Суммарная наработка многоцветного сборного поршня СПСВ-150 с тремя сменными комплектами уплотнений составила 430 часов.

В 2001 г. проводились заводские стендовые испытания передвижной нефтегазопромысловой насосной установки с трехплунжерным насосом высокого давления НП-1000К с модернизированной системой смазки [9]. В малых головках шатунов приводной части насоса были запрессованы антифрикционные втулки из графитопласта Углекон (ТУ 92.04.06.008-89), предназначенные для работы при удельных нагрузках до 70 МПа. Втулки контактировали с полированными стальными пальцами крейцкопфа, максимальная уд. нагрузка в которых не должна превышать 55 МПа при максимальном давлении нагнетания 105 МПа. Испытания насоса проводили по следующей методике: вначале насос отработал на холостом ходу в течение 2 час, затем давление насоса повышали от 30 МПа до 105 МПа при различных частотах вращения коленвала (от 80 до 325 об/мин). На каждом режиме насос отработывал по 15 мин. В режиме работы насоса на давлении 70 МПа из приводной части насоса повалил дым. После остановки насоса и его разборки было установлено, что все три втулки, имеющие радиальную толщину 7,5 мм,

полностью износились. Испытания выявили, что долговечность углеконовых втулок в насосе НП-1000К под нагрузкой составила не более 7,5 час. Позднее в малые головки шатунов были запрессованы бронзовые втулки, с которыми насос завершил заводские испытания [10].

Неполноценные исследования приводят к негативным результатам и в других отраслях промышленности. Так, в 1982г. произошла авиакатастрофа с авиалайнером ЯК-42 вследствие износа до критического состояния и последующего разрушения резьбового трибосопряжения (стальной винт - бронзовая гайка) механизма управления перестановкой стабилизатора (руля высоты). После расследования авиакатастрофы в ФГУП ЦАГИ были проведены исследования износостойкости резьбового трибосопряжения. Было установлено, что только путем замены используемой ранее смазки ЦИАТИМ 221 на новую смазку “Эра” увеличивается долговечность резьбового трибосопряжения в 20 и более раз [11]. Происходят, также, разрушения подшипников скольжения в узлах шасси самолетов типа Боинг- 757 из-за высоких удельных нагрузок (70...100МПа), высоких вибраций в трибоузле (антифрикционная втулка-стальная ось), а также – в результате недостаточного триботехнического опыта [11].

Т.о., многолетняя практика создания новой техники в отраслевом НИИ показывает, что при разработке новых трибосопряжений, входящих в конструкции новых машин, необходимо уделять серьезное внимание всем кажущимся несущественным факторам, особенно в узлах подвижных трибосопряжений, для чего в разрабатывающих НИИ необходимо иметь квалифицированные кадры, специальные испытательные стенды и прочее оборудование, а финансирующим организациям

необходимо увеличить финансирование НИОКР по разрабатываемым проектам.

- [1] Сафронов Ю. России мешает “ресурсное проклятие”// www.novaygazeta.ru от 10.11.2015
- [2] Поршневые буровые насосы// Труды ГИПРОнефтемаша / Под ред. к.т.н. В.И. Рошупкина. Выпуск 3(13). – М.: Недра. – 1966, 312 с
- [3] Авилкин Ю.М., Мкртычан Я.С., Иоаннесян Г.Р. Новое уплотнение цилиндрической втулки для буровых насосов высокого давления // РНТС “Машины и нефтяное оборудование”. –1975, № 4
- [4] Авилкин Ю.М. Повышение надежности и долговечности уплотнения цилиндрической втулки в буровых насосах У8-6М// РНТС “Горное и нефтепромышленное машиностроение” – М.: ЦИНТИХИМнефтемаш. –1976 , № 11. Реф. 11.43.102
- [5] Мкртычан Я.С. Исследование и повышение долговечности уплотнительных устройств нефтебуровых насосов// Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н. – М. –1975
- [6] Авилкин Ю.М., Ильвовский Л.Л. и др. Создание и промышленное освоение цилиндропоршневых групп нового поколения для буровых насосов по ГОСТ 6081-81//Нефтепромышленное машиностроение. Пути повышения эффективности и технического уровня / Сб. научных трудов ВНИИнефтемаша./Ред. к.т.н. С.В. Ловчева –М. –1986, 5-27
- [7] Авт. свид. СССР. № 732605. МПК: F16g 1/00, F16g 15/32. Приоритет от 1974г. Авилкин Ю.М. Сборный поршень
- [8] Авилкин Ю.М., Айрапетов Л.С. Поршни со стальными опорными кольцами для буровых насосов// Нефтепромышленное машиностроение. Пути повышения эффективности и технического уровня/ Сб. научных трудов ВНИИнефтемаша /Под ред. к.т.н. С.В. Ловчева. –М. –1986, 27-43
- [9] Авилкин Ю.М. Анализ причин отказов опытных нефтегазовых насосов нового поколения //Химическое и нефтегазовое машиностроение. –2007, № 2, 25-27
- [10] Авилкин Ю.М. Повышение долговечности плунжерных цементировочных насосов высокого давления // Трибология – машиностроению / Труды десятой юбилейной научно-технической конференции. – М. ИМАШ РАН. – 2014, 6-7
- [11] Лимончиков В.Д. Влияние сил трения и износа в трибосопряжениях механизмов на безопасность полетов ЛА.// Проблемы машиноведения: трибология – машиностроению. / Труды Всероссийской научно-технической конференции. –М. ИМАШ РАН. –2012, т. 1, 110-113

МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖЕСТКОГО ШТАМПА С ДВУХСЛОЙНЫМ ПОКРЫТИЕМ ПРИ УЧЕТЕ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ В ЗОНЕ КОНТАКТА

Азоян А.И. (Azojan.Anaid@mail.ru), Иваночкин П.Г. (ivanochkin_p_g@mail.ru)

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

Рассмотрена плоская контактная задача о взаимодействии жесткого штампа с двухслойным покрытием при учете сил трения в зоне контакта. Показано влияние коэффициента трения на распределение контактных давлений и эффективного напряжения по Мизесу. Предложен метод учета теплотыделения в зоне фрикционного взаимодействия для тонкого покрытия.

Ключевые слова: контактная задача, двухслойное покрытие, силы трения, теплотыделение.

Введение

В настоящее время для повышения долговечности узлов трения машин и механизмов широко используются различные типы покрытий. Несмотря на разнообразие нагрузочно-скоростных характеристик требования, предъявляемые к физико-

механическим свойствам используемых в этих узлах материалов, одинаковы. С одной стороны, они должны обладать высокой микротвёрдостью и теплопроводностью, что позволит им противостоять абразивному изнашиванию, с другой им нужны низкая микротвёрдость и высокая пластичность

для улучшения антифрикционных свойств. В условиях большой вариативности действующих факторов, повышение работоспособности и долговечности исследуемых узлов трения возможно за счет использования двухслойной структуры: силовой слой (подложка) и антифрикционный полимерный слой.

При постановке контактных задач часто пренебрегают учетом сил трения, однако при фрикционном взаимодействии наличие сил трения в зоне контакта может приводить к существенному изменению напряженно-деформированного состояния конструкции и являться фактором, вызывающим ее разрушение. Кроме того, фрикционное взаимодействие является сложным многофункциональным процессом взаимодействия поверхностных слоев на микроплощадках контакта, сопровождающимся изменением механических свойств. Помимо этого при контакте необходимо учитывать влияние на напряженно-деформированное состояние изменения коэффициента трения связанное с изменением температуры тел и появления частиц износа [1].

Постановка задачи

Рассматривается плоская контактная задача теории упругости о действии твердого штампа на упругий шероховатый двойной слой. Штмп прижимается вертикальной силой \vec{P} и движется вдоль своей образующей со скоростью \vec{V}_0 (рис. 1).

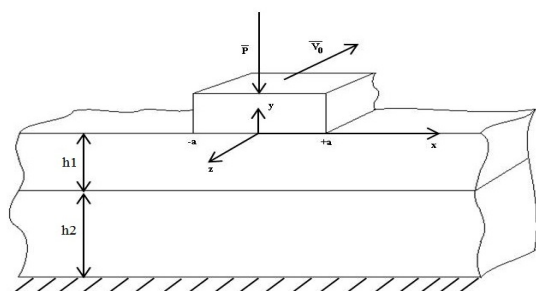


Рис. 1. Контактное взаимодействие штампа и двухслойной полосы

В результате этого под штампом возникают силы трения $\tau_{zy}(x)$. Часть работы этих сил $A_1 = n_1 A$ идет на образование тепловых потоков $Q_1(x)$ и $Q_2(x)$, направленных, соответственно, вглубь слоя и штампа. Силы трения $\tau_{zy}(x)$ связаны с контактным давлением $\sigma_y(x)$ законом трения Кулона [2].

Для решения задачи будем использовать пакет ANSYS путем построения канонической конечно-элементной сетки со сгущением в зоне предполагаемого контакта из четырехугольных упругих элементов PLANE82 с опцией плоской деформации. Для учета контактного взаимодействия в дополнение к элементу PLANE82 использованы два типа специальных контактных конечных элементов ANSYS CONTA175 и TARGE169, образующих контактные пары.

Расчеты по распределению напряжений для относительно тонкого покрытия проводились с учетом следующих параметров: толщина первого

слоя $h_1 = 0,0088$ мм; относительная толщина слоев $H = 2$; радиус штампа $R = 6,35$ мм; модуль Юнга первого слоя $E_1 = 276$ ГПа; относительная жесткость слоев $G = 0,67$; коэффициенты Пуассона 1-ого и 2-ого слоя соответственно $\nu_1 = 0,2$, $\nu_2 = 0,3$.

Величина приведенной силы принималась равной $P = 1,91 \cdot 10^5$ Н/м. Механические характеристики штампа принимались следующими: $E_s = 2 \cdot 10^{12}$ Па; $\nu_s = 0,49$. Относительная толщина покрытия в этом случае равна $\lambda = 0,153$.

На рисунках 2–3 приведено распределение напряжений σ_x внутри двухслойной полосы.

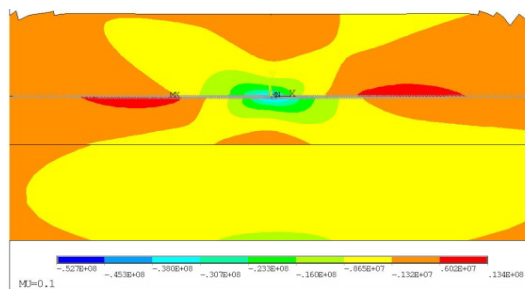


Рис. 2. Распределение напряжений σ_x в двухслойной полосе при $\mu = 0,1$.

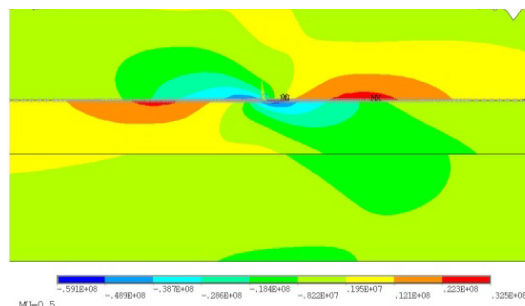


Рис. 3. Распределение напряжений σ_x в двухслойной полосе при $\mu = 0,5$.

При малых значениях коэффициента трения четко видна зона концентрации растягивающих напряжений на границе «покрытие-подложка».

С увеличением коэффициента трения происходит перераспределение растягивающих напряжений, и зона их концентрации располагается только позади штампа. Максимум растягивающих напряжений достигается на поверхности покрытия и его численное значение растет с увеличением силы трения.

На границе между штампом и двухслойной полосой происходит превращение основного количества механической энергии в теплоту. При учете тепловыделения в зоне контакта задача сводится к совместному решению термоупругих уравнений Дюгамеля-Неймана и уравнения теплопроводности [3]. Используя подход, предложенный в работах В.М. Александрова для тонкого покрытия, получим:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 U_i}{\partial y_i^2} = 0, \\ \frac{\partial^2 V_i}{\partial y_i^2} - \gamma_i \cdot \frac{\partial T_i}{\partial y_i} = 0, \gamma_i = \frac{1+\nu_i}{1-\nu_i} \cdot \alpha_{Ti} h_i, \\ \frac{\partial^2 T_i}{\partial y_i^2} = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Такая постановка плоской контактной задачи для двухслойной полосы при учете тепловыделения в зоне контакта позволило определить распределение температуры в полосе, а также связь между перемещением верхней границы полосы и кон-

тактным давлением (основание Фусса-Винклера с температурным членом).

- [1] Чебаков М.И. Взаимодействие штампа и двухслойного основания при наличии сил трения в области контакта // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2006, №1. – С. 60-66
 [2] Торская, Е.В. Анализ влияния трения на сопряженное состояние тел с покрытиями / Е.В. Торская // Трение и износ. – 2002. – Т.23, №2. – С. 130-138
 [3] Колесников, В.И. Двухслойные композиции триботехнического назначения для тяжело нагруженных узлов трения: монография/В.И. Колесников, П.Г. Иваночкин. – Ростов н/Д: РГУПС, 2009. – 124 с

ВЗАИМОСВЯЗЬ ИЗНОСА И СПОСОБА РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ МЕДЬСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИТОВ ПРИ СКОЛЬЖЕНИИ С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ТОКА

^{1,2}Алеутдинова М.И. (aleut@ispms.ru), ¹Фадин В.В., ³Алеутдинов К.А.

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия;

²Северский технологический институт НИЯУ МИФИ, Северск, Россия;

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия.

Осуществлено сухое скольжение спечённых медьсодержащих композитов по стали при контактной плотности тока более 100 А/см². Показано образование оксида FeO в поверхностном слое. Отмечено, что низкое содержание оксида FeO приводит к высокой интенсивности изнашивания. Наблюдается образование жидкой фазы на поверхности скольжения. Интенсивность изнашивания уменьшается в присутствии жидкой фазы на поверхности скольжения.

Ключевые слова: интенсивность изнашивания, пластическая деформация, релаксация напряжений, поверхностный слой.

Введение

В тяжелых условиях сухого трения происходит неизбежная пластическая деформация поверхностного слоя (ПС). В таких условиях могут образовываться аморфная и нанокристаллическая фазы как результат структурных изменений ПС [1]. Можно предположить, что при некоторых входных параметрах трибосистемы (давление, скорость скольжения, состав материала и т.п.) вязкость аморфной фазы будет иметь низкое значение и поверхностный слой будет деформироваться как вязкая жидкость без образования структурных дефектов. Представляет интерес изучить возможность материала релаксировать возникающие напряжения этим путем.

Целью работы является изучение взаимосвязи состава ПС, морфологических особенностей поверхности скольжения и износостойкости медьсодержащих композитов при воздействии электрического тока высокой плотности.

Материалы и методы

Состав материалов по шихте показан в таблице, где Гр - графит. Образцы спекали в вакууме при температуре 1100°C в течение 2 часов. Пористость P , твердость HB , удельное электросопротивление ρ композитов определены по стандартным методикам. Металлографическое изучение прове-

дено на оптическом микроскопе Neophot-21. Химический состав контактного слоя определен на Оже-спектрометре «Шхуна-2». Рентгеновский фазовый анализ проведен на дифрактометре ДРОН-3 в излучении CoK_{α} .

Таблица. Свойства композитов и параметры решетки фаз, расположенных на поверхности трения

Свойства\состав (об.%)	HB, МПа	P, [%]	ρ , 10^{-6} Ом м	a_{Cu} , нм	a_{Fe} , нм	a_{FeO} , нм
Cu	1100	0	0,018	0,3616		0,4306
Cu-10% Гр-10%Fe	758	5	0,07	0,3616	0,2868	0,4277
Cu-10% Гр-40%Fe	820	8	0,09	0,3618	0,2866	0,4296
Cu-10% Гр-70%Fe	1220	10	0,16	0,3615	0,2866	0,4300
Cu-20%Fe	1060	16	0,08	0,3615	0,2866	0,4295
Cu-50%Fe	1340	11	0,14	0,3617	0,2867	0,4303
Cu-80%Fe	1800	10	0,16	0,3615	0,2866	0,4300

Триботехнические испытания проведены в условиях скользящего токосъема без смазки при давлении 0,13 МПа, скорости скольжения 5 м/с на

машине трения СМТ-1 по схеме “вал-колодка”. Контртело – сталь 45 (50 HRC). Линейная интенсивность изнашивания определена как $I_h = h/L$, где h – изменение высоты образца на дистанции скольжения L . Контактная плотность тока представлена как $j = i/A_a$, где i – ток, текущий через номинальную площадь трибоконтакта A_a .

Результаты и их обсуждение

Наиболее высокая интенсивность изнашивания наблюдается у Cu-Гр-10%Fe. I_h композитов Cu-Гр-40%Fe, Cu-Гр-70%, Cu-20%Fe и Cu-50%Fe имеет низкие значения при плотности тока до 300 А/см². Композит Cu-80%Fe изнашивается быстрее. Литая медь проявляет низкую интенсивность изнашивания, близкую к I_h композитов Cu-20% Fe и Cu-50% Fe, но начало катастрофического износа меди происходит при более высокой плотности тока ($j=330$ А/см²). Различие в характере изнашивания материалов обусловлено различием свойств ПС. На поверхности скольжения композита Cu-Гр-10% Fe наблюдаются следы адгезии и пластического отеснения неровностей. Образование слоя вторичных структур (ВС) не наблюдается. Изношенные поверхности композитов Cu-Гр-40% Fe и Cu-Гр-70% Fe имеют признаки образования вязкой жидкости и формируют трибослой (слой ВС). Признаки образования жидкой фазы, а также слоя ВС, наблюдаются на поверхностях трения материалов Cu, Cu-20% Fe и Cu-50% Fe при некоторых условиях контакта.

По данным Оже-анализа поверхность скольжения композита Cu-Гр-10 Fe содержит более 50 ат.%Cu и менее 10 ат.% кислорода. Поверхности скольжения композитов, проявляющих относительно низкую интенсивность изнашивания, характеризуются приблизительно одинаковым отношением Fe/O=1 (около 40 ат.%).

На основании данных рентгенофазового анализа установлено присутствие в слое ВС оксида FeO, меди, α -Fe. Это значит, что трибослой есть композит, где мягкие компоненты (медь, α -Fe и квазиморфная фаза) играют роль матрицы, а

твёрдые частицы оксида FeO играют роль наполнителя. Твёрдые частицы оксида FeO принимают на себя основную импульсную нагрузку в контакте и передают её в матрицу через межфазную границу. В этом случае удельная нагрузка на матрицу низка и она деформируется упруго или пластически на низком структурном уровне, т.е. внутри субзерен. Низкая I_h соответственно должна реализовываться при таком способе релаксации напряжений. Низкое содержание оксида FeO на поверхности скольжения композита Cu-Гр-10% Fe приводит к адгезии на пятнах контакта и к разрушению ПС с высокой I_h при плотности тока менее 100 А/см².

Приведённые данные показывают, что наличие оксида FeO или образование слоя ВС и жидкой фазы на поверхности трения позволяют удовлетворительно диссипировать энергию внешнего воздействия и релаксировать напряжения в зоне трения. Эти явления способствуют реализации вполне высокой износостойкости.

Выводы

Оксид FeO образуется в поверхностном слое всех рассмотренных материалов. Низкое содержание оксида FeO соответствует высокой интенсивности изнашивания. Интенсивность изнашивания некоторых спечённых композитов и меди близка к нулю при скольжении по стали с контактной плотностью тока до 300 А/см². Это связано с образованием жидкой фазы на поверхности трения. Предположено, что возникновение диссипативной структуры или реализация контактного плавления в системе FeO-Cu-Fe на поверхности скольжения могут служить причинами образования жидкой фазы при некоторых режимах трения.

Работа выполнена по проекту III.23.2.4 программы III.23.2 фундаментальных исследований СО РАН

[1] M.Braunovich, V.V.Konchits, N.K.Myshkin. Electrical contacts. Fundamentals, Applications and Technology. — by Taylor & Francis Group, LLC—2007

ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЛУБРИКАЦИИ СИСТЕМЫ «КОЛЕСО-РЕЛЬС» ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Алисин В.В. (vva-imash@yandex.ru), Покидько Б.В., Рощин М.Н.,
Силова Т.В., Юдкин В.Ф.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

В докладе рассмотрены исследования смазки на основе устойчивой дисперсии наночастиц, синтезируемых из природных алюмосиликатов. Приведены результаты триботехнических испытаний новой смазки при трении в интервале скоростей 40 -100 м/с.

Ключевые слова: смазка для рельсов, трение, износ

Введение. Ключевую роль в обеспечении безопасности и коммерческой эффективности высокоскоростного транспорта играют надежность и ресурс

работы колесных пар поездов и железнодорожного пути в условиях движения со скоростями до 350 км/ч и более. С увеличением скорости роль трибо-

технических проблем и энергопотребления возрастает. Развитие высокоскоростного железнодорожного транспорта обострило проблемы износа системы колесо-рельс. В системе колесо-рельс наибольшие контактные напряжения возникают в кривых железнодорожных путей между рельсом и ребордой колеса. Трение несмазанных стальных поверхностей характеризуется большими коэффициентами трения и износом, чем больше нагрузка и скорость, тем больше износ поверхностей трения. В предельном сочетании действующих факторов возможно выкатывание колеса на рельс – это катастрофа

Материалы и методы. В данной работе представляется новый смазочный материал с наполнителем из порошков алюмосиликатов. Это природный бентонит, основу которого составляет минерал монтмориллонит. Отличие монтмориллонита от применяемых в маслах в качестве порошкового наполнителя природных слоистых серпентинитов состоит в том, что базальная поверхность монтмориллонита имеет перманентный отрицательный электрический заряд. Разработана технология химического дробления агрегатов твердых нанопорошков и слоистых алюмосиликатов на наноразмерные частицы и создания устойчивых дисперсий с равномерным распределением наночастиц путем волновой гомогенизацией смеси. Создана технология рельсовой смазки на основе минерального масла и алюмосиликатных слоистых наночастиц, модифицированных катионными органическими веществами (катионными ПАВ).

Обсуждение результатов. Седиментационная устойчивость смазки как дисперсной системы определяется, главным образом, размерами индивидуальных наночастиц, которые по данным рентгено-спектрального анализа, электронной микроскопии и динамического светорассеяния имеют пластинчатое строение, причем толщина единичных пластинок составляет величину порядка 3-4 нм, а длина и ширина пластинок равна 200-500 нм. Более эффективная смазочная способность смазки проявляется благодаря тому, что в ее состав входят пластинчатые отрицательно заряженные минеральные наночастицы, способные образовывать адсорбционные ламелярные слои на поверхности наночастиц. Пластинчатое строение и нанометровая толщина используемых наночастиц, а также возможность гидрофобизации их поверхности путем реакций ионного обмена обеспечивают наличие очень большой межфазной поверхности, достигающей 600-600 м²/г и способствует образованию разветвленных фрактальных структур, которые придают смазке тиксотропные свойства. Гомогенизация дисперсии наночастиц (присадки к маслу) проводилась методом резонансной технологии. К емкости со смазочным материалом подводится внешний источник колебаний и при достижении резонансных частот в объеме смазки устанавливается кавитационный режим. При схлопывании газовых пузырьков образуются ударные волны, под воздействием которых содержимое

реактора гомогенизируется. Использование [1] резонансных режимов движения двухфазной системы имеет ряд преимуществ перед традиционной вибротехникой и ультразвуковой технологией, среди которых важнейшими являются уменьшение энергозатрат, ускорение протекания технологических процессов и повышение эффективности гомогенизации.

Была выполнена модернизация машины трения УМТ-1, которая состояла в изготовлении дополнительной ступени с внешним приводом, что позволило довести число оборотов шпинделя до 6000 об/мин и увеличить диаметр дисковых образцов до 320 мм (рис. 7), в условиях применения пальчиковой схемы в виде трения 3-х равномерно расположенных по окружности пальцев, каждый из которых содержит стальной шарик диаметром 8 мм. Контактная нагрузка (по Герцу) составила 2000 МПа при длительности единичного эксперимента 2 с. Измеряемый износ образцов корректировался по величине пройденного пути трения. Испытания проведены в практически не изученном интервале линейных скоростей 40-100 м/с, в котором модельных триботехнических экспериментов в мире очень мало. Изучение влияния скорости скольжения на коэффициент трения f проводилось при ступенчатом повышении скорости в диапазоне $v = 41 - 92$ м/с.

Механизм изнашивания стальных поверхностей, работающих в условиях высокоскоростного трения, отличается от того, что имеет место в интервале скоростей 0-40 м/с вследствие большого влияния образующейся в контакте капельной фазы. В результате имеет место существенное снижение коэффициента трения и увеличение износа поверхностей. Эксперименты показали, что в интервале 40-100 м/с применение различных смазочных материалов обеспечивает практически одинаковый коэффициент трения, однако по показателю износостойкости фиксируются значительные различия. Дополнительный положительный эффект от лубрикации рельсов состоит в увеличении стойкости рельсов к пластическому течению поверхностных слоев за счет уменьшения касательных напряжений, а также увеличению стойкости поверхности трения к контактно-усталостному выкрашиванию. Предлагаемая смазка для рельсов эффективнее в 2-3 раза в повышении износостойкости стальных поверхностей, в сравнении с испытанными серийными смазками для рельсов. Компоненты для создания смазки являются доступными и недорогими и, вероятно, не окажут значительного влияния на стоимость конечного продукта. При скоростях более 40 м/с интенсивное тепловыделение на фрикционном контакте достигает параметров, при которых происходит испарение жидкой компоненты смазочного материала, и интенсивность изнашивания поверхностей зависит от количества твердого смазочного наполнителя, попадающего в области фактического контакта колеса и рельса. Состав жидкой компоненты базо-

вой смазки мало влияет на эффективность лубрикации.

Установлено, что лубрикация системы колесо-рельс при скоростях более 40 м/с применяемыми серийными смазочными материалами является мало эффективной по способности снижения износа рельсов и колес. Переход к наноразмерному наполнителю позволяет резко увеличить эффективность смазочного действия. Модельные эксперименты с экспериментальными образцами смазки в условиях скольжения стальных поверхностей в

диапазоне скоростей 40-100 м/с показали перспективность применения смазки для лубрикации рельсов высокоскоростного железнодорожного транспорта. С ростом скорости скольжения в диапазоне $v = 40 - 100$ м/с коэффициент трения f снижается в 2 раза; общий диапазон изменения коэффициента трения $0,125 < f < 0,06$.

[1] Ганиев Р.Ф. Волновые машины и технологии (введение в волновую технологию).- М.: Научно-издательский центр «Регулярная и хаотическая динамика», 2008. – 192 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ПАР ТРЕНИЯ В МЕХАНИЗМАХ, РАБОТАЮЩИХ В ТЯЖЕЛОМ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ

Безносов А.В. (beznosov@nntu.nnov.ru), Бокова Т.А., Шумилков А.И.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, Нижний Новгород, Россия.

В НГТУ им.Р.Е. Алексеева выполняется комплекс экспериментальных исследований направленных на изучение влияния пристенного слоя: сталь – ТЖМТ. В результате которых показано, что образующееся оксидное покрытие на стали, положительно влияет на трибологические характеристики рабочих поверхностей контактных пар трения, работающих в расплаве высокотемпературного свинца.

Ключевые слова: ТЖМТ, свинец, шестеренный насос, пристенный слой.

Одним из приоритетных и малоизученных направлений трибологии - науке о контактном взаимодействии твердых тел, является трибология в элементах ядерных энергетических установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ). Решение проблем данного направления позволит увеличить ресурсоспособность и надежность механизмов с контактными парами трения в элементах ядерной энергетической установки.

Для изучения влияния пристенного слоя: сталь – ТЖМТ и образующегося оксидного покрытия на стали на триботехнические характеристики рабочих поверхностей контактных пар трения (коэффициента трения и др.), при варьируемых параметрах высокотемпературного расплава свинца и эвтектики свинца-висмута, в НГТУ им. Р.Е. Алексеева выполняется комплекс расчетно-теоретических и экспериментальных исследований. Как правило, пристенный слой в среде ТЖМТ обогащен примесями: соединениями теплоносителя, компонентов конструкционных материалов и др. Образовавшиеся оксидные покрытия и пристенный слой предохраняют контактные поверхности сталей и чугунов от схватывания, связанного с ним глубинного вырывания и других негативных эффектов. Они являются важным фактором эксплуатации контактных поверхностей в реакторных условиях. Частицы оксидов теплоносителя (свинца, висмута) соединений компонентов сталей, пузырьки паров, газов и др. находящиеся в пристенных слоях поверхностей трения, пропитанные теплоносителем оказывают эффект, аналогичный

эффекту смазочного материала. Несмотря на то, что пристенный слой может быть обогащен соединениями компонентов конструкционных материалов, при трении контактной пары в этих условиях может происходить интенсивное изнашивание поверхностей контакта. [1]

Основной целью экспериментальных исследований является увеличение ресурса механизмов с контактными парами трения работающих в расплаве высокотемпературного свинцового теплоносителя в условиях, приближенных к условиям работы реакторной установки с ТЖМТ и определение трибологических характеристик для обоснования проектных решений.

Для определения трибологических характеристик контактных пар трения исследования проводились в расплаве свинца при температуре 450-500°C, при фиксированном содержании кислорода в теплоносителе, материал образцов пары трения: сталь 12X18H10T, состояние контактных поверхностей - материал в состоянии поставки и материал с сформированными на поверхностях контакта образцов оксидными покрытиями в среде расплава свинца.

В результате проведенных исследований определены трибологические характеристики оксидных покрытий, образующихся на поверхностях контакта пар трения в расплаве ТЖМТ. Подтверждено и доказано положительное влияние оксидных покрытий (уменьшение коэффициента трения) на трибологические характеристики пары трения в среде ТЖМТ. (Рис.1)

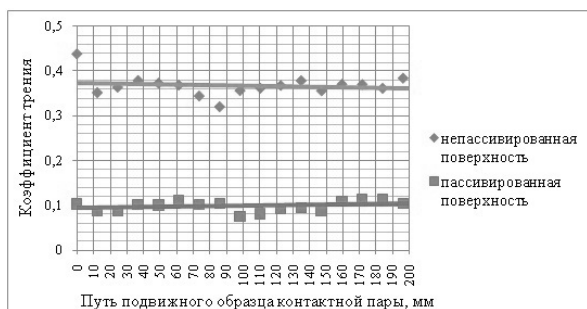


Рис. 1. Изменение коэффициента трения по пути перемещения подвижного образца контактной пары при удельной нагрузке 23 кг/см².

Для определения возможности длительной работы контактных пар трения в расплаве ТЖМТ в условиях, приближенных к условиям работы реакторной установки с ТЖМТ был создан экспериментальный стенд ТР-2013НГТУ на котором проводится экспериментальное исследование работоспособности конструктивных элементов проточной части шестеренного насоса НШС-01 НГТУ.

В ходе данных экспериментальных исследований получены зависимости влияния на трибологические характеристики контактных пар конструктивных элементов проточной части шестеренного насоса при фиксированном содержании кислорода (термодинамической активности O₂) в расплаве свинца, при вращательном движении образцов контактной пары (вал-втулка), работе зубчатого зацепления в условиях, приближенных к натурным (температура, скорость вращения и др.) при различных сформированных оксидных покрытиях на рабочих поверхностях контакта пар трения.

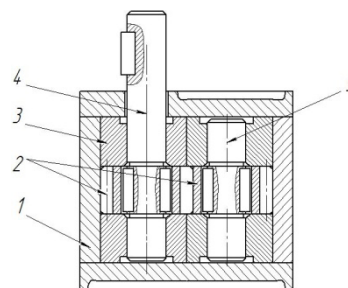


Рис. 2. Схема шестеренного насоса
1 – корпус насоса; 2 –зубчатые колеса;
3 –подшипники; 4 - ведущий вал насоса;
5 - ведомый вал насоса.

В результате проведенных исследований получен большой массив экспериментальных данных, показано положительное влияние оксидных покрытий, сформированных на поверхностях контакта, работающих в расплаве высокотемпературного свинца для контактных пар трения при возвратно-поступательном (палец-пластина) и вращательном (вал-втулка) перемещении контактной пары трения. Исследованы процессы трения в условиях, приближенных к натурным условиям работы РУ (температура теплоносителя, скорости взаимодействия контактных пар трения и др.)

[1] Безносков, А.В. Оборудование энергетических контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике.: учеб. пособие/А.В. Безносков, Т.А. Бокова, Нижегород. Гос. Техн. Ун-т им. Р.Е.Алексеева. – Нижний Новгород, 2012 -536с.

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГУЛЯРНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА В МЕТОДАХ ППД

¹Бекаев А.А. (bekaev@list.ru), ¹Тюляева Е.А.

¹Московский государственный машиностроительный университет, Москва, Россия.

Реализация регулярного микрорельефа (РМР), сформированного на рабочей поверхности деформирующе-выглаживающих элементов прошивочно-протяжного инструмента, позволяет значительно улучшить качество и точность обработанной поверхности детали.

Ключевые слова: методы ППД, регулярный микрорельеф, качество и точность.

Одной из приоритетных задач современного машиностроения является повышение качества и точности механической обработки.

Для решения поставленной задачи, применительно к методам поверхностного пластического деформирования (ППД), была разработана новая конструкция рабочей части элементов прошивочно-деформирующе-выглаживающего инструмента (рис. 1), позволяющая существенно повысить качество и точность обработанного отверстия детали [1, 2].

Основное отличие предложенной конструкции от традиционно применяемых состоит в наличии, так называемого, регулярного микрорельефа (РМР), сформированного на рабочих поверхностях

деформирующе-выглаживающих элементов прошивки.

Результаты исследований показали, что при использовании РМР, выполняющего роль “маслоудерживающих карманов”, существенно уменьшается значение негативной адгезионной компоненты суммарного коэффициента трения-скольжения, повышается качество и точность обработки, увеличивается стойкость инструмента.

Экспериментально установлено, что по сравнению с традиционно применяемыми “гладкими” деформирующе-выглаживающими элементами [3 и др.], РМР может обеспечить более высокое (до 5-8 раз) качество по параметру шероховатости поверхности детали (рис. 2).

Таким образом, проведенные исследования позволяют дополнить и расширить ранее известные результаты исследований, а предложенные решения не только соответствуют современным представлениям и тенденциям развития научно-технического комплекса страны, но и являются принципиально новыми.

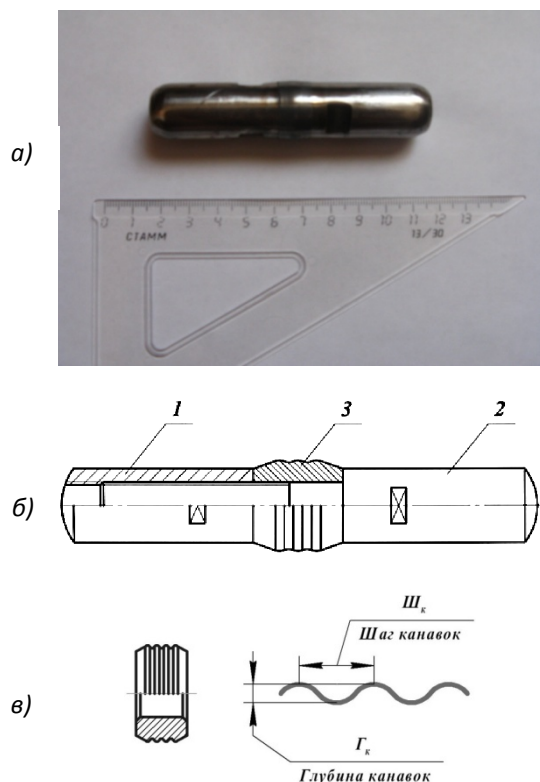


Рис. 1. Сборная деформирующе-выглаживающая прошивка с рабочим PMP профилем элемента:
 а) общий вид (фото) сборной конструкции;
 б) эскиз сборной конструкции (1 – гайка; 2 – оправка; 3 – рабочий элемент прошивки);
 в) рабочий элемент прошивки с PMP профилем.

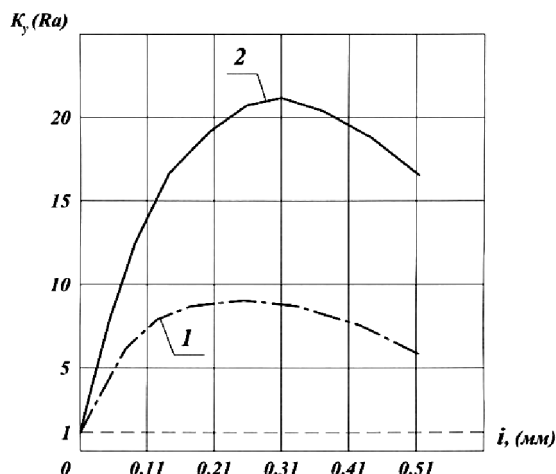


Рис. 2. Зависимость коэффициента уменьшения по параметру шероховатости поверхности от натяга пластического деформирования при прошивании:
 1 – обработка традиционно используемыми деформирующими элементами прошивки, без PMP [3]; 2 – обработка деформирующим элементом с PMP профилем.

- [1] Shchedrin A.V., Bekaev A.A., Skoromnov V.M., Ul'yanov V.V., Egorova Z.I. Improving the use of lubricant and coolant fluids in machining // Russian Engineering Research. New York: Allerton Press, 2006, vol. 26, №10, p.p. 38-39.
 [2] Shchedrin A.V., Bekaev A.A., Ul'yanov V.V., Chikhacheva N.Yu. Efficient hole broaching with regularized surface microgeometry of the deforming elements // Russian Engineering Research. New York: Allerton Press, 2009, vol. 29, №9, p.p. 911-915.
 [3] Шедрин А.В., Кузнецов А.М., Егорова З.И. Повышение эффективности методов комбинированного прошивания отверстий // Машиностроитель. – 1999, №12, с. 36-40.

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Бердичевский Е.Г. (bersev@mail.ru)

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого, Великий Новгород, Россия.

Рассмотрены реологические эффекты, возникающие в граничных смазочных слоях при высокоскоростных технологических процессах. На скоростном трибоконтакте смазочный материал может вести себя как упругопластическое тело Максвелла. Эффективность смазки будет определяться ее временем релаксации. Возможно проявление эффекта Вайсенберга. Возникающие при этом ортогональные напряжения способствуют повышению трибоэффективности процесса. Инновационные смазочные материалы могут включать в себя реомодификаторы трения.

Ключевые слова: реология, граничная смазка, тело Максвелла, высокоскоростные технологии.

Известно, что свойства смазочных жидкостей в граничном слое могут существенно отличаться от их свойств в объеме. Различия затрагивают, в

первую очередь, реологические свойства (вязкость, прочность, упруго-пластичность и т.д.), а через них и трибологические характеристики.

Можно предположить, что различия особо значимы в условиях высокоскоростной упруго-пластической сдвиговой деформации в зоне фрикционного контакта и при наличии высоких локальных давлений. Такие условия реализуются в некоторых технологических процессах обработки материалов, таких как абразивно-алмазное шлифование, ковка, штамповка взрывом, прокатка и т.д.

Смазочные жидкости, которые в обычных условиях являются ньютоновскими средами, в граничном слое при интенсивной сдвиговой деформации могут вести себя как твердопластические вещества (неньютоновские жидкости). Изменение реологического статуса смазочной среды в граничном слое может существенно повлиять на трибологические характеристики технологического процесса.

Теоретический анализ поведения смазочной среды при абразивной обработке и ковке металлов показал, что в граничном слое смазка может приобретать упруговязкие свойства, т.е. трансформироваться в тело Максвелла.

Реологическое уравнение тела Максвелла имеет вид [2]:

$$\gamma = \gamma_0 + \tau \left[\frac{1}{G} + \left(\frac{t-t_0}{\eta} \right) \right], \quad (1)$$

где: τ – касательное напряжение, Па; η – вязкость при сдвиге, Па·с; γ – скорость сдвига, сек^{-1} , G – модуль сдвига второго рода, Па, t – время, сек.

В процессе деформации тела Максвелла изменение во времени при $t_0=0$, $\gamma = \gamma_0$ имеет вид:

$$\tau = \eta \gamma_0 \left[1 - \exp \left(\frac{-Gt}{\eta} \right) \right] \quad (2)$$

Из этого следует, что при $\gamma = \text{const}$ напряжение не остается постоянным и достигает равновесного значения при $t \rightarrow \infty$. При $t \geq t_1$ скорость деформации становится равной нулю, а деформация остается постоянной. В этом случае изменение напряжения во времени равно:

$$\tau = \tau_1 \exp \left(\frac{t-t_1}{T_p} \right), \quad (3)$$

где: $T_p = \frac{\eta}{G}$ – время релаксации, с.

Вышеприведенные уравнения показывают, что при постоянной деформации во времени напряжение во времени уменьшается по экспоненциальному закону. Это явление называется релаксацией напряжений. Время релаксации равно времени, в течение которого начальное напряжение уменьшается в e раз. Из этого можно сделать важнейший вывод: если у смазочной жидкости в граничном слое время релаксации будет больше времени сдвиговой деформации при фрикционном контакте, то смазочный слой будет вести себя как квазитвердое упругое тело со всеми вытекающими последствиями (снижение заедания, задира, изно-

са, коэффициента трения и т.д.).

Время релаксации некоторых сред (по данным [1,4,5] приведены в табл. 1.

Таблица 1. Времена релаксации некоторых сред

Среда	Время релаксации, сек
Воздух	$2 \cdot 10^{-10}$
Вода	$3 \cdot 10^{-6}$
Касторовое масло	$2 \cdot 10^{-3}$
Водный раствор полиоксипропилена, 3%	$30 \cdot 10^{-3}$
Минеральное масло ИС-20 + 5% изобутилена	$800 \cdot 10^{-2}$
Силиконовое масло + 0,5% желатина	$50 \cdot 10^{-2}$

Из таблицы следует, что у некоторых жидкостей время релаксации вполне соизмеримо со временем протекания реальной сдвиговой деформации при типовых режимах абразивно-алмазного шлифования и скоростнойковки.

Если справедливо, что смазочный материал в зоне трения приобретает свойства квазиупругого тела, то следует ожидать проявление эффекта Вайсенберга [3].

Сущность эффекта состоит в том, что при течении упругих жидкостей в условиях простого сдвига возникают не только касательные, но и нормальные напряжения, ортогональные направлению сдвига.

Эффект Вайсенберга характерен для таких неньютоновских жидкостей как масляные или водные растворы полимеров. Эффект экспериментально подтвержден на ротационном вискозиметре в 5-10% растворах поливинилового спирта в воде, в 3%-х растворах полиизобутилена в средневязком минеральном масле ИС-20. Эти среды вполне могут использоваться как основа промышленных смазочных материалов.

Экспериментальная проверка гипотезы о трибологической эффективности смазочных материалов, проявляющих в граничном слое упругие свойства, проводилась на операции плоского шлифования образцов из стали X18H10T. Режимы обработки: скорость резания 35 м/сек; скорость возвратно-поступательного движения стола 11 м/мин; глубина резания – 0,01 мм/дв.; шлифовальный круг ПП250×25×75 14A25СМ1К7. Критериями эффективности смазочных материалов являлись: стойкость круга T (мин); удельная производительность $q = Q_m / Q_k$, где Q_m – объем сошлифованного металла, мм^3 ; Q_k – износ шлифовального круга, мм^3 . Подробно методика испытания изложена в [6].

В качестве смазочных композиций применялись модельные среды на водной и масляной основах. В водные растворы вводился гидрофильный полимер-поливиниловый спирт. В промышленное масло вводились полиизобутилен и канифоль (биологический полимер). Для сравнения испытывались типовые промышленные смазочные материалы: сульфореозол и 5%-я эмульсия «Укринол-1» Результаты испытаний приведены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнительные испытания смазочных полимерсодержащих композиций.

Смазочная композиция	Стойкость круга, T, мин	Удельная производительность	Усилие шлифования P _v , Н	Усилие шлифования, P _z , Н
5%-я эмульсия Укринол-1	16,4	86,3	57	28
3%-й р-р поливинилового спирта в воде	29,2	118,7	52	27
5%-й р-р поливинилового спирта в воде	31,4	126,2	48	29
Касторовое масло	38,8	156,8	49	20
Сульфифрезол	24,1	120,2	53	24
Масло И-12 +2% канифоли	36,5	144,4	51	23
Масло И-12 +2% полиизобутилена	38,7	149,5	47	22
Масло ИС-12 +5% полиизобутилена	40,2	152,2	46	22
Масло ИС-12	19,6	101,8	59	28

Анализ результатов показывает, что применение структурированных полимерных жидкостей, склонных к проявлению реологических эффектов, существенно повышает основные характеристики процесса шлифования. При переходе от типовой эмульсии к 5%-му водному раствору поливинилового спирта стойкость круга возросла почти вдвое,

а удельная производительность – на 16%.

Чистое масло ИС-20 и сульфифрезол показали значительно худшие результаты по T и q . Легирование масла ИС-20 канифолью и полиизобутиленом позволило значительно повысить основные показатели процесса шлифования.

Установленный существенный эффект от использования в качестве смазочных сред реологически активных композиций можно объяснить образованием в зоне фрикционного контакта абразивное зерно-металл упругой, квазитвердой смазочной пленки, предотвращающей затупление абразивных зерен.

В дальнейшем, вероятно, будут разработаны композиции, реологический статус граничных смазочных слоев которых будут описываться более сложными моделями, чем модель Максвелла (модель Бингама, модель Шведова и др.).

[1] Бердичевский Е.Г. Трение и смазка при пластической обработке металлов: монография/ Е.Г. Бердичевский; НовГУ им. Ярослава Мудрого. – Великий Новгород, 2011. – 183 с.

[2] Рейнер М. Реология. – М.: Наука, 1965. – 224 с.

[3] Лодис А. Эластичные жидкости. – М.: Наука, 1960. – 464 с.

[4] Бахрамов, А.Д. и др. Акустические и вязкоупругие свойства полимерзагущенных смазочных масел и модельных систем.// Вестник ЛГУ, серия 7, выпуск 3, № 18, 1987. С. 110 - 118.

[5] Skelland, A.H. P. Non - Newtonian Flow and Heat Transfer. Wiley, New-York, 1967, 469 p.

[6] Худобин, Л.В. Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке/ Л.В. Худобин, Е. Г. Бердичевский. М.: Машиностроение, 1977. 190 с.

ГИБРИДИЗАЦИЯ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ СОВМЕСТНОГО ДЕЙСТВИЯ РАЗНОТИПНЫХ ТРИБОАКТИВНЫХ ПРИСАДОК

¹Березина Е.В., ¹Годлевский В.А. (godl@yandex.ru), ²Марков В.В.

¹Ивановский государственный университет, Иваново, Россия;

²Ивановский государственный энергетический университет, Иваново, Россия.

Рассмотрена проблема совместного применения в составе СОТС для лезвийной обработки металлов поверхностно- и химически-активных присадок. Приведены результаты испытания СОТС, содержащих ПАВ с кислородсодержащими химически-активными присадками. Сформулирована гипотеза об особой структуре граничных смазочных слоев, сформированных двумя трибоактивными компонентами.

Ключевые слова: обработка резанием, СОТС, присадки, ПАВ.

По экологическим причинам применение химически-активных присадок является нежелательным. В качестве одного из способов решить эту проблему было предложено использовать в качестве СОТС раствор ПАВ, дополненный добавкой химически-активного кислородсодержащего соединения – мелкодисперсной неорганической перекиси. На возможность использования использования перекиси водорода в качестве компонента СОТС указывалось и ранее, однако свойство этого соединения быстро распадаться в водных растворах делало это решение сомнительным [1]. Переход от перекиси водорода к более термодинамически устойчивым перекисям металлов давал принципиальную возможность создавать стабильный

технологический состав, выделяющий активный компонент непосредственно в контактной зоне.

Долго проводилась научная дискуссия о механизме смазочного действия внешней среды в процессе обработки металла резанием. Центром этих обсуждений были особенности кинетики проникновения смазочного материала в зону контакта, а также о роли физических и химических процессов при формировании в этом процессе граничного смазочного слоя.

Вопрос о проникновении внешней среды в зону резания получила довольно прозрачное объяснение в рамках микрокапиллярной модели [2]. По причине высокой температуры в зоне контакта инструмента с обрабатываемым материалом сма-

зочный слой формируется главным образом вследствие хемосорбции активных компонентов смазочного материала.

Ряд экспериментальных фактов в рамках этих представлений до настоящего времени были непонятны. Например, почему растворы коллоидных ПАВ обладают смазочным эффектом при резании, а неполярные органические компоненты (например, бензол) – оказываются неэффективными? Почему сурфактанты, имеющие разное пространственное молекулярное строение, но примерно одинаковый элементный состав, столь существенно различаются по трибологической активности? Даже в пределах гомологического ряда ПАВ можно видеть значимые различия в смазочном действии, при этом наблюдается такая зависимость, что при удлинении радикальной цепочки эффективность присадки увеличивается (своеобразное проявление эффекта Траубе) [3].

Тот факт, что ПАВ при резании начинают оказывать антифрикционное действие уже при весьма малой концентрации (в сотые доли процента), свидетельствует о том, что смазочная эффективность этих присадок связана в первую очередь с поверхностными процессами.

Не ясной остается особенность совместного действия ПАВ и химически-активных компонентов. Предполагали, что химически-активные частицы, вводимые в состав СОТС в составе присадок высокого давления (ВД-присадки), должны, в силу большей подвижности частиц, быстрее достигать поверхности и формировать хемосорбционный слой раньше, чем физически адсорбированный слой ПАВ.

Однако в таком случае в СОТС, составленной из активных молекул обоих типов, действие поверхностно-активной присадки было бы незначимо, в то время как опыты показывают, что в композиции эти присадки при резании чаще всего действуют синергически. Имеются данные о том, что органические мезогены, формирующие на поверхности развитые упорядоченные (эпитропные) надмолекулярные структуры (например, соединения гетероциклического типа) являются эффективными в качестве присадок для металлообработки [4].

Отмечается, что смеси двух ПАВ, отличающихся молекулярным строением обладают лучшей трибологической эффективностью, чем каждый из этих компонентов, примененный в отдельности [5]. Это объясняется особенностями поверхностной надмолекулярной структуры.

Ясно, что в процессе формирования смазочного слоя при резании высокомолекулярные компоненты в какой-то мере сохраняют свою молекулярную индивидуальность несмотря на высокую контактную температуру (400...1100°C).

Была выдвинута рабочая гипотеза, заключающаяся в следующем.

- Аномальная температурная устойчивость больших молекул коллоидных ПАВ и других мезогенных амфифилов проявляется в результате их

совместного действия с химически-активными компонентами среды (кислородом воздуха и ВД-присадками).

- В результате процесса, сходного с гипотетическим процессом «трибополимеризации» [13], на поверхности микрокапиллярной полости, разделяющей поверхности резца и стружки, образуется «третье тело», «вторичная структура» – сложного состава смазочная пленка, каркас которой составляют молекулы амфифила.

- Роль химически-активного компонента в формировании такого рода пленки состоит в том, что он: а) химически связывает часть активных центров поверхности; б) образует химические «мостики», связывающие радикальные цепочки амфифила в прочную и термически устойчивую надмолекулярную структуру.

Резонным возражением против существования описываемого процесса явилась бы констатация того, что подобного рода сложной структуре особенно трудно образовываться при высокой температуре, стремящейся увеличить энтропию молекулярной системы. Наряду с тенденцией разупорядочения системы, рост температуры ускоряет термодинамически возможные процессы, быстрее идет диффузия – и эти факторы способствуют более быстрому формированию смазочного слоя, скорейшему его структурному упорядочиванию еще до того, как он будет жестко зафиксирован химическими связями. Как мы уже отмечали, идея композитного, «полимеризованного» смазочного слоя хорошо согласуется с многочисленными экспериментами, которые мы хотим проиллюстрировать нашими опытными данными.

Выполнялись опыты по получистовому течению коррозионноустойчивой стали 12Х18Н10Т резцами с режущей частью из твердого сплава марок ВК8 и Т5К10. Точение производилось при следующих режимах резания: скорость резания $v = 3,2$ м/с, подача $s = 0,13$ мм/об., глубина резания $t = 0,5$ мм. СОТС подавалась в зону резания в виде свободно падающей струи при расходе 500 мл/мин. Геометрия резцов имела следующие параметры: $\gamma = 9^\circ$; $\alpha = 9^\circ$; $\varphi = 90^\circ$; $\varphi_1 = 9^\circ$; $\lambda = 0^\circ$.

Испытания производились на токарном станке, снабженном устройствами для одновременной регистрации нескольких параметров обработки. Измерялись три ортогональные компоненты силы резания, ЭДС естественной термопары и размерный износ инструмента в радиальном направлении (координата y)

Было обнаружено что на протяжении существенного пути резания, в ходе обработки прочного и вязкого материала малая добавка ПАВ значительно снижает силу резания, интенсивность изнашивания инструмента и контактную температуру.

Увеличение концентрации ПАВ свыше минимального значения не дает прироста эффективности. Это еще раз показывает, поверхностную, адсорбционную природу действия этой присадки. Добавление же к раствору ПАВ небольшого количества перекиси приводит к тому, что при дости-

жении концентрации перекиси порядка 0,01...0,1% происходит резкое снижение интенсивности изнашивания инструмента (независимо от концентрации ПАВ).

Качественно схожие с представленными результаты были получены при использовании вместо перекиси водорода твердых мелкодисперсных перекисей MgO_2 , CaO_2 и ZnO .

Таким образом, приведенные экспериментальные данные по совместному использованию в составе СОТС поверхностно- и химически-активных присадок согласуются с приведенной выше рабочей гипотезой, предполагающей особое строение граничного смазочного слоя, сходное со структурой трибополимерных пленок [6]. Результатом является образование гибридного слоя, включающего химически- и поверхностно-активные компоненты раствора

Работа поддержана грантом Минобрнауки РФ в рамках госзадания в сфере научной деятельности (грант № 9.700.2014/К).

[1] Годлевский В.А., Марков В.В. Синергическое взаимодействие поверхностно- и химически-активных компонентов СОТС для резания металлов // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2009. Вып. 1 (27). С. 85 – 90.

[2] Astakhov V.P., Godlevskiy V.A., Joksch S. and others. Metal-working fluids for cutting and grinding: fundamentals and recent advances. Woodhead Publishing Ltd. Cambridge, UK. 2012. 413 p.

[3] Mizuhara K. Experimental evaluation of cutting fluid penetration // Tribologia, 1992. V. 11. № 2. P. 20-29.

[4] Березина Е. В. Производные фталоцианина как присадки к смазочным композициям. Иваново. Изд. "Ивановский гос. ун-т", 2007. 360 с.

[5] Плетнев М.Ю. О природе взаимодействия в растворе смесей неионогенных и анионных поверхностно-активных веществ // Коллоидный журнал, 1987. Т. 49. № 1. С. 184–187.

[6] Заславский Ю.С., Заславский Р.Н. Механизм действия противозносных присадок к маслам. М.: Химия, 1978. 224 с.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО КРИТЕРИЮ АБРАЗИВНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ

¹Бирюков В.П. (laser-52@yandex.ru), ²Татаркин Д.Ю., ²Хриптович Е.В., ¹Фишков А.А.

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия;

²ООО НТО «ИРЭ-Полюс», г. Фрязино, Московской области, Россия.

В работе приведены результаты металлографических исследований и лабораторных сравнительных испытаний на абразивное изнашивание по схеме Бринелля-Хаворта наплавленных порошковых покрытий на никелевой основе и образцов стали 40Х. Показано, что при твердости наплавленных слоев HRC 58 – 61 износостойкость покрытий выше, чем стали 40Х в нормализованном и улучшенном состоянии в 10 и 4,6 раза соответственно.

Ключевые слова: лазерная наплавка, микротвердость, абразивная износостойкость.

Введение

Существующие методы наплавки имеют свои преимущества и недостатки, которые характеризуются конкретными технико-экономическими показателями, определяющими эффективные области их применения. При электродуговой наплавке в условиях гидроабразивного изнашивания следует отдавать предпочтение наплавленным покрытиям карбидными фазами, обладающими большей износостойкостью по сравнению с мартенсито-аустенитными структурами [1]. После электродуговой наплавки припуск на последующую механическую обработку может достигать 2 мм, что увеличивает трудоемкость изготовления изделий. Дуговые методы наплавки обеспечивают пористость покрытия в пределах 15 %. Применение более современных плазменных и газодинамических методов позволяет снизить пористость до 0...10 % [2, 3]. При лазерной наплавке происходит формирование наплавленного слоя с заданными свойствами за счет минимального коэффициента перемешивания наплавленного материала с основой. Припуск на механическую обработку после лазерной наплавки не должен превышать 0,5-0,7 мм. Наплавленный слой не должен содержать дефектов (пор, раковин, трещин) и

иметь хорошую прочность сцепления наплавленного слоя с основой. Возможные способы подачи присадочных материалов в зону лазерной наплавки можно разделить на две основные группы [4]. Это предварительное расположение присадочных материалов на обрабатываемой поверхности и подача непосредственно в зону обработки одновременно с воздействием лазерного излучения. Проведенные исследования покрытий на основе никеля с твердостью 48-54 HRC, полученных лазерной наплавкой с помощью газовых и волоконных лазеров показывают повышение износостойкости при трении скольжения в 2 раза по сравнению со сталью 38ХНЗМА [5,6].

Целью настоящей работы было увеличение коэффициента использования присадочного порошкового материала и оптимизация режимов лазерной наплавки для повышения абразивной износостойкости, наплавленных покрытий.

Материалы и методы исследований

Для экспериментов использовали универсальное оборудование ООО НТО «ИРЭ-Полюс» содержащее волоконный лазер ЛС – 5, робот КУ-КА, оптическую головку фирмы PRECITEC, технологический стол. В качестве наплавочных материалов были выбраны порошки на никелевой ос-

нове фирмы Хёгенас, Швеция и ОАО «ПОЛЕМА», г. Тула. Размер частиц порошка составлял 40 – 150 мкм. Мощность излучения варьировалась в пределах 1800 – 3800 Вт. Скорость перемещения оптической головки составляла 0,5 – 2 м/с в поперечном направлении и 1-15 мм/с, в продольном направлении. Лазерную наплавку предварительно насыпанного порошка с толщиной слоя 3 – 5 мм производили на стальные плиты с размерами 140 x 140 x 20 мм. Образцы вырезали электроискровым методом размерами 25 x 70 x 20мм. Металлографические исследования выполняли на микротвердомере ПМТ-3, металлографическом микроскопе Альтами МЕТ-1С. Испытание на абразивное изнашивание проводили на машине трения БХ-4 по модернизированной в ИМАШ РАН схеме Бринелля – Хаворта [7].

Результаты и их обсуждение

Для отработки технологических режимов применяли порошок фирмы Хёгенас (заявленная твердость HRC 58) с различной толщиной насыпанного слоя 3 - 5 мм. Получены наплавленные слои толщиной 3 - 4,3 мм и шириной 20 - 30 мм за один проход. На рис. 1 представлен микрошлиф единичной наплавленной дорожки. При варьировании мощностью излучения, скоростью перемещения и диаметром лазерного луча на поверхности порошка выявлены закономерности изменения микротвердости в наплавленном слое. Зона перекрытия наплавленных дорожек показана на рис. 2. В ней отсутствуют дефекты типа пор, трещин и раковин, также как и в дорожках наплавки при оптимальных режимах обработки. При изменении режимов наплавки микротвердость в наплавленном слое изменяется в широких пределах 6120 – 12000 МПа. При высокой плотности энергии лазерного луча часть легирующих элементов и углерода выгорает и микротвердость в наплавленном слое понижается, появляются дефекты в виде пор.

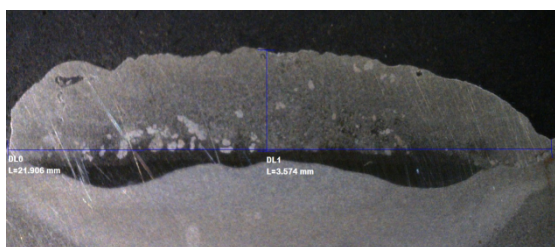


Рис. 1. Микрошлиф наплавленной единичной дорожки за один проход, ×4

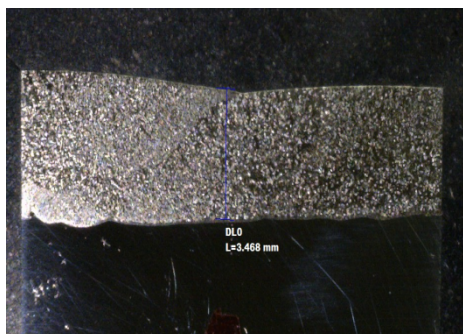


Рис. 2. Микрошлиф зоны перекрытия наплавленных слоев, ×5

При низких значениях плотности энергии лазерного излучения происходит не полное сплавление порошкового материала и снижается микротвердость.

В таблице 1 представлены результаты испытаний на абразивное изнашивание по схеме Бринелля-Хаворта. К вращающемуся резиновому диску прижимался плоский образец с наплавленным покрытием. В зону трения подавался кварцевый песок с размером частиц 200 – 600 мкм. Продолжительность испытаний составляла 10 минут. По результатам испытаний трех образцов определялась средняя величина потери массы наплавленного покрытия на каждом режиме обработки.

В результате проведенных исследований на абразивное изнашивание первой партии образцов найдены оптимальные режимы лазерной наплавки порошковых покрытий. Вторая партия образцов наплавлялась порошками различной твердости и обеих фирм производителей порошковых материалов. На рис.3 представлена зависимость абразивного износа по схеме Бринелля-Хаворта от твердости наплавленного слоя и образцов стали 40Х.К вращающемуся резиновому диску образец прижимался нагрузкой 15Н. Время испытаний составляло 10 минут. В качестве абразива использовали кварцевый песок с размером частиц 0,2- 0,6 мм. Из приведенных данных следует, что наплавленные слои с твердостью HRC 58 – 61 (порошки фирмы Хёгенас-1 и ОАО «ПОЛЕМА» -2) по износостойкости в 10 раз выше, чем нормализованная сталь 40Х (HB180) и в 4,6 раза выше, чем улучшенная сталь 40Х (HB 250 – 270).

Таблица 1. Результаты испытаний на абразивный износ по схеме Бринелля-Хаворта

№ п/п	Марка порошка	Микротвердость, МПа	Потеря массы, Кг · 10 ⁻⁴
1	1360	7180 - 8300	0,071
2	1360	7180 - 10800	0,035
3	1360	6120 – 9180	0,052
4	1360	7040 - 9540	0,048
5	1350	7180 - 8340	0,062

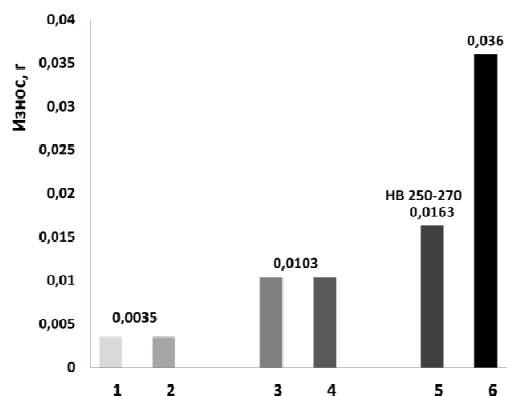


Рис. 3. Зависимость абразивного износа от твердости наплавленного слоя порошковыми материалами и образцов стали 40Х: 1 – Хёгенас HRC 58 – 61; 2 - ОАО «ПОЛЕМА»; 3 – Хёгенас HRC 38 – 41; 4 - ОАО «ПОЛЕМА»; 5 - сталь 40Х HB250-270; 6 – сталь 40Х HB 180

Выводы:

1. Разработана технология лазерной наплавки порошковых материалов на основе никеля с шириной наплавленного слоя 20 – 30 мм и высотой валика 3 – 4,2 мм за один проход.
2. Проведенные испытания на абразивное изнашивание по схеме Бринелля-Хаворта показали повышение износостойкости наплавленных покрытий в 10 раз по сравнению с нормализованной сталью 40Х.

[1] Погодаев Л.И., Ежов Ю.Е. Повышение долговечности рабочих устройств судов технического флота износостойкими наплавками // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2014, №6, 82-87

[2] Гибридные технологии лазерной наплавки / А.М. Забелин,

И.Н. Шиганов, А.М. Чирков и др. – М.: Изд-во МГОУ. – 2007

[3] Borges Bernardo Miguel Fonseca da Costa Alves. Laser Cladding Using Filler Powder and Wire. Productivity and Quality: Diss. ... Degree of Master in Mechanical Engineering. September. – 2008

[4] Григорьянц А.Г., Мисуров А.И. Возможности и перспективы применения лазерной наплавки // Технология машиностроения. – 2005, № 10, 32-56

[5] Бирюков В.П., Дозоров А.В. Лазерные системы для упрочнения, наплавки деталей и точного раскроя листового материала // Проблемы машиностроения и надежности машин. —2006, № 1, 60-66

[6] Бирюков В.П., Лаптева В.Г., Хренникова И.А. и др. Восстановление лазерной наплавкой работоспособности пары трения вал - вкладыш подшипника скольжения // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2013, №5, 1- 95

[7] Хрущов М.М., Бабичев М.М. Абразивное изнашивание. М.: Наука. – 1970.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ

¹Бирюков В.П. (Laser-52@yandex.ru), ²Фишков А.А., ¹Чурляева О.Н.

¹Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия;

²ГУП «Московский метрополитен».

В настоящей работе выполнена лазерная наплавка 16 опытных образцов на режимах, обеспечивающих гарантированное формирование валиков. Обработка результатов выполнена с помощью метода полного факторного эксперимента ПФЭ 2ⁿ с применением специально разработанного программного комплекса. Построены уравнения регрессии, определяющие зависимость геометрии наплавленных валиков от параметров наплавки.

Ключевые слова: лазерная наплавка, оптимизация параметров, полный факторный эксперимент.

Введение.

В настоящее время широкое применение в ремонте, изготовлении и восстановлении деталей машин занимают лазерные технологии. В частности лазерная наплавка в отличие от традиционных методов восстановления рабочих поверхностей трения имеет ряд преимуществ. Это минимальное термическое влияние на материал подложки, снижение остаточных напряжений, минимальное перемешивание наплавленного металла с основным, чем обуславливается четкое регулирование химического состава и механических свойств наплавленного слоя. Однако оборудование и материалы для лазерной обработки имеют высокую стоимость. В этом свете представляет интерес изучение влияния факторов эксперимента (и их комбинаций) мощности, скорости обработки, диаметра пучка, на параметры наплавленного слоя, а так же выявления математических зависимостей, позволяющих без проведения значительного количества натуральных экспериментов с допустимой погрешностью, определить оптимальные параметры технологического процесса наплавки.

Материалы и методы

В экспериментах производилась наплавка плоских образцов размером 100x20x15 мм из стали марки 20. Предварительно образцы были зачищены наждачной бумагой и обезжирены ацетоном

ГОСТ 2768-84. На образцы наносилась обмазка из порошка ФБХ6-2. В качестве связующего вещества использовали водный раствор оксиэтилцеллюлозы из соотношения 1 : 50 по объему. Толщина обмазки 0,9 мм. Образцы сушились в печи при температуре 80°С в течение 30 минут.

Лазерная наплавка производилась на сканере для пространственного управления лазерным лучом с использованием лазерной установки «Комета - М», на режимах, по предварительным экспериментам, обеспечивающих стабильное формирование наплавочного валика. Факторами эксперимента принимались мощность излучения $W=700...1000$ Вт, скорость обработки $V=5...9$ мм/с, диаметр пятна $d=2...3$ мм. В качестве отклика системы принимались высота валика H , мм и его ширина B , мм. Согласно требованиям методики ПФЭ 2ⁿ [1] наплавка производилась при различных комбинациях крайних значений факторов. Эксперименты производились в две серии без сканирования и со сканированием поверхности лазерным лучом с частотой $f=220$ Гц.

Верхние и нижние уровни факторов z_i обозначены как z^+ и z^- соответственно. Получены зависимости кодированных переменных от натуральных, определены центр плана z_0 и диапазон варьирования λ см. табл.1.

Таблица 1. Кодировка переменных

Фактор	z+	z-	z ₀	λ	Зависимость
W, Вт	1000	700	850	150	$x_i=(W-850)/150$
V, мм/с	9	5	7	2	$x_i=0,5(V-7)$
d, мм	3	2	2,5	0,5	$x_i=(d-2,5)/0,5$

В качестве математической модели принимался алгебраический полином вида:

$$y = b_0 + b_1x_1 + \dots + b_kx_k + b_{1,2}x_1x_2 \dots + b_{k-1,k}x_{k-1}x_k \quad (1)$$

Резка и приготовление шлифов производилось на оборудовании «Полилаб». Измерения геометрических параметров полученных валиков производилось на металлографическом микроскопе Olympus GX-51. На каждом образце делалось по три реза, таким образом каждый параметр измерялся трижды на одном валике.

Результаты и обсуждение

На основании полученных данных были построены матрицы планирования для ширины и высоты валиков. Для обработки полученных данных с помощью интегрированной среды «Borland C++ 4.5» разработана программа для ЭВМ (платформа IBM PC), позволяющая вычислять коэффициенты уравнений регрессии и выполнять проверку значимости коэффициентов по критерию Стьюдента и адекватности математической модели по критерию Фишера. Полученные коэффициенты уравнений регрессии представлены в табл.2.

Таблица 2. Коэффициенты регрессии

отклик	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₁₂	b ₁₃	b ₂₃	b ₁₂₃
H	0,908	0,138	-0,228	0,066	-0,023	0,046	00038	-
H _{скан}	0,917	0,035	-	-0,020	0,035	0,017	-0,07	-0,027
B	1,712	0,185	-0,217	-0,107	-0,040	-	0,027	-0,04
B _{скан}	3,170	0,540	-0,255	-0,065	0,200	0,155	-0,100	-

Значения вычеркнутых коэффициентов приняты равными нулю, поскольку они незначимы по критерию Стьюдента. Расчеты проводились для степеней свободы $k_1=1$ $k_2=16$ и уровня значимости $\alpha=0,05$.

Анализ полученных уравнений показывает, что на высоту наплавленного валика наиболее существенное влияние оказывают мощность излучения и скорость обработки, причем для варианта без сканирования с увеличением мощности высота валика растет быстрее, чем со сканированием. Зависимость между мощностью излучения и высотой валика прямая, между скоростью и высотой – обратная. Влияние комбинированных факторов незначительное.

Ширина наплавленного валика находится в прямой зависимости от мощности излучения и в

обратной от скорости, причем в варианте со сканированием ширина при увеличении мощности растет значительно быстрее, чем без сканирования. Кроме того, при высокой мощности, вне зависимости от скорости и диаметра пучка, наблюдается стабильное подплавление материала подложки более 200 мкм, что является дефектом, а при малой мощности и высокой скорости – поры и несплавления с основным металлом.

Влияние на геометрию валиков диаметра пучка невелико, вероятнее всего, из-за малого диапазона варьирования λ. В этой связи все комбинированные факторы, в которых присутствует диаметр пучка, так же оказывают незначительное влияние на отклики системы.

Комбинация факторов мощности и скорости оказывает обратное влияние на высоту и ширину валиков без сканирования и прямое со сканированием, причем прямое влияние превосходит обратное, особенно для ширины валика.

В целом наиболее приемлемым для применения в производстве является вариант обработки со сканированием, поскольку при нем исключается сильное прямое влияние мощности на высоту валика. При высоких мощностях высота без сканирования растет быстро и поперечное сечение его приобретает каплевидную форму, что затрудняет или исключает качественное сплавление его с соседними валиками.

Выводы

С помощью математического метода полного факторного эксперимента ПФЭ 2ⁿ и разработанного компьютерного алгоритма по исходным экспериментальным данным (крайние значения факторов) получены математические модели изменения геометрии наплавленных валиков в зависимости от трех факторов эксперимента: мощности W, Вт, скорости обработки V, мм/с, диаметра пучка d, мм, а так же их комбинаций. Установлены степени и характер влияния на геометрию валиков каждого из факторов эксперимента. Показано, что наиболее оптимальным является применение сканирования луча при обработке материалов. Показано, что математическое моделирование позволяет сократить количество натуральных экспериментов, следовательно затраты времени на измерения и средства на материалы. Выявлены наиболее оптимальные режимы лазерной наплавки, позволяющие получить валик оптимальной формы, а так же исключить дефекты наплавленного слоя.

[1] Соколовская И.Ю. Полный факторный эксперимент // Методические указания для самостоятельной работы студентов. – Новосибирск: НГАВТ, 2010. – 36 с.

КОМПОЗИЦИОННОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕРИАЛОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

Бледнова Ж.М. (blednova@mail.ru), Русинов П.О., Балаев Э.Ю.

Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия,

Предложена многофункциональная поверхностная композиция триботехнического назначения «сталь 45–Ni–TiNiZr–сBNCo», сформированная в условиях комплексных высокоэнергетических воздействий, каждый слой которой имеет свое функциональное назначение. Экспериментально установлено, что после полного цикла формирования поверхностной композиции предел выносливости образцов повышается на 32,1 %, достигая значения 36,8 МПа, износостойкость увеличивается в 5,8 раза.

Ключевые слова: поверхностная композиция, эффект памяти формы, структура, функционально-механические свойства.

Введение.

Наиболее перспективными методами повышения эксплуатационных свойств изделий, работающих в сложных условиях трения, циклического нагружения и воздействия активных сред, является композиционное конструирование, позволяющее создать поверхностные слои с прогнозируемым составом, структурой и необходимым градиентом свойств [1]. Среди материалов, обладающих уникальным сочетанием прочности, термо-, износо-, эрозионно-, коррозионностойкости и адаптивности к условиям эксплуатации особое место занимают сплавы с эффектом памяти формы (ЭПФ) на основе никелида титана, характеризующиеся как «трибофеномен» [2]. Эффективность использования материалов с ЭПФ значительно повышается при формировании многослойных поверхностных композиций комплексными высокоэнергетическими методами, при использовании которых реализуются синергетические эффекты, достигаемые только при совмещении различных методов обработки. Формирование слоистых поверхностных композиций в условиях высокоэнергетических воздействий с использованием материалов с ЭПФ, позволяет создать многофункциональные наноструктурированные поверхностные слои с заданным комплексом функциональных и механических свойств [3].

Целью настоящей работы является формирование и исследование эксплуатационных свойств многослойной поверхностной наноструктурной композиции триботехнического назначения «сталь 45–Ni–TiNiZr–сBNCo», каждый слой которой имеет свое функциональное назначение.

Материалы и методы исследований.

Формирование многослойной поверхностной композиции Ni–Ti₂₇Ni₄₆Zr₂₇–сBNCo₁₀ осуществлялось в условиях комплексных высокоэнергетических воздействий, включающих диспергирование и механоактивацию (МА) наносимых многокомпонентных материалов с ЭПФ, высокоскоростное газопламенное напыление (ВГН) в защитной атмосфере адгезионного слоя Ni ($\delta=100$ мкм), функциональных слоев из материалов с ЭПФ TiNiZr

(пат. РФ № 2583222) $\delta=900\div1000$ мкм и сBNCo ($\delta=450\div500$) мкм, интенсивную ТМО в едином технологическом цикле, на запатентованном оборудовании GLC-720 (пат.РФ № 2535432) (рис. 1.).

Поверхностные слои композиции исследовались с использованием металлографического (JSM–7500F), дюрометрического (Falcon-500), рентгеноструктурного (ДРОН-7М) и спектрального анализом. Для оценки функционально-механических свойств композиции проводились испытания образцов на адгезию (Instron), износ (СМТ-1–2070 с контролем температуры образца в процессе испытания), усталостную прочность (МУИ-6000) и долговечность в условиях циклического нагружения и реверсивного трения (машина испытательная, пат. РФ № 2140066).

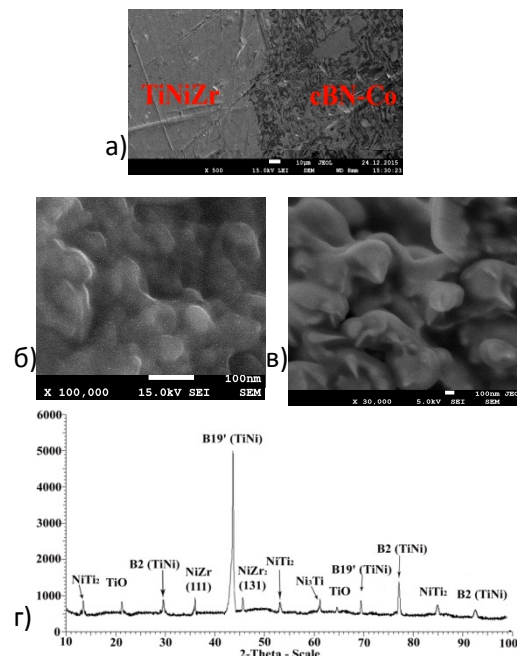


Рис. 1. Микроструктура композитного поверхностного слоя TiNiZr – сBNCo₁₀: а) $\times 500$; б) Ti₂₇Ni₄₆Zr₂₇ $\times 10000$; в) сBNCo₁₀ $\times 30000$; г) дифрактограмма Ti₂₇Ni₄₆Zr₂₇

Результаты и их обсуждение.

Тонкий слой Ni, имеющего неограниченную растворимость с железом обеспечивает надежную

адгезию функционального слоя TiNiZr (рис. 1,а). Микроанализ слоя TiNiZr после ВГН имеет размер зерна 80-120 нм (рис. 1,б), пористость менее 1%, микротвердость $9,5 \div 12,7$ ГПа в аустенитном и $2,1 \div 2,9$ ГПа в мартенситном состоянии. Температуры фазовых превращений слоя $Ti_{27}Ni_{46}Zr_{27}$: $M_f = 459K$; $M_s = 522K$; $A_s = 488K$; $A_f = 571K$ [4]. Приведенная на рис. 1,г дифрактограмма показывает, что слой TiNiZr содержит мартенситные фазы B19', аустенитную B2-фазу, интерметаллидные фазы и менее 2% оксида титана (TiO), т.е. сохраняет свойства материала с ЭПФ.

В качестве износостойкого материала для функционального слоя поверхностной композиции выбран кубический нитрид бора cBN, который, в отличие от других сверхтвердых материалов, не подвергается химическому износу, т.е. химически нейтрален. На основе анализа информации [5] установлено, что связки при содержании Co 10-30% обладают оптимальным комплексом механических свойств и повышенной адгезией к зернам cBN. Учитывая дефицитность кобальта и его химическое сродство с материалом функционального слоя $Ti_{27}Ni_{46}Zr_{27}$, в составе связки использовали 10% Co. ВГН износостойкого слоя cBNCo₁₀ производилось после МА порошка в течение 1,5ч, (рис.1,в.), при которой наблюдалось явление механосинтеза. Адгезионная прочность износостойкого слоя $90 \div 120$ МПа.

Испытания образцов с композитным поверхностным слоем TiNiZr-cBNCo на износ в условиях сухого трения (рис.2) показали повышение износостойкости в 5,8 раза по сравнению с основой. При этом предел выносливости повышается на 32,1 %, достигая значения 368 МПа, обеспечивая повышение эксплуатационных свойств изделий в условиях циклического нагружения, абразивного трения и воздействия активных сред. Микротвердость слоя cBNCo₁₀ изменяется в зависимости от содержания кобальта от $17,2 \div 22,0$ ГПа до $34,6 \div 35,6$ ГПа.

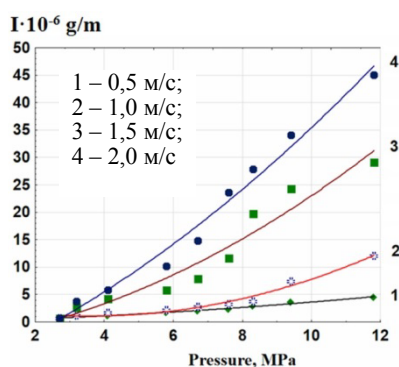


Рис.2. Интенсивность износа композитного поверхностного слоя TiNiZr – cBNCo в зависимости от давления диска при различных скоростях скольжения диска.

Заключение. Предложена архитектура многофункциональной поверхностной композиции,

«сталь–Ni–TiNiZr–cBNCo», каждый слой которой имеет свое функциональное назначение: слой Ni обеспечивает надежную адгезию за счет неограниченной растворимости с железом; функциональный слой TiNiZr, обладающий термоупругими свойствами, обеспечивает демпфирование, релаксацию напряжений и торможение развивающихся трещин, повышение надежности и продление жизненного цикла изделий; слой cBN-Co обеспечивает высокую износостойкость и выполняет защитные функции, являясь химически нейтральным.

Установлено, что в процессе полного цикла обработки, включающего МА, ВГН в защитной атмосфере, интенсивную ТМО, в поверхностном слое $Ti_{27}Ni_{46}Zr_{27}$ формируется наноразмерная структура с размером зерен $80 \div 120$ нм, обеспечивающая увеличение плотности покрытия (пор менее 1%), прочности сцепления с основой ($90-120$ МПа); поверхностный слой cBN-Co имеет ультрамелкокристаллическую структуру. Многослойная композиция «сталь –Ni –TiNiZr –cBN-Co», сформированная в условиях высокоэнергетических воздействий, существенно влияет на функционально-механические и эксплуатационные свойства поверхностных слоев. Экспериментально установлено, что после полного цикла формирования поверхностной композиции «сталь–Ni–TiNiZr–cBN-Co» предел выносливости повышается на 32,1 %, достигая значения 368 МПа, износостойкость увеличивается в 5,8 раза.

Учитывая перспективность материалов с ЭПФ, целесообразно расширять исследования как в области композиционного конструирования поверхностных слоев с использованием материалов с ЭПФ, так и в реализации рациональных технологий их формирования.

Работа выполнена в рамках проектной части государственного задания при финансовой поддержке Минобрнауки по проекту № 9.555.2014/К.

- [1] Бледнова Ж.М., Махутов Н.А. Русинов П.О., Степаненко М.А. Механические и трибологические свойства многофункциональной композиции «основа - материал с эффектом памяти формы», сформированной в условиях высокоэнергетических воздействий // Заводская лаборатория. диагностика материалов — 2015 (81), № 3, 41-49
- [2] Li D.Y. Development of novel tribo-composites with TiNi shape memory alloy matrix // Wear. 2003. V. 255. P. 617–628
- [3] Бледнова Ж.М., Махутов Н.А., Чаевский М.И. Поверхностное модифицирование материалами с эффектом памяти формы — Краснодар: Издательский дом-Юг — 2009.
- [3] Blednova Zh.M, Rusinov P.O. Intellectualization surface layers, working under cyclic loading and reversing friction // Applied Mechanics and Materials — 2015 (798), 440-446
- [4] Rusinov P.O., Blednova Zh.M Structural and technological patterns of formation of surface nanostructured layers TiNiZr by high-speed flame spraying // Advanced Materials and Structural Engineering — 2016 (978), 21-25.
- [5] Логинов П.А., Левашов Е.А., Курбаткина В.В. и др. Разработка режущего инструмента на основе алмазов и кубического нитрида бора с наномодифицированной связкой Cu-Fe-Co-Ni// Тр. межд. науч.-техн. конф.НФМ'2014, С.-Птб, С. 279 – 285.

СИНТЕЗ АНТИЗАДИРНЫХ ПРИСАДОК НА ОСНОВЕ ЭФИРОВ ЖИРНЫХ КИСЛОТ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ И ЖИВОТНЫХ ЖИРОВ

Бодачевский Ю.С. (bodachivskiy@gmail.com), Поп Г.С., Железный Л.В.

¹Институт биоорганической химии и нефтехимии НАН Украины, Киев, Украина.

Разработан способ получения серосодержащих соединений по реакции осернения продуктов этанолиза триглицеридов растительных масел и животных жиров. Доказано строение синтезированных продуктов и перспективность их использования в качестве антизадирных присадок для смазочных материалов.

Ключевые слова: масла, жиры, синтез, антизадирные присадки, смазочные материалы.

Введение

Износ движущихся деталей машин и механизмов, эффективность и продолжительность их работы зависят от нагрузок в узлах трения и качества применяемых в них смазочных материалов (СМ). В целом, СМ – это композиционные системы, содержащие для повышения эксплуатационных характеристик многофункциональные присадки. Особое место в их ряду занимают серосодержащие соединения, не только улучшающие антизадирные свойства СМ, но и обеспечивающие повышенную степень биоразложения по сравнению с фосфор- и хлорсодержащими аналогами [1].

Основным сырьевым источником для изготовления серосодержащих антизадирных присадок являются продукты нефтехимии, а осерняющими агентами служат токсически и экологически опасные сероводород или дитиохлорид. Кроме использования невозобновляемого и небезопасного сырья существующие технологии производства серосодержащих присадок характеризуются жесткими условиями протекания реакций и сопровождаются отдельными стадиями утилизации побочных продуктов [2].

Исходя из этого, целью предлагаемого исследования является разработка метода синтеза серосодержащих присадок на основе экологически безопасных растительных масел и животных жиров, установление их строения и разработка смазочных материалов с высокими трибологическими характеристиками.

Материалы и методы

Для решения поставленной задачи разработан двухстадийный метод переработки триглицеридов масел и жиров путем их этанолиза с последующим сульфурованием элементной серой полученных этиловых эфиров жирных кислот (ЭЭЖК). В качестве растительных масел использовали рапсовое, подсолнечное и горчичное, а жиров – куриный жир.

Трансэтерификацию триглицеридов проводили безводным этанолом в присутствии каталитических количеств гидроксидов щелочных металлов при соотношении масло/спирт – 1/4,5 и температуре 40 °С на протяжении 40 мин. После отделения глицеринового слоя к ЭЭЖК добавляли элементную серу, реакционную смесь нагревали до 160-165 °С и выдерживали при этой температуре в течение 30-60 мин. В результате, практически

с количественными выходами, получали серосодержащие ЭЭЖК с массовым содержанием серы 5-45 %.

Строение и структура синтезированных продуктов доказана элементным анализом и анализом йодных чисел, ИК-, ЯМР-спектроскопией и дифференциальной сканирующей калориметрией (ДСК). Свойства литиевых смазок исследовали стандартизованными методами: антиокислительную стабильность – по ГОСТ 5734, трибологические характеристики – по ГОСТ 9490, антикоррозионные свойства – по ГОСТ 9.080.

Результаты и их обсуждения

В процессе синтеза установлено, что реакционная способность ЭЭЖК напрямую зависит от количества двойных связей. Например, продолжительность осернения эфиров подсолнечного масла, содержащего большое количество полиненасыщенных кислот, составляет 30 мин, а эфиров куриного жира с преобладанием мононенасыщенных и насыщенных кислот – 50 мин. Результаты ИК- и ЯМР-спектроскопии свидетельствуют, что кроме основной реакции присоединения серы по двойным связям происходит замещение водорода метиленовых групп возле ненасыщенных центров, а также межмолекулярная и внутримолекулярная циклизация с образованием гетероциклических соединений. Кроме того, при массовом содержании серы ≥ 20 % часть продукта находится в олигомерном состоянии, что отчетливо регистрируется на кривых ДСК.

Исследования свойств литиевых смазок, содержащих синтезированные продукты в количестве 2,5 %, показали, что все образцы владеют превосходными антиокислительными свойствами – кислотные числа после выдерживания при 120 °С на протяжении 10 часов практически не изменяются. С другой стороны, установлено, что, независимо от концентрации серы в присадке и происхождения исходных реагентов, все образцы проявляют защитные свойства поверхности стали ШХ-15. По отношению к цветным металлам эта закономерность сохраняется только для продуктов с содержанием серы до 15 %. При дальнейшем увеличении ее концентрации наблюдается потемнение медных пластинок и необходимость дополнительного введения в состав смазок ингибиторов коррозии.

Таблица 1. Трибологические характеристики литневых смазок с серосодержащими ЭЭЖК

№ образца	Масло или жир	Массовое содержание серы, %	P_c , Н
1	—	—	1568
2	Рапсовое	10,0	2195
3	Подсолнечное	10,0	2195
4	Горчичное	10,0	2195
5	Куриный	10,0	2323
6	Куриный	20,0	2607

Результаты исследований трибологических характеристик смазок, приведенные в таблице, демонстрируют увеличение нагрузки срабатывания (P_c) по отношению к базовой смазке (образец 1). Наблюдается прямое влияние степени насыщенности исходных эфиров на P_c . Например, для сульфурированных производных куриного жира (образцы 5,6), йодное число ЭЭЖК которых составляет около 85 г $I_2/100$ г продукта, P_c на ступень выше, чем для эфиров на основе растительных масел (образцы 2-4) с йодными числами около 100 г $I_2/100$ г продукта. Установлено также, что неза-

висимо от происхождения эфиров с увеличением серы P_c повышается.

Выводы

1. Разработан метод синтеза серосодержащих ЭЭЖК растительных масел и птичьего жира.

2. Методами физико-химического и инструментального анализа доказано строение полученных веществ.

3. Показано, что серосодержащие ЭЭЖК проявляют в пластичных смазках высокие антиокислительные и антизадирные свойства, ингибируют коррозию стали и не вызывают коррозии меди при массовом содержании серы до 15 %.

4. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования ЭЭЖК растительных масел и жиров в качестве эффективных полифункциональных присадок к СМ различного назначения.

[1] Rudnick L.: Lubricant Additives Chemistry and Application. – New York: CRC Press. – 2010.

[2] Bodachivskiy Yu.S., Pop G.S. Synthesis and structure of sulfurized additives for lubricants // Катализ и нефтехимия – 2014, № 23, 27-35.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗНОСА СТАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПОСТОРОННИХ ПРЕДМЕТОВ (ДЕБРИСА) В СВИНЦОВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К УСЛОВИЯМ КОНТУРОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

Бокова Т.А., Боков П.А., Зудин А.Д. (artemzudin@gmail.com), Приказчиков Г.С.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева, Нижний Новгород, Россия.

В работе отражены результаты исследований условий и характеристик износа оксидированных стальных контактных поверхностей под воздействием дебриса, содержащегося в потоке свинцового и свинец-висмутного теплоносителей. На первом этапе исследовались узлы с принудительным механическим перемещением одной контактной поверхности относительно другой с использованием электрических или ручных приводов. На последующих этапах предполагается продолжить исследования с имитаторами тепловыделяющих элементов за счет вибраций под воздействием потока теплоносителя.

Ключевые слова: ядерный реактор, свинцовый, свинец-висмутный теплоносители, посторонние предметы (дебрис), износ, тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ), тепловыделяющие сборки (ТВС), активная зона, фильтр.

Введение

Анализ результатов многочисленных исследований негерметичных тепловыделяющих сборок реакторных установок с водяным теплоносителем (ТВС кассет) различных конструкций показал, что причиной преждевременного входа из строя в более чем половине случаев явилось взаимодействие оболочек ТВЭЛ с присутствующими в теплоносителе посторонними предметами (дебрисом) [1]. Одним из способов уменьшения числа отказов ТВС по причине повреждения оболочек ТВЭЛ дебрисом является установка специальных устройств - антидебрисных фильтров, предотвращающих попадание посторонних частиц определенной геометрии в ТВС при эксплуатации.

Залповый заброс дебрисов на основе оксидов теплоносителя произошел на входе в активную зону одного из реакторов первой опытной советской атомной подводной лодки (АПЛ проекта 645) с охлаждением реактора эвтектическим сплавом свинец-висмут [2]. В результате этой тяжелой аварии активная зона реактора была разрушена, а АПЛ была выведена из состава ВМФ.

Для избежания аналогичных аварий с негативными последствиями в контурах с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями (ТЖМТ) - эвтектикой свинец-висмут и свинцом - в СССР была создана и отработана технология очистки контуров этих теплоносителей от дебрисов на основе оксидов теплоносителя и продуктов коррозии

конструкционных материалов, представляющих дисперсную коллоидную систему или другую систему с частицами, пропитанными теплоносителем.

Цель работы

Целью работы являлось исследование условий и характеристик износа оксидированных стальных контактных поверхностей под воздействием посторонних предметов (дебриса), содержащегося в потоке свинцового и свинец-висмутного теплоносителей, протекающего между контактными поверхностями. На первом этапе, отраженном ниже, исследовались узлы с принудительным механическим перемещением одной контактной поверхности относительно другой с использованием электрических или ручных приводов. На последующих этапах предполагается продолжить исследования с имитаторами тепловыделяющих элементов за счет вибраций под воздействием потока свинцового и свинец-висмутного теплоносителей.

Методика эксперимента

Экспериментальный участок был выполнен в виде модели, включающей привод стержня поглотителя СУЗ диаметром 8 мм, расположенном в чехле внутренним диаметром 10 мм. Через зазор между оболочкой и чехлом организован поток свинцового теплоносителя со среднерасходной скоростью 1,16-1,2 м/с, при температуре $T=475\div 480$ °С, при содержании термодинамически активного кислорода $a=10^{-2}$. Относительная скорость перемещения контактных поверхностей 4 м/с, ход относительного перемещения поверхностей составлял 0,11 м. Общее число ходов в процессе эксперимента 800.

Экспериментальный участок устанавливался в циркуляционном стенде ФТ-5 НГТУ с высокотемпературным свинцовым теплоносителем, с механическим фильтром очистки теплоносителя.

Результаты и их обсуждение

Результаты эксперимента показали следующее. До экспериментов на поверхности стержня не было выявлено следов износа, царапин, посторонних включений, исходное значение шероховатости составило $Ra=0,812$ мкм, $Rz=5,034$ мкм. До экспериментов внутренняя поверхность трубки $\varnothing 14 \times 2,0$ мм царапин и посторонних включений не имела, значения шероховатости поверхности составляли $Ra=1,624$ мкм, $Rz=7,997$ мкм.

После экспериментов на стержне были обнаружены оксидные покрытия черного цвета с локальными отложениями частиц примесей черного и темно красного цвета. Зафиксирован износ поверхности с одной стороны стержня с разрушением оксидных покрытий и смачиванием поверхности свинцом (рис. 1).

На поверхности стержня отмечаются продольные борозды по всей длине стержня (110 мм) шириной ок. 2,0 мм. На диаметрально противоположной стороне поверхности стержня визуальными фиксируются следы износа поверхности без разрушения оксидного покрытия и смачивания поверхности свинцом. Шероховатости поверхности

стержня после эксперимента составила $Ra=2,18$ мкм, $Rz=11,05$ мкм.



Рис. 1. Износ поверхности с одной стороны стержня с разрушением оксидных покрытий и смачиванием поверхности свинцом

После эксперимента на внутренней поверхности чехла зафиксированы продольные царапины с вкраплениями частиц твердой фазы в углубления царапин, а также участками локального смачивания поверхности свинцом (рис. 2). Шероховатость поверхности увеличилась до $Ra=2,131$ мкм, $Rz=9,775$ мкм.

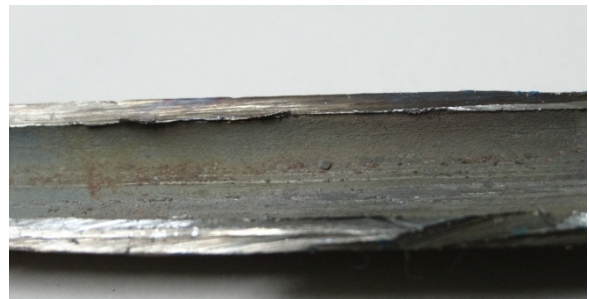


Рис. 2. Состояние поверхности оболочки после проведенных исследований в зоне износа

В процессе эксперимента вплоть до 750 циклов возвратно-поступательного перемещения стержня-имитатора СУЗ фиксировалось монотонное увеличение силы трения (рис. 3) от 0,6Н до 1,52Н при перемещении стержня от верхнего положения в нижнее и от 1,96Н до 2,72Н при перемещении стержня из нижнего положения в верхнее [3].

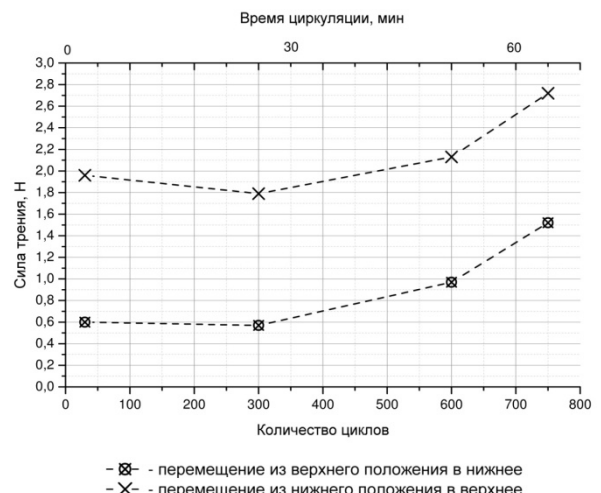


Рис. 3. Изменение значения силы трения

Заключение

Опыт эксплуатации контуров со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями при $T=350\div 550$ °С показывает отсутствие следов износа поверхностей трубопроводов (V до 3м/с), внутренних стенок корпуса (V до 1,0м/с), лопастных систем насосов и сопловых устройств (V до 15м/с) под действием дебриса в потоках ТЖМТ. Наряду с этим, регулярно фиксируются следы износа воздействием дебриса контактных поверхностей с потоками свинцового и свинец-висмутового теплоносителей в зазорах между контактными поверхностями.

Наиболее потенциально опасным является износ контактных поверхностей под воздействием вибраций в потоке ТЖМТ, содержащим дебрис, оболочек твэлов ТВС активной зоны реактора т трубок трубной системы парогенераторов. Вероятно, целесообразна установка дебрисных фильт-

ров на входе в ТВС активной зоны реакторных контуров с ТЖМТ, аналогично установке таких фильтров в реакторах типа ВВЭР, или установка единого дебрисного фильтра на входе в активную зону, перегружаемую в сборе.

[1] О результатах испытаний антидебрисных фильтров для тепловыделяющих сборок реакторов ВВЭР-440/В.А. Гашенко, В.С. Курсков, О.Н. Абакумова, В.Д. Локтионов; Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. - 2005. - №3. - С. 98-103.

[2] Анализ опыта эксплуатации реакторных установок с теплоносителем свинец-висмут и имевших место аварий/Тошинский Г.И., Степанов В.С., Никитин Л.Б. [и др]; Труды конференции «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях», ТЖМТ-98, г. Обнинск, 1999 г., т. 1, стр. 63-69.

[3] Махов, К.А. Исследование структуры и триботехнических характеристик пристенного слоя в потоке тжмт применительно к элементам контуров с реакторами на быстрых нейтронах, охлаждаемых тжмт: дис. ... канд. тех. наук / К.А. Махов. – Н.Новгород: НГТУ, 2016. – 164с.

ЗАВИСИМОСТЬ СМАЗОЧНЫХ СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ МАСЕЛ ОТ СОСТАВА ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЫ

¹Болотов А.Н. (alnikbltov@rambler.ru), Новикова О.О., Новиков В.В.

¹Тверской государственной технической университет, Тверь, Россия.

Исследованы триботехнические свойства и функциональные особенности наноструктурных магнитных масел, при средних и высоких контактных давлениях, содержащих различные дисперсионные среды. Показано, что смазочные свойства магнитного масла и дисперсионной среды коррелируют, дисперсионная среда оказывает влияние на фрикционные характеристики через структурную стабильность магнитного масла.

Ключевые слова: трение, смазка, магнитное масло, дисперсионная среда.

Одним из перспективных способов повышения эффективности эксплуатации наукоемкого оборудования, является использование магнито-пассивных узлов трения с применением в качестве смазывающего материала наноструктурного магнитного масла [1 - 5]. При этом, необходимо учитывать, что его стоимость из-за сложности и трудоемкости процесса синтеза примерно на два порядка превышает стоимость традиционных масел. Так как, для смазки специальных узлов трения, в которых они используются в течении нескольких лет, требуется несколько кубических сантиметров магнитного масла, необходимо соблюдать жесткие требования к их смазочным свойствам, структурной стабильности и испаряемости и др.

Среди всех компонентов магнитного масла, определяющих его физико-химические и триботехнические свойства, наиболее значительную роль играет дисперсионная среда, содержание которой превышает 80 об.%. Для целенаправленного выбора дисперсионной среды, предназначенной для наноструктурного магнитного масла в зависимости от конкретных условий эксплуатации узла трения, необходимо провести сравнительные испытания триботехнических характеристик смазоч-

ных материалов в широком интервале контактных давлений.

Триботехнические испытания магнитных масел на основе различных дисперсионных сред в области средних давлений проводились по схеме трения диск – палец на машине трения МТП при давлении 4,2 МПа и скорости скольжения 0,24 м/с.

Для исследования фрикционных свойств смазочных магнитных материалов при высоких контактных давлениях была использована трехшариковая машина трения МТШ при давлении 1,2 ГПа и скорости скольжения 0,32 м/с.

Результаты триботехнических испытаний: коэффициент трения $f_{тр}$, интенсивность изнашивания $I_{и}$, диаметр пятна износа $d_{и}$ представлены в таблице.

Из приведенных данных видно, что на смазочные свойства дисперсионных сред введение стабилизированных магнитных частиц оказывает различное влияние. Углеводородные масла существенно ухудшают свои смазочные свойства при введении магнитного наполнителя. Это хорошо заметно на примере ММ ВМ-4 (магнитного масла на основе вакуумного масла ВМ-4, далее сокращения наименования магнитных масел и жидкостей аналогичны). Смазочные свойства данного масла оставались низкими во всем исследуемом диапа-

зоне нагрузок несмотря на введение в его состав противоизносных присадок. Особенностью масла ММ И-20А является то, что его свойства качественно изменяются также как масла И-20А в широком нагрузочно-скоростном диапазоне.

Антифрикционные и противоизносные свойства у магнитных масел на основе кремнийорганических жидкостей согласно приведенным данным сравнимы или даже лучше, чем у дисперсионной среды. Более детальное изучение смазочных свойств масел ММ ПЭС-5 и ПЭС-5 в диапазоне нагрузок 2 - 10 МПа, скоростей 0,1 – 0,8 м/с показало существенное преимущество масла ММ ПЭС-5.

Таблица. Триботехнические характеристики магнитных масел.

Смазочный материал	Машина трения МТП		Машина трения МТШ	
	$f_{тр}$	$I_h, 10^{-9}$	$f_{тр}$	$d_n, мм$
И-20А	0,14	1,9	0,08	0,36
ММ И-20А	0,14	4,1	0,16	0,58
ВМ-4	0,10	0,5	0,13	0,42
ММ ВМ-4	0,16	15,4	0,22	0,72
ПЭС-5	0,12	9,1	0,21	0,64
ММ ПЭС-5	0,13	4,5	0,18	0,69
ПЭС-2ВВ	0,14	2,5	0,22	0,58
ММ ПЭС-2ВВ	0,16	2,6	0,19	0,66
ДОС	0,15	0,60	0,17	0,40
ММ ДОС	0,16	0,65	0,17	0,38
ММ ДОС*	0,08	0,48	0,12	0,32
ММ ДОС**	0,08	0,10	-	-
ДБС	0,16	0,63	0,17	0,40
ММ ДБС	0,16	0,66	0,18	0,40
ДОФ	0,18	3,1	0,18	0,54
ММ ДОФ	0,19	3,2	0,22	0,58
ДБФ	0,18	3,4	0,24	0,54
ММ ДБФ	0,36	5,6	-	-
ПОМ	0,10	6,1	0,10	0,48
ММ ПОМ	0,03	0,85	0,08	0,38

* масло содержит присадку ЭО-1;

** материалы пары трения $Al_2O_3 - Al_2O_3$.

Несмотря на то, что молекула магнитных масел на основе олигометил(хлорфенил)силоксане ХС-2-1ВВ, олигометилфторорганосилоксане ФС-56 содержит химически активные группы атомов, смазочные свойства магнитных масел на их основе несущественно отличались от свойств силоксановых масел.

Ближние значения антифрикционных и противоизносных свойств имеют базовые масла и магнитные масла на основе диэфиров карбоновой ки-

слоты. Смазочные свойства магнитных масел на основе диэфиров достаточно высокие, но даже их можно значительно повысить с помощью присадок и наполнителей. Для подтверждения этого в таблице приведены свойства масла ММ ДОС содержащего около 10 об. % фторалифатического амина ЭО-1.

Магнитное масло на основе диэфира ММ ДОС одно из немногих, которое можно эффективно использовать для смазывания высокоскоростных магнитожидкостных подшипников из-за невысокой вязкости и умеренной испаряемости.

Уникальный положительный антифрикционный и противоизносный эффект наблюдается при введении дисперсного магнетита, покрытого сольватной оболочкой с повышенной механической прочностью для предотвращения агломерации, в перфторэфир ПОМ, особенно в области средних нагрузок. Улучшить смазочные свойства фторорганических магнитных масел с помощью присадок не всегда удается из-за плохой растворимости в них поверхностно-активных веществ.

Таким образом, при сравнении триботехнических характеристик внутри группы масел, в широком диапазоне условий трения, можно сделать вывод о том, что смазочные свойства будут тем выше, чем выше эти свойства у дисперсионной среды. В тоже время следует иметь в виду, что дисперсионная среда оказывает влияние на фрикционные характеристики через структурную стабильность магнитного масла.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта № 14-08-97500).

- [1] Болотов А.Н., Новиков В.В. Павлов В.Г. Магнитожидкостные подшипники скольжения // Трение и износ. - Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2004. –Т. 25. № 3.Стр. 286-291.
- [2] Мищак А. Трибологические свойства феррожидкости / Мищак А. // Трение и износ. 2006. Т. 27. № 3. С. 330-336.
- [3] Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Магнитное масло для узлов трения, работающих при граничной смазке // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2011. № 9. - С. 38 - 41.
- [4] Болотов А. Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Трение структурированной магнитной жидкости при скольжении по твердой поверхности // Трение и износ. - 2006. - Т. 27, N 4. - С. 409-416.
- [5] Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О. Расчет и оптимизация постоянных магнитов для специальных подшипниковых опор: монография//Тверь: ТвГУ, 2013. 123 с.

ВЛИЯНИЕ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОВЕДЕНИЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ МИНИМИЗАЦИИ ОБЪЁМА ИСПЫТАНИЙ

¹Большаков А.Н. (bolshakov.and@gmail.com), ¹Буяновский И.А.,
¹Правоторова Е.А., ²Левченко В.А.

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия;

²Химический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

Рассматривается влияние тонких покрытий и различных смазочных сред на поведение автокорреляционной функции при применении теории эквивалентности испытания узла трения для большого количества образцов длительным испытаниям одного образца для

машин трения возвратно-поступательного движения на основании теоремы Биркхова-Хинчина.

Ключевые слова: коэффициент трения, возвратно-поступательное действие, автокорреляционная функция, стационарные, эргодические случайные процессы.

Введение. Методы организации трибологического эксперимента постоянно совершенствуются и в основном связаны со стремлением минимизировать объём экспериментальных исследований на машинах трения. В предлагаемой работе эта цель достигается за счет использования более информативных характеристик случайных трибологических процессов и, прежде всего, корреляционной функции (КФ), которая дает возможность использовать аппарат случайных эргодических процессов вместо традиционной теории планирования эксперимента.

Методика эксперимента и исследуемые материалы. Методика испытаний на машине ВП-1 приведена в работе [1]. Испытания проводили по схеме трения «возвратно-поступательно перемещающаяся пластина – неподвижный ролик». Нагрузка, с которой ролик прижимается к пластине, – 25; 37,5 Н. Частота осцилляций пластины – 1 Гц. Материал пластин – сталь ШХ-15, закаленная и отпущенная до 980 НВ. Поверхность пластины шлифуется и полируется до величины параметра $Ra = 0,05 - 0,07$ мкм. Ролик стандартный диаметром 8 мм. Материал ролика – сталь 100Cr6 (аналог стали ШХ-15). Покрытия толщиной 1,2 – 1,5 мкм нанесены по методике ООО «Монокарбон». В качестве смазочной среды использовали полиальфаолефиновое масло ПАО-4, это же масло с добавлением 1 % олеиной кислоты (по массе), промышленное масло И-20А. Продолжительность каждого испытания – 60 мин. Начальная температура образцов и окружающего их слоя масла – комнатная (22 ± 1 °С).

Теоретический анализ. Как известно, такая трибологическая характеристика фрикционных сопряжений, как коэффициент трения f в общем случае является случайной функцией времени, ход изменения которой регистрируется в процессе испытаний в моменты времени t_1, t_2, \dots, t_m .

Анализ рассматриваемого трибологического процесса показал, что в определенном временном интервале, соответствующем этапу установившегося движения (после окончания приработки и до начала катастрофического изнашивания, которые здесь не рассматриваются) этот случайный процесс в соответствии с указанными критериями является стационарным. Об этом свидетельствует то, что отклонения текущих значений контрольных параметров от средних значений не превышает заданного уровня – 5%.

Для эргодических процессов $x(t)$ справедливы равенства [2]:

$$\begin{aligned} \tilde{x}(t) &= \bar{x}(t); \\ \tilde{x}^2(t) &= D_x(t) + \bar{x}^2; \\ \overline{x(t) \cdot x(t + \tau)} &= \overline{x(t) \cdot x(t + \tau)}, \end{aligned}$$

где « \sim » – символ осреднения по времени, « $\bar{}$ » – символ осреднения по множеству реализаций.

Если КФ стационарного случайного процесса при увеличении t не убывает, а, начиная с некоторого значения t , остается приблизительно постоянной, то это обычно признак того, что процесс не является эргодическим. Стремление же КФ к нулю при $t \rightarrow \infty$ говорит в пользу эргодического процесса. Это утверждение основано на эргодической теореме Биркхофа-Хинчина [3].

Результаты и обсуждение. Результаты испытаний на трение обработаны по описанной выше методике и представлены на рис. 1 в виде зависимостей значений корреляционных функций $K_f(t)$ от продолжительности испытаний. Как и следует из анализа, по мере увеличения продолжительности испытаний величина $K_f(t)$ уменьшается, и при определённой величине t для всех сравниваемых пар трения к нулю. Это свидетельствует о том, что исследуемые зависимости являются эргодическими стационарными процессами.

В то же время, продолжительность достижения нуля для сравниваемых пар трения различается достаточно заметно – от 12 мин для пары сталь-алюмонитрид титана до 24 мин. для пар сталь-сталь при нагрузке 37,5 Н в средах ПАО-4 и И-20А. Причем на характер поведения корреляционной функции влияет так же изменение нагрузки: кривые 1,4 (Рис.1) при сохранении других параметров. Следует отметить, что при испытании пары сталь-сталь (нагрузка 37,5 Н) в средах И-20А и ПАО-4+1 %ОК их корреляционные функции имеют сходный вид, в отличие от испытаний в чистом ПАО-4.

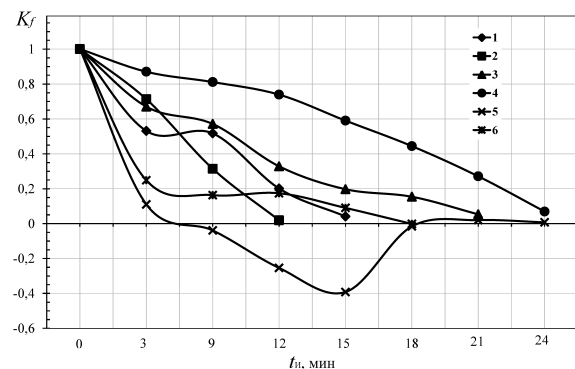


Рис. 1. Зависимости корреляционных функций K_f от времени испытаний пар трения в среде масла ПАО-4: 1 – сталь-сталь, 25 Н; 2 – сталь-покрытие алюмонитридом титана, 25 Н; 3 – сталь-покрытие нитридом карбида кремния, 25 Н; 4 – сталь-сталь, 37,5 Н; в среде масла И-20А: 5 – сталь-сталь, 37,5 Н; в среде масла ПАО-4+1%ОК: 6 – сталь-сталь, 37,5 Н.

Это может быть объяснено достаточно низкими смазочными свойствами чистого полиальфаолефинового масла.

Заключение. Таким образом, рассмотрены трибологические процессы, которые на исследуемом участке временных зависимостей коэффици-

ента трения могут рассматриваться как стационарные и эргодические стохастические.

Установлено, что корреляционные функции этих процессов имеют разный характер поведения в зависимости от типа смазочной среды и от наличия или отсутствия на поверхностях тонких покрытий.

Это позволяет заменить без потери информации испытания большого количества параллельных образцов конструкционных или смазочных материалов и, соответственно, анализ их результатов, на репрезентативную выборку случайного

процесса, проводимого при увеличении количества дискретных точек на временной зависимости исследуемой трибологической характеристики (или ее зависимости от пути трения).

[1] Большаков А.Н., Буяновский И.А., Игнатъева З.В. и др. Лабораторные трибологические испытания тонких углеродных покрытий в смазочных средах //Заводская лаборатория. Диагностика материалов, 2011, т. 77, № 11. – с. 27-31

[2] Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. М.: Академия, 2003. 408 с.

[3] Гнеденко Б.В. Курс теории вероятностей. М.: Едиториал УРСС, 2005. 448 с.

О ВОЗНИКНОВЕНИИ СИСТЕМ ПРИСОЕДИНЕННЫХ ПОТОКОВ В ЗОНЕ КОНТАКТА ТЕЛ КАК ФАКТОРЕ СИНЕРГЕТИКИ

Бородай А.В. (borodai11@yandex.ru)

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Россия.

В развитие положения о возникновении систем присоединенных потоков в зоне трения тел предложена схема совместного действия потоков и диссипативных процессов, в соответствии с которой указанное действие является фактором подвода энергии и обеспечения ресурса самоорганизации систем.

Ключевые слова: присоединенные потоки, петлевые структуры, диссипативные процессы, самоорганизация систем.

Известно предположение о возникновении в зоне фрикционного контакта тел систем интенсивных потоков вещества, осуществляющих движение по замкнутым траекториям и характеризующихся выраженной преобладающей тангенциальной компонентой, – систем присоединенных контактных потоков [1]. Основная, важная составляющая этих потоков сосредоточена в зоне подслоя тел (рис. 1). Принятые обозначения: I – тело; II – контртело; III – поверхность трения; IV – третье тело (излучатель первичного трибоимпульса); p , r – составляющие структуры фрикционной связи; V_t , V_c – соответственно скорости тангенциального движения тела и контртела; J_Σ , $J_{\Sigma x}$ – система излучаемых и отраженных поперечных первичных, J_T , J_u – система присоединенных (тангенциальных) потоков.

Образование потоков J_T , J_u характеризуется периодическим замедлением тангенциального движения взаимодействующих тел, обусловленным передачей энергии этого движения образующимся присоединенным потокам, а затем обратной передачей энергии потоков телам и ускорением движения тел и замедлением потоков. Важными параметрами потоков являются высокая плотность энергии течения потоков, а также зигзагообразность и жесткость их внутренней линейной структуры (рис. 2). Следует отметить многослойность (внутреннее пучковое строение) потоков и наличие в структуре элементарных пучков линейных зон упруго-пластического поглощения импульса.

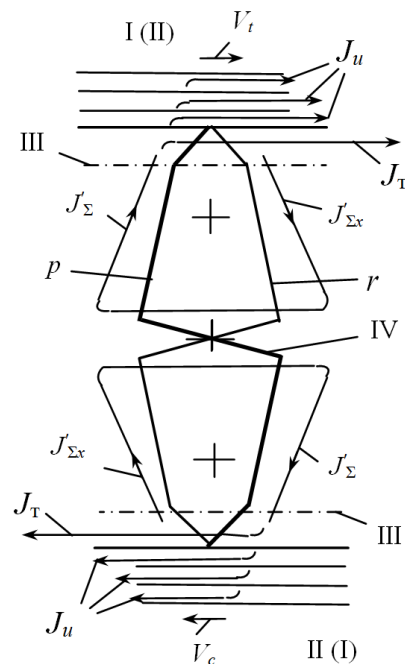


Рис. 1. Упрощенная схема строения трибосистемы и формирования потоков в зоне контакта тел.

В развитие тезиса о присоединенных потоках можно предположить, что физический смысл их возникновения состоит в том, что они являются фактором захвата и подвода энергии внешней среды. В соответствии с приведенными схемами механизм действия потоков и захвата и подвода энергии должен состоять в ударном действии и энергичном проталкивании линейных элементов

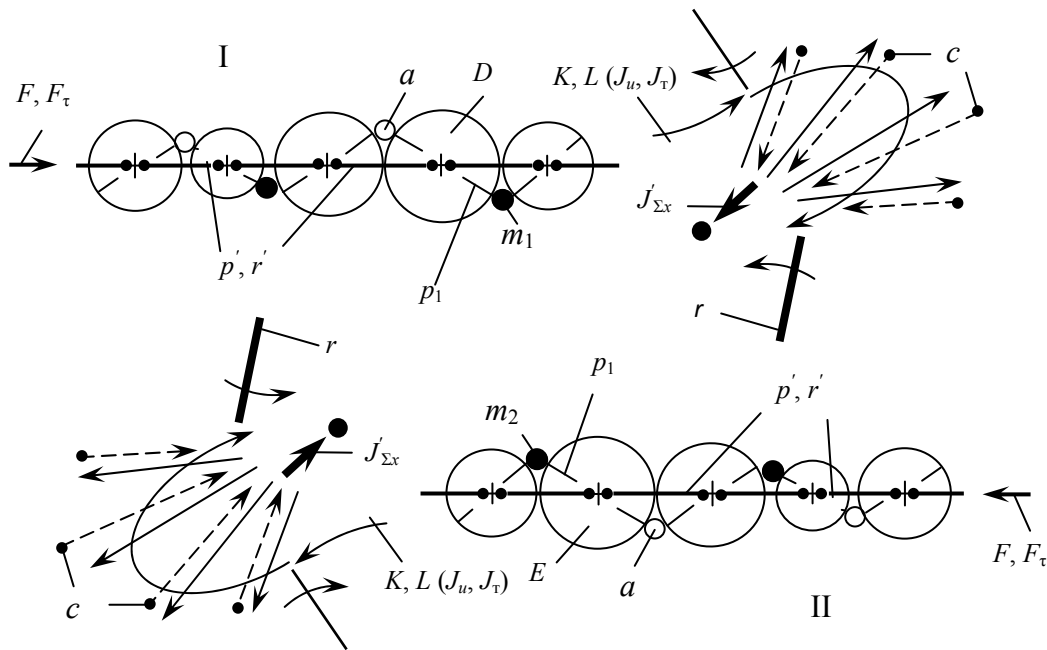


Рис. 2. Структура элементов присоединенных потоков и схема процесса захвата и подвода энергии среды в систему.

структуры потоков в направлении поверхности под некоторым углом к ней и образовании петель волокон (нитями K, L), входящими, в состав пучка, захватывающих некоторый объем пространства, находящегося за пределами поверхностного слоя (рис. 2). Элементами нитей K, L являются: D, E – элементы вихревой структуры потоков; p_1 – элементы их стержневой структуры; p', r' – силовые линии, связывающие нить в единое целое; a – промежуточные частицы; m_1, m_2 – зоны уплотнения (поглощения части энергии импульса J_Σ).

Проталкивание пленок осуществляется под действием тангенциальных движущих сил F и F_τ , развиваемых фрикционной связью. Вследствие цикличности процесса имеет место чередование фаз захвата ресурса и фаз втягивания петлей внутрь поверхностного слоя и преобразования подводимой энергии в энергию тангенциального перемещения тел.

Реализация процессов подвода интенсифицируется благодаря совместному действию присоединенных потоков и диссипативных процессов, процессов излучения и распространения тепла. Источниками диссипации являются температурные вспышки, обусловленные фрикционным взаимодействием, вызывающим возникновение зон интенсивной сосредоточенной поперечной деформации, образующихся в структуре фрикционной связи вследствие действия сил трения. В результате вначале возникают процессы интенсивного теплового (электромагнитного) излучения, нормального поверхности, первоначально характеризующегося узкой направленностью, а затем, напротив,

интенсивным взрывным расширением, диссипацией. Тепловые потоки обозначены на рис. 2 семейством расходящихся прямых, отмеченных стрелками. Физическая сущность процессов диссипации состоит в том, что, являясь расширяющимися процессами, они обеспечивают захват потоками тепла максимально возможного объема, ресурса среды – ее внутренней энергии (c – микрообъемы сосредоточения ресурса среды). Вследствие энергетического барьера, обеспечиваемого образованием петель K, L , процесс теплового излучения сначала резко тормозится, а затем происходит обратное движение, отражение и фокусировка тепловых потоков (штриховые линии), захвативших ресурс, и их втягивание петлями K, L в состав фрикционной связи и тем самым подвод энергии среды в трибосистему [2].

Таким образом, комплекс систем присоединенных потоков и диссипативных процессов является важнейшим элементом трибосистем и фактором обеспечения ресурса непрерывно протекающего процесса естественной самоорганизации.

[1] Бородай А.В. О притяжении поверхностей и возникновении подъемной силы при трении тел // Проблемы синергетики в трибологии, трибоэлектрохимии, материаловедении и мехатронике: материалы Международной конференции, г. Новочеркасск, 17-19 октября 2011 г. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЛИК, 2011. – С. 172-174.

[2] Бородай А.В. О петлевом строении материалов и материальных объектов // Новые материалы и технологии их получения: материалы IX Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 15 октября 2015 г. / Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2015. – С. 78-84.

О РЕАЛИЗАЦИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ФОРМЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ

Бородай А.В. (borodai11@yandex.ru), Скринников Е.В., Васильев Б.Н.

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова

Сформулировано положение, в соответствии с которым комплекс естественных процессов представляет собой совокупность поверхностных состояний (систем замкнутых поперечных волн) различного пространственно-временного уровня. Предлагаемый подход позволяет определить направление и наметить пути решения проблем технического проектирования.

Ключевые слова: поперечный процесс, поверхностное состояние, иерархия естественных систем, техническое проектирование.

Известно, что неизменно важнейшими проблемами технического проектирования являются обеспечение качественно нового уровня эффективности преобразования внутренней энергии в механическую, достижение нового уровня управляемости систем и разработка принципиально новых технологий проектирования и производства систем макроскопического движения. Данные работы [1] показывают, что физическую основу макродвижения составляют поверхностные состояния – поперечные волновые процессы, замкнутые в поверхностном слое (процесс трения тел). Соответственно, эти процессы должны являться предметом всестороннего исследования.

Важнейшей компонентой указанных процессов является процесс многократного циклического последовательного излучения и отражения носителей поперечного волнового трибоимпульса J_b, J_c, J в направлении, нормальном поверхности трения (рис. 1). Причина поперечности трения состоит в том, что именно поперечный процесс обеспечивает возможность захвата, подвода и преобразования энергии внешней среды в энергию тангенциального макроскопического движения, а также реализации процессов фрикционного массопереноса, также поперечных, обеспечивающих формирование и совершенствование структуры систем с одновременным непрерывным повышением эффективности их функционирования (эффект самоорганизации систем).

Рассмотрение вопросов, касающихся поверхностных состояний, показывает, что указанные состояния лежат в основе любых естественных процессов, протекающих на всех пространственно-временных уровнях и, в частности, позволяет заключить, что причиной преимущественной трехмерности пространства является именно поперечность и замкнутость естественных процессов и что координатные направления не могут являться равноправными, поскольку должны обеспечивать направление распространения волны – ось y (V), направление ориентации осей вращения вихрей первичного вихревого поля – ось z (B) и направление действия движущей силы – ось x (E) в естественных системах (рис. 2).

Из приведенного следует, что одним из наиболее настоятельных требований настоящего мо-

мента должна являться необходимость всемерного развития волновых представлений и в перспективе замена классической механики волновой теорией трения-макродвижения.

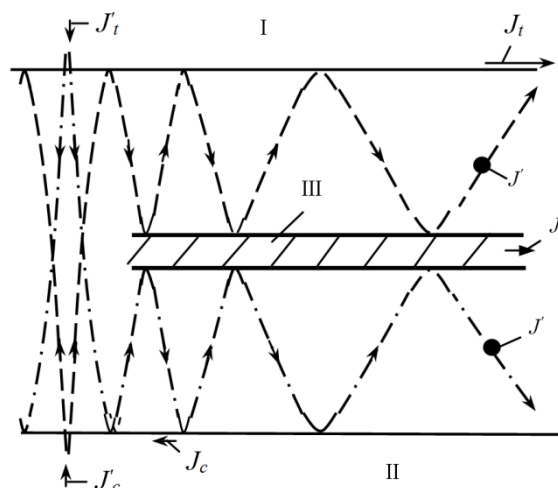


Рис. 1. Принципиальная схема строения и функционирования трибосистемы: I – тело, II – контртело, III – третье тело (излучатель импульса); J_b, J_c, J_3 – тангенциальные импульсы тела, контртела и третьего тела.

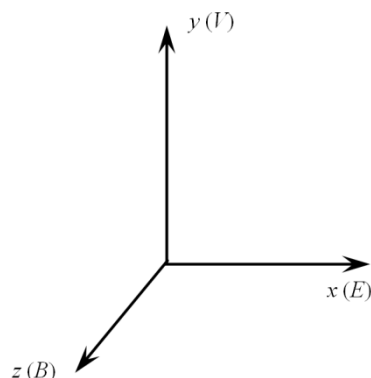


Рис. 2. Схема соответствия направлений осей координат и векторов составляющих поперечного процесса

Приведенное позволяет определить перечень и наметить пути решения наиболее важных научных и технических проблем:

– развития представлений о тождественности процессов макродвижения и трения тел и трении

тел как важнейшем факторе самоорганизации и естественной эволюции;

– формирования представлений о первичной вихревой структуре материальных объектов, сущности понятия связи, в особенности фрикционной;

– развития представлений о физическом и химическом взаимодействии как факторе формирования систем тангенциального движения в средах и системах;

– дальнейшей разработки универсальных физических и комплексных моделей и схем процесса трения и макроскопического движения тел как замкнутого поперечного волнового процесса;

– расширения представлений о механизме смазочного действия веществ, новых разработок в области техники смазки;

– разработки методик получения новых антифрикционных самосмазывающихся и конструкционных материалов нового поколения;

– разработки новых теорий и моделей движения жидких и сыпучих масс и разработки технологических систем их обработки;

– разработки общей теории и раскрытия общих механизмов наноэффекта на основе положений волновой трибомеханохимии;

– раскрытия сущности механизмов плавания и полета, осуществление синтеза объектов высокоскоростного и эффективно управляемого процесса движения;

– раскрытия сущности и разработки моделей мышечного сокращения, определения направлений синтеза аналогов сократительных систем как основы новой энергетики;

– разработки принципиально новых способов и систем движения и новых методов управления движением;

– формирования на основе новых триботехнологий новой системы общественных отношений и новых высокоэффективных техно- и экосферы [2].

Особой проблемой является проблема создания необходимой кадровой базы, являющейся обязательным условием перехода к новым национальным технологиям и новой российской экономике.

Таким образом, настоящий этап развития науки и образования требует:

– пересмотра научной, образовательной и государственной политики в направлении развития национальной триботехники и триботехнологий;

– всемерного внедрения новой волновой теории макродвижения в учебный процесс вузов, подготовки специалистов-трибологов нового поколения;

– открытия кафедр триботехники, факультетов и институтов триботехники и нанотехнологий в университетах и их всемерной государственной поддержки.

[1] Бородай А.В., Турченко Т.Г., Статешная Е.С. О процессе фрикционного взаимодействия тел и сред как замкнутой поперечной волне // Трение и износ. 1993. Т. 14, № 3. С. 498-504.

[2] Бородай А.В. Триботехнологии – будущее России // Проблемы синергетики в трибологии, трибоэлектрохимии, материаловедении и мехатронике: материалы XII Междунар. науч.-практ. конф., г. Новочеркасск, 19 ноября 2013 г. / Юж.-Рос. гос. политехн. ун-т (НПИ) имени М.И. Платова. – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2013. – С. 64-81.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОСТИЖЕНИЙ ТРИБОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Броновец М.А. (brnovets@ipmnet.ru)

Институт проблем механики РАН, Москва, Россия.

В докладе описаны проблемы трибологии в стыковочных устройствах, манипуляторах, приводах, подшипниковых узлах и др. устройствах, агрегатах и узлах космических изделий современной и перспективной космической техники. Показаны пути решения этих проблем, направления разработки материалов для подвижных сопряжений узлов трения, описано создание научной аппаратуры для проведения испытаний на трение и износ в открытом космическом пространстве.

Ключевые слова: трибология, космос, узлы трения, материалы, испытания на орбите.

Введение. Дальнейшее развитие космической техники, новые задачи по обеспечению её функционирования в течение длительных сроков, всё более широкое использование механизмов и агрегатов в негерметичных исполнениях требуют новых подходов и использования достижений трибологии для обеспечения надёжной работы космических изделий. Требуется разработка новых самосмазывающихся материалов, новых покрытий для материалов подвижных сопряжений, обладающих смазывающим действием, в том числе для под-

шипников качения. Особое место занимает проблема испытаний материалов на трение и износ в открытом космосе.

Подшипники качения. Подшипники качения в узлах космической техники используются достаточно широко. Их можно разделить на две основных группы. Подшипники для работы внутри герметичных объёмов и подшипники, работающие в открытом космосе.

Внутри герметичных объёмов подшипники работают в среде атмосферы, близкой к земной

(например, внутри Международной космической станции) или в среде инертных газов (например, в гироскопических устройствах и системах стабилизации космических изделий на орбите).

В открытом космосе подшипники качения используются в электрических двигателях, редукторах, в т.ч. в волновых передачах, манипуляторах, научной аппаратуре.

Особенность использования подшипников качения в вентиляторах внутри Международной космической станции состоит в том, что они, включённые в работу один раз, работают непрерывно до тех пор, пока не исчерпают свой ресурс. Этот ресурс значительно ниже срока работы МКС. И вентиляторы по этой причине приходится менять целиком и неоднократно, что является весьма дорогостоящим мероприятием. Кроме того, они создают на станции большой шум, в том числе исходящий от подшипников качения, что при работе космонавтов на станции в течение длительного времени приводит к нарушениям их слухового аппарата.

Одним из основных направлений повышения ресурса работы подшипников качения является нанесение твёрдых и износостойких покрытий на беговые дорожки подшипников, а также изготовление шариков из керамических материалов, в частности, из нитрида кремния.

Для подшипников, работающих в обычных климатических условиях, перспективны алмазоподобные покрытия, керамические покрытия, покрытия из нитрида сплава циркония и гафния и др.

Для подшипников, работающих в открытом космосе, нужны покрытия, которые включают в свою структуру дисульфид молибдена или другие смазывающие композиции. Оработка их составов

производится с учётом требования по отказу от использования смазочных материалов в подшипниках, т.к. температурный диапазон их применения уже, чем температуры открытого космоса. Так лучшие пластичные смазки работоспособны до низких температур минус 80°C – 90°C, тогда как максимальная нормированная минусовая температура вокруг МКС составляет 125°C.

Подшипники скольжения. Подшипники скольжения в космических изделиях применяются шире, чем подшипники качения. Не имея столь высоких контактных давлений, как в подшипниках качения, они расширяют диапазон возможного применения различных материалов.

Здесь могут применяться и радиационномодифицированный политетрафторэтилен, и покрытия из окислов алюминия, полученные методом микроокисливания, и алмазоподобные покрытия, и поверхностно упрочнённые стали. В некоторых сочетаниях пар трения возможно применение металлофторопластовой ленты.

Выбор сочетаний материалов вала и втулки определяется конструкцией узла трения, условиями его использования и параметрами фрикционно-го взаимодействия.

Смазочные материалы. Требуется разработка новых пластичных смазочных материалов, которые отличаются более широким температурным диапазоном работоспособности, уменьшенными газовыделением и испаряемостью. Последние параметры важны не только с точки зрения сохранения работоспособности самих смазочных материалов, но также по причине осаждения продуктов испарения на оптику приборов и оборудования и таким образом её загрязнения.

ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННЫЙ ВЫБОР ПРИСАДОК К ЖИДКИМ СМАЗОЧНЫМ МАТЕРИАЛАМ ПРИ СМЕШАННОМ И ГРАНИЧНОМ ТРЕНИИ

Булгаревич С.Б. (bulgarevich@rambler.ru), Бойко М.В., Лебединский К.С.

ФГБОУ ВО РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия.

На основе кинетической теории трения предложены общие подходы к выбору смазочного материала для заданных условий трения скольжения. Они проиллюстрированы на примерах узлов трения с антифрикционными адсорбционными пленками на поверхностях трущихся тел, пленками с плакирующими наночастицами металлов и антифрикционными трибополимерными пленками, содержащими комплексные соединения металлов.

Ключевые слова: трение скольжения, коэффициент трения, поперечник шероховатостей, энергия активации, антифрикционные пленки, плакирующие наночастицы металлов.

Эмпирический поиск подходящих присадок к смазочным материалам требует значительных затрат времени и материальных ресурсов. Мы полагаем, что эти затраты могут быть сокращены, если опираться на кинетическую теорию трения скольжения [1, 2].

Коэффициент трения μ , согласно кинетической теории [1, 2], описывается выражением (1)

$$\mu = \frac{\Delta U}{P_{\max} \sigma_{ef}^3}, \quad (1)$$

где ΔU - средний потенциальный барьер, преодолеваемый при проскальзывании одной шероховатости по другой; σ_{ef} - эффективный поперечник взаимодействия шероховатостей тела и контртела; P_{\max} - среднее локальное давление на поверхностях

двух шероховатостей в контакте. Формула (1) имеет наглядный физический смысл. Величина $P_{\max} \sigma_{ef}^2$ соответствует средней силе смятия шероховатостей в контакте под действием локального давления P_{\max} , а величина σ_{ef}^2 примерно равна средней площади непосредственного контакта двух шероховатостей. Если эта сила мало изменяется при деформации шероховатостей, величина $P_{\max} \sigma_{ef}^3$ есть работа по полному смятию шероховатости в поверхность тела или контртела, так как σ_{ef} - примерная высота шероховатости. Отсюда, величина μ есть доля механической энергии, связанная с преодолением потенциального барьера при скольжении, по отношению к механической энергии, которая должна быть затрачена на полное смятие шероховатости. Коэффициенты трения при наличии смазки обычно составляют лишь доли единицы, то затраты механической энергии на преодоление потенциального барьера при скольжении существенно меньше затрат, необходимых для полного смятия.

Выбор антифрикционного материала.

Опираясь на формулу (1) и другие выражения кинетической теории трения, высказаны следующие рекомендации по выбору смазочного материала.

1. Определить или оценить средние поперечники шероховатостей σ_{ef} поверхностей тела и контртела, например, с помощью профилометрии.

2. Определить долю χ номинальной поверхности тела (контртела), входящего в непосредственный контакт, например, методом отпечатка. По этой величине найти величину P_{\max} по формуле

$$P_{\max} = \frac{P_{ном}}{\chi}, \text{ где } P_{ном} - \text{номинальное давление в узле трения,}$$

$$P_{ном} = \frac{N}{S_{ном}}, \text{ } N - \text{величина нагрузки на}$$

узел трения или реакции опоры, $S_{ном}$ - площадь номинального контакта трущихся тел. Величину P_{\max} можно найти по-другому, в частности, по пределам упругости сжатия материалов.

3. Задаться необходимой величиной коэффициента трения μ и найти величину среднего потенциального барьера ΔU проскальзывания шероховатостей по формуле $\Delta U = \mu P_{\max} \sigma_{ef}^3$, вытекающей из формулы (1). Пересчитать её в мольную величину энергии активации по формуле $E_a = \frac{\Delta U}{n_{мол}} N_A$, где

$n_{мол}$ - число пар молекул или атомов, входящих в непосредственный контакт на поверхности двух шероховатостей, N_A - число Авогадро. Величину $n_{мол}$ можно ориентировочно найти по формуле

$$n_{мол} = \frac{\sigma_{ef}^2}{s_0}, \text{ где } s_0 - \text{площадь пятна контакта атома}$$

или адсорбированной молекулы с поверхностью шероховатости. Эти величины известны в литературе.

4. Подобрать присадку или масло, у которых E_a соответствовало бы энергетике физической адсорбции, конформационных превращений, или нижним значениям энергетике химических взаимодействий.

Мы попытались дать оценки коэффициентов трения скольжения при граничном трении и полном эффективном контакте номинальной поверхности трущихся тел через мономолекулярные адсорбционные слои ($\chi = 1$) при нагрузке $P_{\max} = 10^5$ Н/м² и площади контакта 10^{-4} м². Последняя величина будет равна σ_{ef}^2 . Считали, что энергия активации скольжения соответствует энергии активации вязкого перескока молекул. **Касторовое масло.** E_a вязкого перескока $52,4 \cdot 10^3$ Дж/моль [3].

$$\text{Тогда } \Delta u_{мол} = \frac{52,4 \cdot 10^3}{6,02 \cdot 10^{23}} = 8,7 \cdot 10^{-20} \text{ Дж, где } \Delta u_{мол} -$$

энергия активации преодоления контакта двух молекул на теле и контртеле. Касторовое масло есть смесь триглицеридов. Полагали, что адсорбируются глицериновый фрагмент молекул и размер адсорбционного пятна контакта как у глицерина, $s_0 = 31 \cdot 10^{-20}$ м². Отсюда число n молекул ПАВ на 10^{-4} м² поверхности трущихся тел определится как $n = \frac{\sigma_{ef}^2}{s_0} = 3,2 \cdot 10^{14}$ штук. Тогда по формуле (1)

$$\mu \approx 0,0003. \quad \text{Трансформаторное масло.}$$

$$E_a = 28,0 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль [3], } \Delta u_{мол} = 4,65 \cdot 10^{-20} \text{ Дж,}$$

$$\mu \approx 0,0004. \quad \text{Глицерин. } E_a = 68,1 \cdot 10^3 \text{ Дж/моль [3],}$$

$\mu \approx 0,0004$. Найденные величины μ соответствуют наименьшим возможным значениям при безыносном трении, а по существу это гидродинамический режим.

Была оценена энергия активации взаимодействия между адсорбционными слоями некоторых лакирующих смазок. В [4] предложены металлолакирующие присадки из наночастиц Cu, Zn, Ni в вазелиновом масле. Их эффективный размер 20 нм. Они адсорбируются на поверхностях тел и сглаживают шероховатости. Испытания проводились на торцевой машине сталь по стали при нагрузке на палец 0,8 МПа с диаметром 4 мм, величины μ от 0,095 до 0,12 [4]. В оценочных расчетах принимали $\mu = 0,1$ и полагали, что контакт между поверхностями трущихся тел полностью осуществляется через лакирующие частицы. Давление P на трибозазор равно локальному давлению P_{\max} на наночастицы в их непосредственном контакте ($\chi = 1$). Потенциальный барьер скольжения части-

цы тела по частице контртела оценили по формуле (1) при $\sigma_{ef} = 20$ нм.

$$\Delta U = \mu P_{\max} \sigma_{ef}^3 = 0,1 \cdot 0,8 \cdot 10^6 \cdot (20 \cdot 10^{-9})^3 = 6,4 \cdot 10^{-16}$$

Дж. Площадь молекулярного контакта оценивали площадью поперечного сечения группы CH_2 . Энергия активации оказалась равной от 104 до 85,6 кДж/моль. Она превосходит верхнюю границу энергии физической адсорбции и находится в нижней области энергии хемосорбции.

Выбор новых смазочных композиций на основе наночастиц различных переходных металлов. Формирование сервовитных пленок в зоне фрикционного контакта ускоряется как при введении в смазочную среду соединений, выступающих в роли лигандов, так и подходящих хелатных комплексов металлов [5]. Нами брались такие комплексные соединения, чтобы их энергетика адсорбции соответствовала хемосорбции, а размеры получающихся наночастиц были бы порядка 100 нм, при этом μ принимали равным 0,04, что соответствовало будущему практическому применению создаваемого смазочного материала. Номинальное давление равно $P_{\max} = 8 \cdot 10^6$ Па, что соответствовало нагрузке в торцевой машине. Получили оценочную величину энергетики взаимодействия наночастиц никеля антифрикционной смазочной композиции в поверхностных слоях трущихся тел 77 кДж/моль. Площадь пятна контакта $s_0 = 40 \cdot 10^{-20}$ м² адсорбированной молекулы с поверхностью наночастицы соответствовала площади контакта бисглицерата меди. Величина энергии

активации находится почти на верхнем уровне энергии физической адсорбции. Сделанные оценки подтвердились данными эксперимента [5] с предложенными новыми смазочными композициями с комплексами Cu (II) и Ni (II). Оказалось, что образующиеся в процессе трения наночастицы металлов в сервовитной пленке были сферической и эллиптической форм и имели размеры от 60 до 160 нм по данным электронной микроскопии [5].

Предложенный подход введения наночастиц с помощью координационных соединений дает лучшие результаты, чем использование заранее подготовленных наночастиц в вазелиновом масле. Исследование выполнено за счёт гранта Минобрнауки (соглашение № 14.575.21.0095).

[1] Булгаревич, С.Б. Кинетика механоактивации трибохимических процессов / С.Б. Булгаревич, М.В. Бойко, Е.Н. Тарасова, В.А. Фейзова, К.С. Лебединский // Трение и износ. – 2012. – Т. 33. – № 5. – С. 473–485.

[2] Колесников, В.И. Механоактивация при фрикционных взаимодействиях и законы трения скольжения и качения / В.И. Колесников, С.Б. Булгаревич, М.В. Бойко, В.А. Фейзова. // Трение и износ. – 2011. – Т. 32. – № 6. – С. 489–495.

[3] Кошкин, Н.И. Справочник по элементарной физике / Н.И. Кошкин, М.Г. Ширкевич. – М.: Наука, 1972. – 256 с.

[4] Нгуен Хуинь Идентификация триботехнических характеристик наноразмерных металлолакирующих присадок // Автореф. канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону, 2015. – 22 с.

[5] Пономаренко А.Г., Бурлов А.С., Бойко М.В., Ширяева Т.А., Калмыкова А.Г., Зайченко С.Б., Милутка М.С. Исследование трибохимических процессов в смазочных композициях, содержащих координационные соединения переходных металлов // Трение и износ. 2015. Т. 36. № 1. – С. 62–68.

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ФЛУКТУАЦИЯ СИЛЫ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

Булгаревич С.Б. (bulgarevich@rambler.ru), Бойко М.В., Фейзова В.А.

ФГБОУ ВО РГУПС, Ростов-на-Дону, Россия.

На основе статистической теории флуктуации аддитивных физических величин оценена относительная флуктуация силы трения скольжения в стационарном режиме трения. Относительные флуктуации сил трения достаточно большие по сравнению с флуктуациями физических величин, связанных с объемом термодинамических систем.

Ключевые слова: трение скольжения, среднеквадратичное отклонение силы трения, относительная флуктуация силы трения, молекулярная составляющая флуктуации, эффективный поперечник шероховатостей.

Коэффициент трения является все еще плохо обоснованной с фундаментальной точки зрения величиной [1]. Тем не менее, составлены таблицы коэффициентов трения для общего пользования. Эти таблицы могут быть полезны, если условия, используемые для их составления, четко указаны. Нарушение стабильности силы трения, могут быть более важными для проектирования и оптимизации работы машин, чем средние значения коэффициентов трения в таблицах. Отмечают плохую устойчивость, переносимость и осцилляции этих величин различных трибосистем [2]. В литературе отсутствует статистический анализ того, что при

трении контактируют переменное число шероховатостей в трибосистеме и различное число частиц (атомов, молекул) на поверхностях непосредственного трибоконтакта.

Нами поставлена цель оценить относительную статистическую флуктуацию силы трения скольжения при смешанном и граничном трении.

Для простоты полагаем, что режим смешанного трения скольжения является стационарным и усреднения происходят за большой промежуток времени. Относительную флуктуацию ε величины силы трения скольжения \bar{f} по статистике для аддитивных величин [3] запишем как (1):

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{(\overline{\Delta \vec{f}})^2}}{|\vec{f}|}. \quad (1)$$

Здесь \vec{f} - суммарная сила трения скольжения на контактах пар шероховатостей трущихся тел, $\Delta \vec{f}$ - отклонение силы трения в таких контактах, $(\overline{\Delta \vec{f}})^2$ - среднеквадратичное отклонение этой величины. Величина \vec{f} аддитивна по различным парам контактирующих шероховатостей (2):

$$\vec{f} = \sum_i^N \vec{f}_i, \quad (2)$$

где \vec{f}_i - сила трения на i -той паре. Отсюда $(\overline{\Delta \vec{f}})^2$ запишется как (3):

$$\begin{aligned} (\overline{\Delta \vec{f}})^2 &= \overline{\left(\sum_i^N \vec{f}_i - \sum_i^N \vec{f}_i \right)^2} = \overline{\left(\sum_i^N (\vec{f}_i - \vec{f}_i) \right)^2} = \\ &= \sum_i^N (\vec{f}_i - \vec{f}_i)^2 + \sum_{i \neq j}^N (\vec{f}_i - \vec{f}_i)(\vec{f}_j - \vec{f}_j) \end{aligned} \quad (3)$$

Разности величин \vec{f}_i и \vec{f}_j отклоняются от их средних в разные стороны, скалярные произведения скобок в последней сумме в (3) при разных i и j имеют разные знаки, малы по величине и при усреднении обратят последнюю сумму в (3) в ноль, если число шероховатостей достаточно велико. Тогда (3) запишется как (4):

$$(\overline{\Delta \vec{f}})^2 = \sum_i^N (\vec{f}_i - \vec{f}_i)^2. \quad (4)$$

Из (1), (2) и (4), для величины ε имеем (5):

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\sum_i^N (\vec{f}_i - \vec{f}_i)^2}}{\left| \sum_i^N \vec{f}_i \right|}. \quad (5)$$

Не учитывая молекулярную составляющую силы трения, видим, что подкоренное выражение в числителе и знаменатель в (5) пропорциональны среднему числу контактирующих пар \bar{N} (6):

$$\varepsilon_1(\bar{N}) \propto \frac{\sqrt{\bar{N}}}{\bar{N}} = \frac{1}{\sqrt{\bar{N}}}, \quad (6)$$

где $\varepsilon_1(\bar{N})$ - относительная флуктуация, связанная со средним числом пар в контакте. Коэффициенты пропорциональности числителя и знаменателя в (6) можно принять одинаковыми. Известно, что относительная флуктуация числа невзаимодействующих частиц (у нас - контактирующих пар), также дается этой же формулой [3].

Полная оценка относительной флуктуации силы трения должна учесть молекулярную составляющую флуктуации в контакте. Эту флуктуацию в соответствии с теорией ошибок запишем как (7):

$$\varepsilon(\vec{f}) = \varepsilon_1(\bar{N}) + \varepsilon_2(\bar{n}), \quad (7)$$

где $\varepsilon_2(\bar{n})$ - относительная молекулярная флуктуа-

ция силы трения по всему непосредственному контакту. Величину $\varepsilon_2(\bar{n})$ выразим через среднее число \bar{n} парных соседних молекулярных или атомных взаимодействий:

$$\varepsilon_2(\bar{n}) = \frac{1}{\sqrt{\bar{n}}}. \quad (8)$$

Провели простейшие оценки. В первом случае считали, что чистота обработки поверхностей тел одинакова, эффективный поперечник шероховатостей $\sigma_{ef} = 1$ мкм, что соответствует шлифованию, площадь пятна контакта s_0 адсорбированной молекулы ПАВ смазочного материала примем равной $5 \cdot 10^{-20}$ м² (5 \AA^2), что характерно для традиционных ПАВ [4]. Номинальная площадь контакта S между телом и контртелом составляет 1 см². Доля площади непосредственного контакта примерно 10^{-4} от номинальной площади [5]. Среднее число пар \bar{N} шероховатостей в контакте будет 10^4 . Число частиц \bar{n} смазочного материала мономолекулярного слоя на поверхностях всех шероховатостей: $2 \cdot 10^{11}$, полная относительная флуктуация в соответствии с (6) - (8) равна $\varepsilon(\vec{f}) = 10^{-2} + 2,2 \cdot 10^{-4} \approx 10^{-2}$, т.е. 1%. Вклад от молекулярной составляющей в относительную флуктуацию мал, а вклад от числа контактирующих шероховатостей довольно велик. Если сравнить $\varepsilon(\vec{f})$ с относительной флуктуацией объемных термодинамических величин, пропорциональной $1/\sqrt{N}$, где число частиц N , которое может быть порядка числа Авогадро и больше, видно, что объемные термодинамические величины равны своим средним значениям с исключительной точностью в отличие от силы трения. Если величина σ_{ef} будет больше, например, 10 мкм, что более характерно для трибосистем, то $\varepsilon_1(N)$ становится порядка 0,1 или 10%. Ясно, что согласно статистике, сила трения, как и её коэффициент, определяются весьма неточно, что напрямую связано с природой этой величины, которая заметно флуктуирует. Большие величины относительных флуктуаций силы трения по сравнению с относительными флуктуациями объемных термодинамических величин вполне ожидаемы. Относительная флуктуация силы трения связана с площадью контактирующей поверхности трения, пропорциональной l^2 , а объемные термодинамические величины пропорциональны l^3 , где l - поперечник термодинамической системы. Число взаимодействующих частиц в объеме много больше числа взаимодействующих частиц на поверхности макроскопических систем.

Плакирующие смазочные материалы, наноча-

стицы металлов полностью выстилают поверхность трущихся тел и их контакт соответствует всей номинальной поверхности соприкосновения. В работе [6] были предложены синтезированные металлоплакирующие присадки из меди, цинка и кадмия, которые использовались в смазочной среде на основе вазелинового масла. Средний эффективный размер частиц присадок составлял 20 нм. Частицы этих металлов адсорбируются на поверхностях трущихся тел и полностью сглаживают их шероховатости. Испытания проводились на торцевой машине трения сталь по стали, диаметр пальца был равен 4 мм [6]. Получили оценку $\varepsilon(\bar{f}) = 5,6 \cdot 10^{-6} + 9,3 \cdot 10^{-8} \approx 5,6 \cdot 10^{-6}$ или $5,6 \cdot 10^{-4} \%$.

Получение наночастиц возможно и из комплексных соединений. Брали такие комплексные соединения [7], энергия адсорбции которых соответствовала хемосорбции, а размеры получающихся наночастиц были бы порядка 100 нм, при этом коэффициент трения принимали равным 0,04, что соответствовало будущему практическому применению создаваемого нами смазочного материала. Полагали, что контакты идут по нанозернам всей номинальной поверхности контакта, полностью покрытой наночастицами, так как рассчитывали получить сплошную пленку. Площадь контакта пальца с поверхностью плашки составляла $3,1 \text{ мм}^2$ [7]. Получили оценку $\varepsilon(\bar{f}) = 5,6 \cdot 10^{-5} + 3,6 \cdot 10^{-7} \approx 5,6 \cdot 10^{-5}$ или $5,6 \cdot 10^{-3} \%$.

Как видно для режимов трения с плакирующими наночастицами поверхности реального контакта относительная флуктуация силы трения сравнительно невелика, будет воспроизводима и приемлема для технических целей.

При смешанном трении скольжения основной вклад в относительную флуктуацию силы трения вносят пары контактирующих шероховатостей трущихся тел. Эти флуктуации обеспечивают случаях плохую воспроизводимость и переносимость коэффициентов трения скольжения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №14-29-00116).

- [1] Blau, P.J. The significance and use of the friction coefficient / P.J. Blau // Tribology International. – 2001. – V. 34. – P. 585–591.
- [2] Voinov K.N. The influence of oscillations for coefficients of friction on the results of calculations // XIV International scientific conference “Tribology and reliability” (17-19 September). Saint-Petersburg. 2014. – P. 6-17.
- [3] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика.–М.: Наука, 1964.– 567 с.
- [4] Абрамзон А.А. Поверхностно-активные вещества. – Л.: Химия, 1981. – 304 с.
- [5] Трение, изнашивание и смазка: Справочник / Под ред. Крагельского И.В. и Аликина В.В. – М.: Машиностроение, 1978. – Т. 1. – 400 с.
- [6] Нгуен Хуинь // Автореф. канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону, 2015. – 22 с.
- [7] Пономаренко А.Г., Бурлов А.С., Бойко М.В., Ширяева Т.А., Калмыкова А.Г., Зайченко С.Б., Милутка М.С. Исследование трибохимических процессов в смазочных композициях, содержащих координационные соединения переходных металлов // Трение и износ. 2015. Т. 36. № 1. – С. 62-68.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ МЕТОДОМ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ

¹Бурлакова В.Э. (vburlakova@donstu.ru), ¹Дроган Е.Г.

¹Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия.

В работе исследованы трибологические и механические свойства сервоитной пленки, формирующейся при трении пары сплав меди – сталь в водных растворах карбоновых кислот. На основании экспериментальных данных установлено, что на поверхности трения формируется защитная медная пленка, при этом при переходе от пропионовой к капроновой кислоте ее твердость и модуль Юнга увеличиваются при одновременном снижении коэффициента трения.

Ключевые слова: сервоитная пленка, твердость, наноиндентирование, модуль Юнга

Введение. Несмотря на многочисленные исследования в области трибологии, изучение процессов трения по-прежнему базируется на ряде гипотез, описывающих как физические, так и химические процессы взаимодействия при трении [1]. В первую очередь данные процессы связаны со структурой сопряженных поверхностей, которая влияет и изменяет процесс трения. Важную роль при этом

играет состояние поверхностей трения с точки зрения твердости и шероховатости [2, 3].

В связи с этим целью настоящей работы является установление взаимосвязи между трибологическими, механическими свойствами медной пленки, формирующейся в системе «сплав меди – водный раствор карбоновой кислоты – сталь», и природой смазочной среды.

Материалы и методы. Трибологические исследования эволюции коэффициента трения проводили на машине трения торцевого типа АЕ-5. Узел трения представлял собой стальной образец и три пальца из бронзы, расположенных по окружности под углом 120° друг относительно друга. В качестве смазочной среды выступали водные растворы карбоновых кислот с общей формулой $C_nH_{2n-1}COOH$, где $n = 1 - 6$.

Топографические исследования сервоитной пленки проводили с использованием атомно-силовой микроскопии (АСМ) на приборе марки PHUYWE Compact.

Для установления элементного состава поверхности трения использовали сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) TESCAN MIRA 3 XMU с программным обеспечением «AZtec 2.1».

Рентгенофазовые (РФА) исследования поверхности трения выполняли на автоматизированном дифрактометре ARL X'TRA.

Механические свойства (твердость и модуль упругости) образующейся при трении в системе «сплав меди – водный раствор карбоновой кислоты – сталь» сервоитной пленки определяли с помощью инструментального индентирования на установке Nanotest Platform 3 с использованием функционального блока «Nanotest» и индентора Берковича с алмазным наконечником с приложением нагрузки 5 мН. Анализ кривых наноиндентирования проводили с использованием метода Оливера–Фарра [4].

Результаты и их обсуждение. Изучение длительной эволюции коэффициента трения в системах «сплав меди – водный раствор кислоты – сталь» позволило установить формирование на поверхности трения медной пленки, несущей основную нагрузку в установившемся режиме избирательного переноса и обеспечивающей минимальный для каждой трибосистемы износ и коэффициент трения. Необходимо отметить, что содержание меди на поверхности трения стали зависит от природы органической компоненты, используемой в качестве модельной смазочной среды, и увеличивается в ряду кислот пропионовая – капроновая, что подтверждается результатами РФА и СЭМ. Трение же в водных растворах муравьиной и уксусной кислот, являющихся достаточно сильными органическими кислотами, сопровождается значительным износом. На поверхности трения при этом обнаруживается незначительное содержание меди.

При этом топографическими исследованиями поверхности трения обнаружено с использованием АСМ, что при переходе от пропионовой кислоты к капроновой шероховатость формирующейся сервоитной пленки уменьшается, что согласуется со значениями коэффициентов трения.

Информацию о механических свойствах медной пленки под индентором получали в результате анализа Р-h-диаграмм при непрерывно регистрируемой зависимости величины смещения индентора h от величины приложенной нормальной нагрузки P (рис. 1).

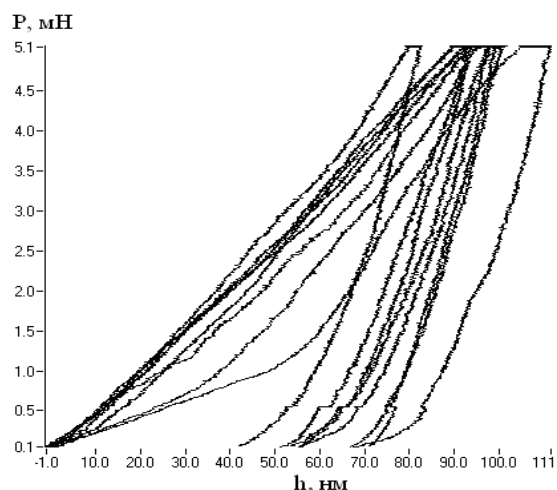


Рис. 1. Результаты наноиндентирования сервоитной пленки, формирующейся при трении в системе «сплав меди-водный раствор карбоновой кислоты-сталь»

В результате инструментального индентирования обнаружено, что твердость и модуль Юнга формирующейся при трении на поверхности стального диска медной пленки в водных растворах кислот в ряду пропионовая – масляная – валериановая – капроновая увеличивается, что согласуется с результатами АСМ и трибологических исследований: коэффициент трения уменьшается в ряду кислот пропионовая – масляная – валериановая – капроновая (табл.1).

Причиной изменения свойств сервоитной пленки, формирующейся в различных водно-органических средах, может быть наличие в ней, в соответствии с результатами СЭМ, дополнительных элементов, источником которых является как материал пар трения, подвергающийся фрикционной обработке, так и смазочной среды, существенно изменяющие ее физико-механические характеристики.

Таблица 1. Триботехнические и механические характеристики пары трения сплав меди – сталь водных растворов кислот

Кислоты	Износ пары трения $\cdot 10^{-2}$ г.	Коэффициент трения, μ	Твердость, ГПа	Модуль Юнга, ГПа
CH_3CO_2	22	0,33	6,40	276
$C_2H_5CO_2$	54	0,28	15,40	390
$C_3H_7CO_2$	11	0,09	7,10	291
$C_4H_9CO_2$	6	0,06	8,90	321
$C_5H_{11}CO_2$	2	0,03	9,80	326
$C_6H_{13}CO_2$	1	0,008	9,91	328

Выводы. В результате проведенных исследований выявлена взаимосвязь между природой смазочной среды и параметрами формирующейся на поверхности трения медной пленкой. Показано, что при фрикционном взаимодействии в водных растворах муравьиной и уксусной кислот происходит сильное изнашивание сопряженных поверхностей. При трении в водных растворах карбоновых кислот с $n = 3 - 6$ формируется защитная медная пленка, при этом

при переходе от пропионовой к капроновой кислоте ее твердость и модуль Юнга увеличиваются.

[1] Wojciech Wieleba. The statistical correlation of the coefficient of friction and wear rate of PTFE composites with steel counterface roughness and hardness / *Wear*. - 252 (2002). – pp. 719–729

[2] Wu-Gui Jiang. Effect of surface roughness on nanoindentation test of thin films / *Engineering Fracture Mechanics*. – 75 (2008). – pp. 4965–4972

[3] Alex A. Volinsky, Neville R. Moody, William W. Gerberich. Nanoindentation of Au and Pt/Cu thin films at elevated temperatures / *Materials Research Society*. – 2004. - Vol. 19, No. 9. – pp 2650-2657.

[4] Oliver W.C., Pharr G.M., An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / *J. Mater. Res.* – 1992.– Vol. 7, No. 6. – P. 1564-1583.

ВЫДАЮЩИЙСЯ ТРИБОЛОГ РОСТИСЛАВ МИТРОФАНОВИЧ МАТВЕЕВСКИЙ (к 100-летию со дня рождения)

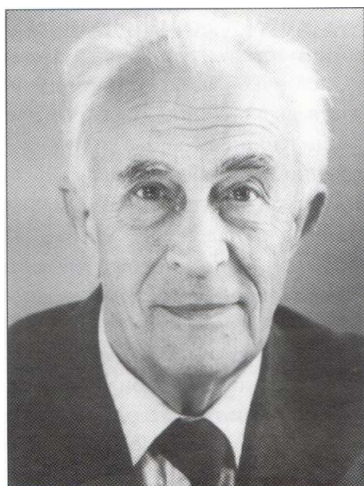
Буяновский И.А.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

Доклад посвящён научной и общественной деятельности выдающегося отечественного учёного в области граничной смазки Ростислава Митрофановича Матвеевского. Приведены результаты ряда его исследований, сыгравших большую роль в дальнейшем развитии трибологии

Ключевые слова: смазочные свойства масел, температурный метод, металлофторопластовые подшипники, машины трения, организация конференций.

4 декабря 2016 г. исполняется 100 лет со дня рождения выдающегося отечественного триболога, одного из крупнейших исследователей XX века в области граничной смазки, заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, лауреата премии Совета министров СССР, профессора, доктора технических наук Ростислава Митрофановича Матвеевского.



Ростислав Митрофанович Матвеевский (1916 – 2001 г)

Ростислав Митрофанович родился в г. Вятка в интеллигентной семье (отец – адвокат, мать – актриса). Учился в Московском текстильном институте. После его окончания с 1941 по 1945 г. служил в рядах Красной армии. В годы Великой Отечественной войны принимал участие в боевых действиях, получил тяжелое ранение, был награжден орденом и медалями.

После демобилизации Р.М. Матвеевский поступает на работу в отдел износостойкости Института машиноведения АН СССР (ныне Институт

машиноведения им. А.А. Благонравова РАН), где становится учеником и ближайшим сотрудником одного из основателей отечественной трибологии проф. М.М. Хрущова (1890-1972). В этом институте Ростислав Митрофанович работает до конца жизни. Здесь он защищает кандидатскую (1953 г.) и докторскую (1971 г.) диссертации, возглавляет Лабораторию исследования износа при граничной смазке – одну из двух лабораторий, на которые распалась Лаборатория износостойкости после смерти М.М. Хрущова (1972 г.). Последние годы жизни он работает главным научным сотрудником этой лаборатории.

Начало научной деятельности Р.М. Матвеевского было связано с проведением цикла актуальных исследований поведения смазочных материалов при низких температурах и изучением трения в приборных подшипниках. Эта работа завершилась публикацией монографии, переведенной впоследствии на китайский язык. Затем под руководством М.М. Хрущова он в результате тщательных, хорошо продуманных экспериментов устанавливает, что переходная температура по Тейбору, характеризующая переход непрерывного, "гладкого" трения к скачкообразному при граничной смазке, представляет собой не что иное, как критическую температуру перехода к заеданию по Блоку в реальных узлах трения, которая не зависит от режима работы этих узлов. Это послужило основой для разработки широко известного ныне температурного метода оценки смазочной способности масел, а также средств для реализации этого метода – как для оценки предельной температурной стойкости жидких и пластичных смазочных материалов (четырёхшариковые машины ИМАШ, КТ-2, МАСТ-1), так и установки для оценки предельной температуры работоспособности твёрдых смазочных материалов и антифрикционных по-

крытий в вакууме и в различных газовых средах (КТ-4, ДС-1 и ДС-2). В процессе исследования влияния режимов трения на противозадирную стойкость смазочных сред он установил новый энергетический критерий работоспособности смазочных материалов f_{pv} (удельная мощность трения), в работах зарубежных коллег называемый просто "критерий Матвеевского". Отметим также разработанный под непосредственным руководством Р.М. Матвеевского метод непрерывного контроля износа по гашению сцинтилляции.

Все эти работы снискали ему международную известность и заслуженный авторитет среди отечественных и зарубежных трибологов. Так, значительный интерес в научных кругах вызвал проведенный под руководством и при личном участии Р.М. Матвеевского цикл экспериментальных исследований влияния состава сплавов на основе соответственно меди, алюминия и железа на температурную стойкость смазочных сред, что позднее было обобщено в монографиях. Разработанный им температурный метод оценки смазочной способности масел стандартизуют в СССР и в Болгарии; метод до сих пор успешно применяют в исследовательской практике. Значительное внимание научной общественности было уделено его исследованиям смазочной способности масел в различных газовых средах, показавшие влияние инертных газовых сред на температурную стойкость как минеральных, так и синтетических масел. Важные результаты были получены Р.М. Матвеевским в исследовании трибологических свойств и разработке ряда новых твердых смазочных материалов и антифрикционных покрытий, предназначенных для работы в условиях экстремально высоких и криогенных температур в атмосфере инертных газов и в вакууме. Для исследований узлов трения космического челнока "Буран" он создал специальную методику трибологических испытаний в вакууме в условиях термоциклирования в интервале температур $-120...+350$ °С.

Результаты проведенных проф. Р.М. Матвеевским экспериментов становятся эталоном достоверности. Так, видные голландские ученые (Саломон, Бегелингер и де Ги) в 1979 г. с удовлетворением отмечают, что полученные ими данные аналогичны тем, "которые получили русские", ссылаясь при этом на публикации Р.М. Матвеевского и его учеников.

Большой интерес проявлял Р.М. Матвеевский к математическому описанию кинетики разрушения граничных слоев, что способствовало концентрации усилий ряда исследователей на этом направлении.

За участие в работе "Металлофторопластовые подшипники (разработка материала и технологии изготовления ленты и подшипников, создание крупномасштабного производства и широкое внедрение подшипников в различных областях промышленности)" Р.М. Матвеевский удостоен в 1984 г. премии Совета Министров СССР.

Ростислав Митрофанович принял активное участие в создании справочной литературы по трибологии. Его энциклопедические знания и удивительная способность к обобщению позволили как в отдельных главах справочников по трибологии, так и в специально написанном им с группой соавторов справочнике по антифрикционным и противоизносным свойствам смазочных материалов сжато и удивительно доступно изложить огромный экспериментальный материал, накопленный к тому времени.

Ростислав Митрофанович много сделал для того, чтобы в его лаборатории была успешно продолжена начатая под руководством проф. М.М. Хрущева разработка микротвердомеров с оценкой микротвердости по глубине вдавливания алмазного наконечника (кинетическая микро-твердость). Один из таких микротвердомеров удостоен золотой медали и диплома Лейпцигской ярмарки 1985 г.

Научные исследования и разработки проф. Р.М. Матвеевского были подытожены в более чем 250 научных публикациях, включая 8 монографий и справочников, 30 авторских свидетельств на изобретения и патентов. Под его руководством и при его непосредственном участии разработаны 4 стандарта на методы трибологических и физико-механических испытаний материалов. Он был ответственным редактором 14-и монографий и сборников, входил в редакционный совет журнала "Трение и износ", много лет был членом редколлегии известного международного журнала "Wear".

Большое внимание Р.М. Матвеевский уделял подготовке высококвалифицированных специалистов – трибологов. Под его руководством были подготовлены и успешно защищены 10 кандидатских диссертаций. В его лаборатории стажировались и отечественные специалисты из исследовательских институтов, заводов и вузов, и трибологи из зарубежных стран (Англии, Германии и т.д.). Велика роль Р.М. Матвеевского в развитии международных связей между трибологами разных стран. Он достойно представлял отечественную науку за рубежом, участвуя в многочисленных международных конференциях и симпозиумах в Германии, США, Англии и других странах. Его высокий профессионализм и редкостное личное обаяние снискали ему уважение и дружбу многочисленных зарубежных исследователей.

Р.М. Матвеевский принимал активное участие в организации ряда международных и всесоюзных конференций по трибологии, был председателем советской части подкомитета Международной организации по стандартизации (ИСО ТК) "Подшипники скольжения", где под его руководством были разработаны три международных стандарта, членом ряда специализированных ученых и научных советов, секций советов и научных обществ, включая Межведомственный научный совет по трибологии. После смерти М.М. Хрущева он до конца жизни возглавлял общемосковский Научный семинар по трению и износу в машинах,

давший путевку в большую науку многим молодым ученым.

Скончался Ростислав Митрофанович 21 февраля 2001 г. после продолжительной болезни, тяжесть которой он переносил с присущим ему мужеством. Многочисленные ученики и коллеги

проф. Р.М. Матвеевского запомнили его как удивительно скромного, доброго и отзывчивого человека, всегда готового прийти на помощь в трудную минуту, щедро делившегося с младшими товарищами своими знаниями.

РАЗВИТИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ СМАЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТОЙКОСТИ МОТОРНЫХ МАСЕЛ

¹Буяновский И.А. (buyan37@mail.ru), ²Лашхи В.Л., ¹Самусенко В.Д.

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

²ЗАО "НАМИ-ХИМ", Москва, Россия.

В докладе рассмотрено появление и развитие температурного метода оценки смазочной способности масел при трении. Обосновывается применение этого метода для оценки смазочной способности моторных масел.

Ключевые слова: моторные масла, температурная стойкость, противоизносные свойства, противозадирные свойства, смазочная способность, коэффициент трения.

Как известно, масла для поршневых двигателей работают в очень тяжелых условиях. Так, температура первой поршневой канавки составляет для современных двигателей 270-280°C, а при наличии наддува 300-330°C, а порой и выше. Рабочая температура в картере двигателя составляет 80-120°C, температура в зоне трения вкладышей подшипников и шейки коленчатого вала достигает 150-175°C [1]. Поэтому одной из важнейших характеристик моторных масел является их температурная стойкость при трении. Следовательно, этот показатель должен учитываться при разработке моторных масел. Для оценки его значения при лабораторных испытаниях наиболее рационально использовать температурный метод оценки смазочной способности масел, разработанный Р.М.Матвеевским в 1953 г. и стандартизованный в 1984 г. (ГОСТ 23.221-84) [2,3]. Основой метода является проведение трибологических испытаний масел и/или пластичных смазок при трении с постоянной нагрузкой и с очень малой скоростью, чтобы минимизировать фрикционный нагрев образцов и окружающего их слоя масла, так что повышение температуры в зоне фрикционного контакта (ступенчатое или бесступенчатое) практически полностью определяется нагревом от внешнего источника тепла. Результаты испытаний температурным методом представляются в виде зависимостей коэффициента трения от температуры (рис.1), так что все изменения в трибологическом контакте, связанные с образованием и разрушением адсорбционных и химически модифицированных слоёв, отражаются на соответствующих изменениях величины и характере (гладкое или скачкообразно изменяющееся) коэффициента трения, что свидетельствует об эффективности антифрикционного и противозадирного действия тех или иных компонентов смазочной среды (например,

детергентов) или смазочных композиций, включая товарные масла.

Поведение масел в ЦПГ ДВС сближает с поведением этих масел в температурном методе то, что в обоих случаях повышение температуры осуществляется путём объёмного нагрева (в первом случае – от сгорания топлива, во втором – от специального нагревателя (в отличие от узлов трения трансмиссий, где температура в зоне трения повышается, главным образом, от фрикционного нагрева).

Характерные зависимости температуры от коэффициента трения представлены на рис.1. Для зависимостей обычно характерно несколькими переходными температурами, которые соответствуют разрушению граничного слоя $T_{п1}$, образованию модифицированного слоя на поверхности трения $T_{п2}$, разрушению модифицированного слоя $T_{п3}$.

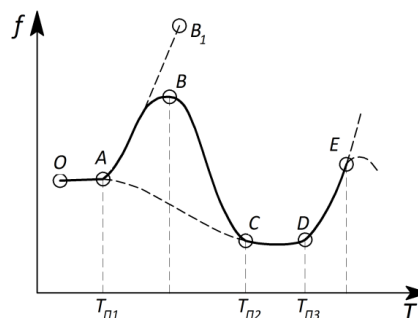


Рис. 1. Характерные зависимости коэффициента трения от температуры.

В докладе приведены результаты испытаний температурным методом моторных масел и их компонентов, начиная с экспериментов Р.М.Матвеевского в 1953 г., корреляций между критическими температурами и износами поршневых колец, и многочисленными современными

исследованиями, включающими построение кинетических моделей. Особое внимание будет уделено разработке методики оценки противозадирных свойств моторных масел для двухтактных бензиновых двигателей, в которой задействован модернизированный температурный метод [4].

[1] Лашхи В.Л., Чудиновских А.Л. Физико-химические основы химмотологии моторных масел. – М.: ООО «Издательский дом Недра», 2015 – 355 с.

[2] Матвеевский Р.М. Температурная стойкость граничных смазочных слоёв и твёрдых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов. - М.: Наука, 1971. – 228 с..

[3] Буяновский И.А. Развитие исследований переходных температур при граничной смазке //Трение и износ, 1995, т.16, № 2, с. 345 -366.

[4] Лашхи В.Л., Буяновский И.А., Самусенко В.Д., и др. Методика оперативной оценки смазочных свойств масел для двухтактных бензиновых двигателей. // Физика, химия и механика трибосистем. Межвузовский сборник научных трудов. Выпуск 12. Иваново, 2015.

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ДОБАВОК В СУЛЬФОНАТНЫХ СМАЗКАХ

Викулова А.А. (annavikulova91@mail.ru)

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

Смазочная способность пластичных смазок является важной эксплуатационной характеристикой. Поэтому большое значение имеет правильный подбор добавок и их концентраций. В данной работе исследуется влияние дисперсионной среды на работу добавок и эффективность их действия. Для исследования выбраны такие показатели как диаметр пятна износа и критическая нагрузка. Добавки показали большую эффективность в смазках на основе поли- α -олефинового масла.

Ключевые слова: пластичные смазки, присадки, наполнители, трибологические свойства.

Введение

Трибологические характеристики смазок имеют важнейшее значение как основные функциональные. Различают антифрикционные, противоизносные, противопиттинговые, противоскачковые и противозадирные характеристики смазок. Совокупность этих характеристик называют еще «смазочной способностью» смазок.

Несмотря на множество работ, посвященных исследованию трибологических свойств смазочных материалов, имеется мало обобщений, касающихся влияния дисперсионной среды на смазочную способность различных типов смазок, а приведенные в доступных литературных источниках данные часто противоречивы [1, 2]. Интенсивные научные поиски в данной области проведены в 60-80-е годы прошлого века. Основными объектами исследований в те годы были литиевые, натриевые, гидратированные и комплексные кальциевые смазки, а также смазки на некоторых органических и неорганических загустителях [3].

Целью данной работы являлось исследование влияния дисперсионной среды на эффективность действия добавок в сульфонатных пластичных смазках.

Объекты и методы

Объектом исследования выбрана сульфонатная пластичная смазка, разработанная на кафедре «Химии и технологии смазочных материалов и химмотологии» РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.

В состав смазки входит сульфонат кальция (загуститель), нефтяное или синтетическое масло (дисперсионная среда), уксусная кислота (модификатор структуры).

В качестве дисперсионной среды для приготовления сульфонатных смазок использованы: масло П-40 (для прокатных станов), содержащее значительное количество полярных продуктов, и масло ПАО-40, в составе которого отсутствуют ароматические углеводороды и асфальтосмолистые вещества. Такие дисперсионные среды были выбраны в связи с различием их группового состава, от которого зависит эффективность действия добавок.

Краткая характеристика полученных сульфонатных смазок представлена в «табл. 1».

В качестве добавок выбраны присадка ДФ-11к и наполнитель дисульфид молибдена. ДФ-11к и дисульфид молибдена добавляли в смазку в процессе гомогенизации, присадку - в концентрациях от 0,5 до 3% масс с шагом 0,5, а наполнитель - в концентрациях от 1 до 6% масс с шагом 1. Исследование трибологических показателей, таких как диаметр пятна износа и критическая нагрузка, проводилось на четырехшариковой машине трения по ГОСТ 9490-75.

Таблица 1. Краткая характеристика полученных смазок

Наименование показателя	ГОСТ	Смазка на П-40	Смазка на ПАО-40
Температура каплепадения, °С	6793	> 250	> 250
Коллоидная стабильность, %	7142	1,20	0,83
Предел прочности при 20°С, Па	7143	620	450
Диаметр пятна износа (392 Н), мм	9490	0,47	0,68
Критическая нагрузка, кгс		126	126

Результаты

Таким образом, на основании проделанной работы можно сделать вывод, что добавки эффективнее работают в сульфонатной смазке на основе масла ПАО-40. В этой смазке наблюдалось заметное улучшение показателей критической нагрузки и диаметра пятно износа.

Использование, как дисульфида молибдена, так и присадки ДФ-11к не рекомендуется в сульфонатных смазках на основе нефтяного масла П-40.

[1] Ишук Ю.Л. Состав, структура и свойства пластичных смазок. — Киев: Наук. думка. — 1996

[2] Кламанн Д.К. Смазки и родственные продукты. — М.: Химия. — 1988

[3] Железный Л. В., Любинин И.А. Влияние природы загустителя на трибологические характеристики высокотемпературных смазок // Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2009, №5, 17—22.

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТОПОКОМПОЗИТОВ ПРИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ ИНДЕНТИРОВАНИИ И УЧЕТ ЭТИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА УПРУГОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЯ

Воронин Н.А. (voroninn@inbox.ru)

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

Рассмотрен эффект упругого деформирования топокомполитов с тонкими твердыми поверхностными слоями при инструментальном индентировании. Предложен метод расчета упругих характеристик поверхности топокомполита с использованием результатов процесса инструментального индентирования и модели, основанной на модифицированной контактной задаче Герца.

Ключевые слова: инструментальное индентирование, тонкие покрытия, топокомполиты, модуль упругости.

Введение

Для поверхностей триботехнического назначения твердость и модуль упругости являются двумя ключевыми характеристиками. Метод инструментального индентирования широко используется для оценки характеристик материала на основе анализа и интерпретации диаграммы «нагружение – перемещение индентора». Для тонких упрочняющих покрытий применение метода инструментального индентирования связано с рядом трудностей методического и инструментального характера.

Цель работы

Целью данной работы является расширение возможностей метода инструментального индентирования для оценки ряда характеристик поверхностей трения, упрочненных тонкими защитными покрытиями.

Методы решения

Поставленная в работе цель достигается в результате использования основных положений разработанной в работах [1-3] модели контактного взаимодействия сферического индентора с поверхностью упругопластичной слоистой системой, имитирующей упрочненную тонким защитным покрытием твердую поверхность. Модель основана на модифицированной задаче Герца, учитывающей истинную эпюру контактного давления при взаимодействии сферы с упрочненной поверхностью. Результатом решения математической модели являются аналитические выражения, описывающие изменения деформационно-силовых параметров контакта ряда эффективных

характеристик поверхности слоистой системы в зависимости от глубины внедрения индентора, усилия нагружения, геометрии контакта и комплекса, характеризующего соотношение упругих и пластических свойств компонентов слоистой системы. Экспериментальная кривая нагружения, получаемая методом инструментального индентирования, используется в полученных теоретических аналитических зависимостях для расчета требуемых характеристик поверхности в целом и компонентов в отдельности.

Результаты и обсуждение

В соответствии с ранее проведенным автором анализом механики контактного взаимодействия жесткого сферического индентора с плоской поверхностью топокомполита [1,2] была получена аналитическая зависимость для определения эффективной (композиционной) твердости топокомполита:

$$H_c = H_0 \cdot \frac{(\bar{\Phi})^{\frac{1}{2}}}{(\Phi)^{\frac{3}{2}}}, \quad (1)$$

где $\bar{\Phi}$ – предельный упруго-геометрический параметр, диапазон существования которого $1 \leq \bar{\Phi} \leq K^2 Y^2$; Φ – упруго-геометрический параметр, диапазон существования которого $1 \leq \Phi \leq K^{\frac{2}{3}}$; $Y = \frac{\sigma_{T1}}{\sigma_{T0}}$; $K = \frac{K_1}{K_0}$; $K_0 = \frac{1-\mu_0^2}{E_0}$; $K_1 = \frac{1-\mu_1^2}{E_1}$,

$$K_u = \frac{1-\mu_u^2}{E_u}.$$

Предельный упруго-геометрический параметр

$\bar{\Phi}$ определяется отдельно для трех областей существования толщины покрытия :

$\bar{\Phi} = M_I \cdot (\Phi)^3$, где – $M_I = 1$ для малой толщины ;

$M_{II} = (0,31 \cdot T_k^{-1})^2$ – при средней толщины (так называемая вторая область деформирования);

$M_{III} = Y^2$ – для большой толщины покрытия. (Более подробно обозначения – см. работу [2]).

Для топокомпозиата выражение (1) для второй области изменения поверхностной твердости от глубины внедрения будет после преобразования имеет следующий вид:

$$\frac{H_c}{H_0} = \frac{(\bar{\Phi}_i)^{\frac{1}{2}}}{(\Phi)^{\frac{3}{2}}} = \frac{[M_i \cdot (\Phi)^3]^{\frac{1}{2}}}{(\Phi)^{\frac{3}{2}}} = 0,31 \cdot T_k^{-1} \left\{ \frac{h}{a_c^{sp}} \right\}, \quad (2)$$

где параметр T_k зависит только от величины $\frac{h}{a_c^{sp}}$,

а последняя, только от соотношения упругих характеристик компонентов слоистой системы. Другой особенностью этой области деформирования является отсутствие связи значения твердости со значением истинной твердости материала покрытия, как это часто упоминается в литературе. Поэтому зависимость (2) предлагается использовать для определения истинного значения модуля упругости материала покрытия. Уравнение (2) можно преобразовать к виду при равенстве значении нагрузок $P_c = P_0$:

$$\frac{s_c^2}{s_0^2} = \left(\frac{T}{0,31} \right), \quad (3)$$

По полученным из экспериментов диаграммам внедрения для слоистой системы и свободной от покрытия поверхности основы рассчитывают значения для всего диапазона нагрузки при инструментальном индентировании.

Сопоставляя массив значений $\left[\frac{(s_c)_i}{(s_0)_i} \right]^2$, полученных из эксперимента для исследуемого изделия с покрытием, с теоретически рассчитанными значениями $\frac{s_c^2}{s_0^2}$ можно определить численно контактный модуль упругости K , а затем и модуль Юнга материала покрытия:

$$E_1 = \frac{1 - \mu_1^2}{K_0 \cdot K + K_u (K - 1)}.$$

Результаты сопоставления предложенного метода определения модуля упругости с известными в литературе хорошо согласуются.

[1] Воронин Н.А. Токопозиционные материалы триботехнического назначения: определение, получение, материалы, особенности механики контактного взаимодействия. Трение и смазка в машинах и механизмах. 2008, №5, 17-32.

[2] Voronin N. A., Composite and Real Hardnesses of Thin Coatings. Advanced Materials Research. Vols. 560-561 (2012). 803-808.

[3] Воронин Н.А. Механика контактного взаимодействия жесткой сферы с упругопластичным топокомпозиатом. Физика и механика материалов, 2015, т. 22, № 1, 22-29.

АНАЛИЗ СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА НАГРУЖЕНИЯ ГОРНЫХ МАШИН И ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОЙ ДЛИНЫ РЕАЛИЗАЦИИ

¹Гадолина И.В., ¹Петрова И.М., ²Черезов А.А.

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия;

²Кузбасский ГТУ, Кемерово, Россия.

Предложен подход для оценки необходимой и достаточной длины реализации для оценки нагруженности на основании стабилизации вычисленного ресурса деталей горных машин.

Ключевые слова: стационарный процесс, методы схематизации, горные машины.

Характерной чертой изменения нагрузок в элементах силовых систем и в металлоконструкциях горных машин является случайный их характер (почти отсутствуют гармонические колебания)[1]. Повреждающие воздействия на машины могут быть как усталостного характера (при воздействии рабочих нагрузок на конструкцию), так и поверхностного свойства (при непосредственном контакте деталей оборудования с породой). Сбор и анализ информации о случайных процессах нагружения необходимы для последующей оценки наработки, анализа рисков и для прогнозирования трудоёмкости и стоимости выполнения работ по техническому обслуживанию и ремонту техники. В последние годы для сбора и обработки этой информации используется концепция больших данных (Big data) [2].

Некоторые рекомендации по оценке нагруженности с целью расчета ресурса строительных

машин базируются на подходе, основанном на применении спектральной плотности процесса [3]. Тем не менее, ГОСТ [4], а также ряд рекомендаций по расчету авиационных и автомобильных конструкций на протяжении последних десятилетий в большей степени используют подход, основанный на схематизации случайных процессов с последующей целью оценки ресурса. Применение подхода, основанного на спектральной плотности, допустимо на стадии проектирования. Использование математического аппарата вейвлетного анализа и мультифракталов в качестве новой теоретической базы для описания внутренней структуры процесса нагружения конструкции дает глубокое понимание его природы на основе универсальных закономерностей самоаффинности [5].

Чтобы оценить ресурс машины, надо проанализировать историю нагружения деталей машин, находящихся в эксплуатации. При анализе возни-

кает вопрос о стационарности процесса нагружения и необходимой длине реализации. Определение стационарности в широком смысле было дано А.Я. Хинчиным. Было доказано, что случайная функция является стационарной, если ее среднее значение и дисперсия постоянны, а функция автокорреляции зависит только от разности времен, для которых берутся координаты случайной функции. К сожалению, это определение мало что дает для оценки свойств и характеристик случайных процессов нагружения при оценке ресурса несущих конструкций. Это определение также ничего не говорит о необходимой длине реализации.

Предложенный подход для оценки необходимой и достаточной длины реализации основывается на стабилизации величины расчетного ресурса в зависимости от длины реализации [6]. Если длина реализации достаточно велика, то случайные эффекты усредняются, и расчетный срок службы машины стабилизируется [7]. Рассматривается дискретная последовательность оценок ресурса $L^*(t)$, которая зависит от длины t реализации. Ресурс рассчитывается по скорректированной линейной гипотезе [1] на основе двумерной схематизации с учетом среднего напряжения цикла [4].

С целью получения распределения размахов напряжений было проведено тензометрирование в элементах конструкции экскаватора ЭКГ-12 на разрезе «Кедровский» [8]. Фрагмент осциллограммы (напряжения в стреле экскаватора, операция черпания) показан на рис. 1.

Последовательности экстремумов, как необходимый этап подготовки процесса к схематизации для всей реализации $N_s=1856$ (количество экстремумов) приведена на рис. 2.

Процесс нагружения близок к узкополосному с коэффициентом нерегулярности $\chi=0,89$ (оценивается как отношение числа экстремумов к числу пересечений среднего уровня); максимальная зафиксированная амплитуда $\sigma_{\max}=25$ МПа; эффективная частота процесса $f_{\text{эф}}=1,8$ Гц.

Для определения необходимой длины реализации в соответствии с предлагаемым подходом требуется 1) провести схематизацию процесса; 2) вычислить ресурс. Первоначально схематизация была проведена тремя методами: экстремумов, размахов и падающего дождя [1,4]. Распределения выделенных амплитуд показаны на рис. 3.

В дальнейших расчетах использовалась схематизация по методу дождя, как дающая наиболее приемлемые, с точки зрения соответствия опыту, результаты.

В соответствии с предложенным подходом на рис. 4 приведен график, на котором в зависимости от длины реализации, по которой определяются параметры распределения амплитуд по методу падающего дождя [1,4,9], показан оцененный ресурс в отношении к оценке для реализации максимальной длины. При оценке ресурса показатель угла наклона кривой усталости варьировался $m = 3 \dots 7$, так как в распоряжении исследователей не имелось точной информации о реальной физиче-

ской величине. Видно, что при разных m для данного узкополосного процесса стабилизация наступает после длины реализации около 450 циклов (один цикл образуется из двух экстремумов), что соответствует примерно 4 мин. То есть, для данного примера необходимая длина реализации составит $l = 4$ мин., что обеспечит состоятельную оценку ресурса при условии постоянства условий эксплуатации.

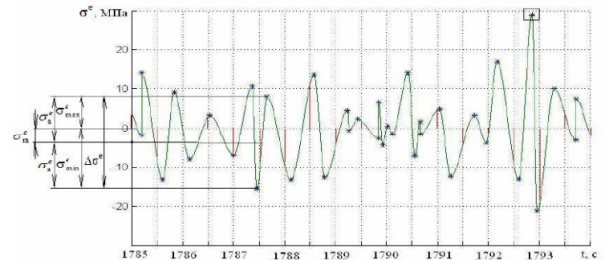


Рис. 1. Пример реализации процесса нагружения



Рис. 2. Последовательности экстремумов процесса нагружения

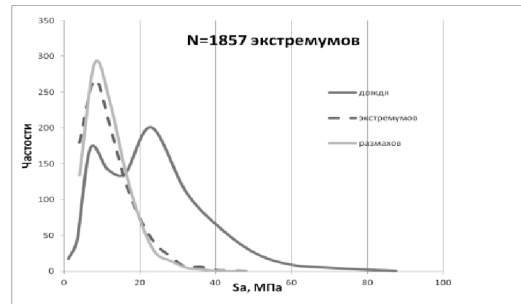


Рис. 3. Распределения амплитуд, выделенных по разным методам схематизации.

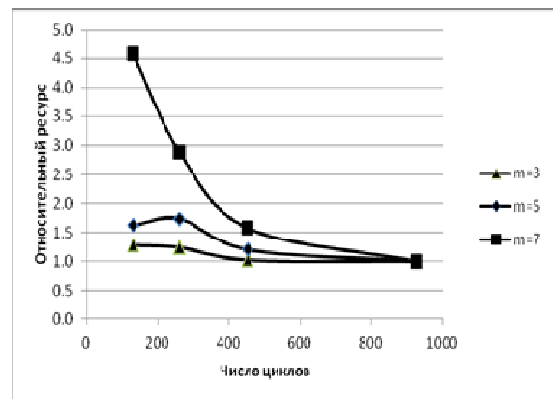


Рис. 4. Стабилизация вычисленного ресурса при увеличении длины реализации.

Выводы

Предложенный метод позволяет выбрать необходимую и достаточную длину реализации для последующей обработки с целью расчета долговечности. При этом с увеличением m (коэффициент наклона кривой усталости) эта величина увеличивается

- [1] Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. Изд-е 2-е, перераб. и доп. Под ред. А.П.Гусенкова. М.: Машиностроение. 1993. – 364 с.
- [2] Зайнетдинов Р.И., Гадолина И.В. Big Data vs. Small Data: Инновационные технологии сбора и обработки информации о техническом состоянии наукоемкой техники // Научные труды IV-й Международной научной конференции «Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении». – М.: «Спектр», 2015. – С. 111 – 113.
- [3] Извеков Ю. А. Анализ техногенной безопасности кранового хозяйства России // Современные наукоемкие технологии. – Москва, РАЕ, 2012. – № 12. – С. 18 – 19.
- [4] ГОСТ 25.101-83. Межгосударственный стандарт. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных процессов нагружения элементов машин и конструкций и ста-

тистического представления результатов. М.: Изд-во стандартов, 1983. – 25 с.

- [5] Зайнетдинов Р.И. Вейвлетный анализ и его применение в инженерном деле (на примере сварных конструкций). Учебное пособие. – М.: МИИТ, 2001. – 56 с.
- [6] Gadolina I.V., Zainetdinov R.I., Petrova I.M. The criterion for selecting the length of realization to estimate the machines lifetime under service loading // Матеріали IV міжнародної науково-технічної конференції „Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування“. – Ternopil, 2015. – P.145 – 147.
- [7] Гадолина И.В., Зайнетдинов Р.И., Петрова И.М. Определение необходимой длины реализации для оценки нагруженности машин при стационарном или нестационарном процессе // Динамика и прочность конструкций аэрогидроупругих систем. Численные методы. Труды третьей научно-технической конференции. – М.: ИМАШ РАН, ООО «РИФ СЕМИР». – 2015. – С. 11 – 12.
- [8] Черезов А.А. Структурный анализ процесса нагружения элементов конструкции мехлопат // Уголь. – 2011. – №2. – С. 51 – 52.
- [9] Irvin T. Rainflow Fatigue Cycle Counting, C++, Vibrationdata, Madison, Alabama, USA, 2011.

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НОВЫХ ПОЛИМЕРОВ, ВЛИЯНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ МАССЫ НА ТРЕНИЕ

¹Горошков М.В., ¹Шапошникова В.В., ¹Салазкин С.Н., ¹Донсков Е.А.,
²Панова М.О., ¹Краснов А.П. (krasnov@ineos.ac.ru)

¹Институт элементоорганических соединений РАН, Москва, Россия;

²Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия.

Исследованы новые ароматические аморфные полимеры: полиариленэфиркетонов, полиэфирсульфонов, полиарилатов, которые характеризуются низким показателем энергии межмолекулярного взаимодействия. Показано влияние молекулярной массы на трибологические свойства, которые характеризуются тремя зонами изменения характеристик. Низкие значения коэффициента трения и резко возросшая износостойкость достигнуты при предельно высоких молекулярных массах полиариленэфиркетонов.

Ключевые слова: полиариленэфиркетоны, молекулярные массы, коэффициент трения, износ.

Молекулярная масса – основной показатель макромолекулы, источник происхождения самого названия «полимер», впервые приведенного Берцелиусом в докладе Шведской академии в 1832 году.

Вопрос об оптимальной величине молекулярной массы возникает, практически, при синтезе каждого нового полимера, в зависимости от последующих эксплуатационных задач.

К сожалению, для трибологов, обычная характеристика свойств, приводимая фирмами, затрагивает процессы переработки, физико-механические, теплофизические показатели традиционных аморфных либо слабокристаллических полимеров без учета трибологических показателей.

Впервые, очень остро, вопрос о молекулярной массе и связи с трибологическими свойствами возник в начале 50-х годов прошлого века при синтезе сверхвысокомолекулярного полиэтилена, сразу же, в 1954 г., чрезвычайно удачно использованному Чанли в качестве полимерного вкладыша тазобедренного сустава. До сего времени СВМПЭ

остается незаменимым в этих целях и объектом многочисленных исследований [1].

Проблема характера влияния молекулярной массы на трибологические свойства определяется химическим строением и структурой ароматических полимеров. Так, в алифатических полиамидах повышение молекулярной массы и вязкости расплава приводит к ухудшению трибологических показателей [2], в то время как в выше приведенном примере о СВМПЭ присутствует обратная зависимость. Вероятно, это влияние во многом обусловлено характером межмолекулярного взаимодействия в различных классах полимеров.

Структура новых аморфных ароматических полимеров, например, таких как полиариленэфиркетоны (ПАЭК), полиэфирсульфоны (ПЭС), полиарилаты, как и выше приведенных алифатических частично-кристаллических СВМПЭ и ПТФЭ характеризуется крайне низким показателем энергии межмолекулярного взаимодействия, с основным вкладом дисперсионных сил и полным отсутствием водородных связей, как правило, резко повы-

шающих межмолекулярное взаимодействие и трибохимическую активность, что отражается на значении коэффициента трения [3].

В перечисленных аморфных полимерах наблюдается четко выраженная зависимость трибологических свойств от молекулярной массы.

Поскольку энергия межмолекулярного взаимодействия крайне низка, улучшение физико-механических показателей и изменение вязкости расплава достигается, в основном, за счет роста молекулярной массы макромолекул (рис. 1).

Полученные экспериментальные данные влияния молекулярной массы на трибологические свойства ПАЭК приведены на рис. 2. Можно видеть три зоны зависимости свойств от молекулярной массы.

В первой зоне, характеризуемой приведенной вязкостью $\eta_{пр} \sim 0,4-0,5$ дл/г, ПАЭК имеет низкий коэффициент трения и высокое значение износа.

Вероятно, это связано с тем, что значения вязкости (молекулярной массы) характерны для переходного периода формирования механического сегмента и полимер характеризуется низкими физико-механическими свойствами.

Следующий этап трения в выбранных условиях, где происходит постепенный рост вязкости полимеров, характеризуется сложным взаимодействием двух факторов силы трения $F_{мол}$ и $F_{мех}$. Это является причиной повышения коэффициента трения при $\eta_{пр} = 0,75$ дл/г и 1 дл/г. Выше $\eta_{пр} = 1$ дл/г начинается снижение коэффициента трения.

Этот, третий период, характеризуется стабилизацией коэффициента трения до значения 0,4 и минимальным износом.

Таким образом, для полимеров с низкими значениями энергии межмолекулярного взаимодействия, величина молекулярной массы является определяющей при формировании трибологических свойств. Сами подобные полимеры представляют собой удачный объект для разнообразных видов модификации с целью получения практически ценных трибологических материалов.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ НА СУХОЕ ТРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Григорьев С.Н., Мандель А.М., Ощурко В.Б., Соломахо Г.И., Шарц А.А. (schtscha@yandex.ru)

ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия.

Показано, что в обычной модели Прандтля-Томлинсона член, описывающий трение и традиционно вводимый искусственно, получается естественным образом при учёте электризации контактирующих поверхностей диэлектриков.

Ключевые слова: сухое трение, электризация, модель Прандтля-Томлинсона, механизмы потерь энергии.

Электризация при трении является широко распространённым и практически неизбежным явлением, сопровождающим трение [1]. Вместе с тем, в настоящее время при рассмотрении фунда-

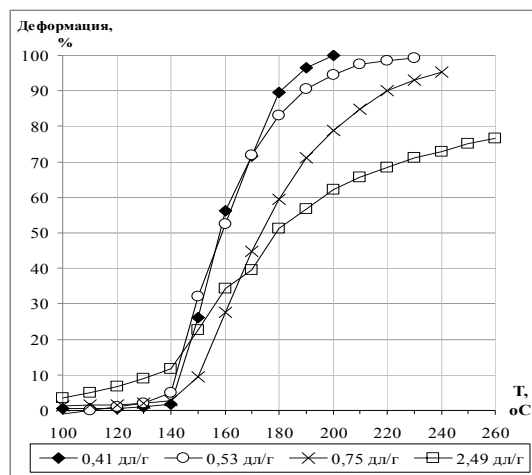


Рис. 1. Пластометрические кривые ПАЭК различной приведенной вязкости.

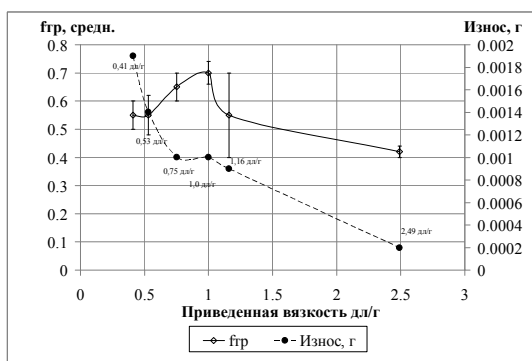


Рис. 2. Влияние молекулярной массы (вязкости) ПАЭК на трибологические показатели. $P_{тр} = 10$ МПа, $v = 0,5$ м/с.

[1] А.В. Наумкин, А.П. Краснов, Э.Е. Саид-Галиев, И.О. Волков, А.Ю. Николаев, О.В. Афоничева, А.Р. Хохлов, Диоксид углерода в поверхностных слоях сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Доклады Академии Наук, 2008, т. 419, с. 641.

[2] M.W. Shin, S.S. Kim, H. Jang, Friction and Wear of Polyamide 66 With Different Weight Average Molar Mass. Tribology Letters, (2011) 44, pp. 151–158

[3] Краснов А.П., Рашкован И.А., Афоничева О.В., Казаков М.Е., О.Б. Кулачинская // Трение и изнашивание углеводопластов на основе полиамидов различного химического строения. «Трение и износ», 2006, Т. 27, № 5, с. 527-534.

ментальных механизмов трения электризацией обычно пренебрегают [2]. В простейших механических моделях трения (модели Прандтля-Томлинсона [3,4] — движения массы под действи-

ем фиксированной силы в периодическом потенциале) никакое трение вообще невозможно, поскольку нет механизма диссипации энергии.

Для получения ненулевого трения в этой модели приходится искусственно вводить член, описывающий вязкое трение неизвестной природы [2], либо усложнять модели путём введения так называемой упругой неустойчивости. Именно в таком виде модель Прандтля-Томлинсона в настоящее время стала широко использоваться в нанотрибологии [5].

Рассмотрим связанные с электризацией [6] механизмы диссипации энергии в рамках простой фундаментальной модели Прандтля-Томлинсона. Движение в такой модели традиционно определяется уравнением

$$m\ddot{x} + \eta\dot{x} + c(x - v_0 t) = \Delta F \sin(2\pi x / l) \quad (1)$$

где точки - производные по времени, постоянные m и c описывают инертные и упругие свойства слайдера, v_0 — скорость установившегося движения, а правая часть определяет периодическую по пространству силу сопротивления поверхности с амплитудой ΔF и пространственным периодом l . Уравнение (1) описывает ситуацию, когда слайдер тянут за пружину с постоянной скоростью.

Существенно, что диссипацию энергии здесь задаёт только второе слагаемое, описывающее некоторое “вязкое трение”. Обычно это слагаемое вводится искусственно без конкретизации механизма такого трения. В результате трудно указать, чему такая модель “физически соответствует” и в каких конкретных условиях она должна работать.

Цель предлагаемой работы – построение электроупругой модели типа (1), в которой параметр η имеет естественный и ясный физический смысл. Для простоты рассмотрим контакт диэлектрических материалов. Предположим, что по мере движения изначально электрически нейтральные слайдер и подложка электризуются, заряжаясь разноимёнными зарядами величиной q . Простейшее уравнение для динамики заряда имеет вид

$$\dot{q} = \gamma\dot{x} - q / \tau. \quad (2)$$

То есть начальная скорость накопления заряда пропорциональна скорости слайдера с коэффициентом пропорциональности γ . Второе слагаемое в правой части обусловлено обычным процессом насыщения заряда и релаксацией, связанной с кулоновским отталкиванием. Постоянная τ имеет смысл максвелловского времени релаксации заряда и зависит от ёмкости и электрического сопротивления образующегося “эффективного конденсатора”. Она связана с удельным сопротивлением среды ρ как обычно $\tau = \rho\epsilon\epsilon_0$, где ϵ и ϵ_0 – соответственно диэлектрическая проницаемость и электрическая постоянная. Постоянная γ в (2) характеризует электризационные свойства контактирующих поверхностей и зависит от многих параметров. В принципе, оценка γ – предмет отдельного исследования.

Важно определить область применимости предлагаемой модели. В классической теории сил Ван-дер-Ваальса [2] и развивающей её теории бес-

контактного трения [6] предполагается, что расстояние между трущимися поверхностями столь велико, что туннелирование материальных частиц через такой промежуток невозможно. Поэтому основным механизмом диссипации является обмен фотонами между взаимно перемещающимися телами. С другой стороны, в классической теории трения Боудена-Тейбора [2] расстояние между трущимися поверхностями настолько мало, что более твёрдая поверхность пропахивает менее твёрдую. В этом случае основные потери энергии связаны со смещением атомов из положений равновесия, т.е. с локальными разрушениями кристаллической решётки. Предлагаемая нами модель занимает промежуточное положение между указанными крайними случаями. С одной стороны, туннелирование электронов допускается, за счёт чего и происходит электризация в зоне контакта. С другой стороны не рассматриваются перемещения атомов и связанные с ними потери энергии (износ трущихся поверхностей). Отметим, что включение в нашу модель обычной “амонтоновской” силы трения типа μmg её не слишком усложняет, что может быть использовано в дальнейшем.

Теперь обозначим основной механизм диссипации энергии в нашей модели. Движение слайдера с заряженной поверхностью вызывает кулоновскую силу, действующую на ионы подложки. Это, в свою очередь, должно вызывать движение зарядов в непроводящей подложке. Тогда механизм потерь энергии оказывается аналогичен обычному электрическому сопротивлению. Движение зарядов, т.е. ток в среде с электрическим сопротивлением приводит к выделению тепла. Тем самым, потери связаны с необходимостью при движении слайдера “протаскать” электризационный заряд подложки по плохо проводящей среде. Пусть A – площадь (номинальная, а не площадь фактического контакта) слайдера, a – постоянная решётки материала подложки (заряды находятся в поверхностном слое толщиной a). Плотность тока, вызываемого движением электризационного заряда, составляет $j = q\dot{x} / Aa$, а плотность мощности тепловых потерь, согласно закону Джоуля-Ленца, равна соответственно

$$P = \rho \left(\frac{q\dot{x}}{Aa} \right)^2.$$

Так как уравнение Прандтля-Томлинсона (1) описывает баланс сил, то оценим силу сопротивления, действующей на слайдер. За малое время Δt слайдер смещается на расстояние Δx , а теряемая энергия в единице объёма $\Delta E = P\Delta t$, и «плотность» тормозящей силы есть $F/V \approx \Delta E / \Delta x$, (при $\Delta x / \Delta t = \dot{x}$), и значит

$$F = \rho q^2 \dot{x} / Aa.$$

Трудно представить ситуацию, в которой бы этот механизм не работал. Конечно, он не всегда является единственным и доминирующим. Таким образом, второе слагаемое в левой части (1) приобретает “физическую конкретику” и уравнение запишется следующим образом

$$m\ddot{x} + \frac{\rho q^2}{Aa} \dot{x} = c(v_0 t - x) + \Delta F \sin(2\pi x / l). \quad (3)$$

Уравнения (2) и (3) образуют полную систему уравнений, описывающих движение слайдера $x(t)$ и динамику заряда $q(t)$. Ввиду нелинейности (3) построить общее решение системы довольно трудно. Ограничимся тем, что проанализируем, как сказывается включение электризации на известные режимы движения в модели Прандтля-Томлинсона. А чтобы не усложнять и без того непростую модель, ограничимся рассмотрением одной пространственной переменной.

На рис. 1 и 2 приведены результаты численного решения системы уравнений (2)–(3). Здесь отражено влияние электризации на динамику модели Прандтля-Томлинсона в режиме упругой неустойчивости (stick-slip) и ненулевого среднего трения, а именно зависимость силы трения от времени и динамика заряда поверхности. Здесь тонкая линия – без электризации, а толстые – при электризации. По обеим осям использованы условные единицы для визуализации быстрых осцилляций.

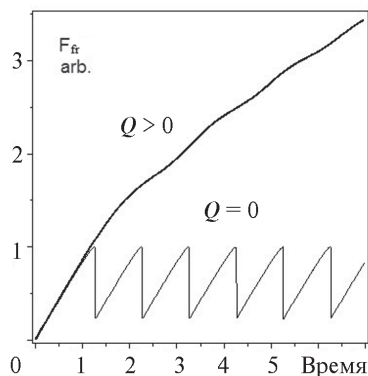


Рис.1. Зависимость силы трения от времени

Таким образом, учёт электризации в модели Прандтля-Томлинсона приводит к появлению простого механизма диссипации энергии, так что

средняя сила трения уже никогда не равна нулю, а член, описывающий “вязкое” трение, получается естественно при учёте электризации поверхности. Это даёт достаточно универсальный и простой механизм диссипации энергии в отсутствие разрушения трущихся поверхностей. В результате решение уравнений движения в паре трения сводится к системе нелинейных уравнений модели Прандтля-Томлинсона с учётом электризации.

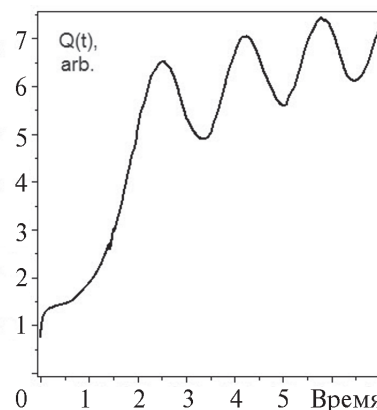


Рис.2. Динамика заряда на поверхности трения

- [1] Григорьев С.Н., Лановой О.В., Мандель А.М., Ошурко В.Б. Соломахо Г.И. О механизме эффекта радиационного снижения трения в покрытиях из диалкогенидов переходных металлов // Трение и износ, 2013 (34), №3, 315-321.
 [2] Попов В.Л. Механика контактного взаимодействия и физика трения. — М.: Физматлит. — 2013
 [3] Prandtl L. Ein Gedankenmodell zur Kinetischen Theorie der Festen Körper // Z. Angew. Math. Mech. — 1928 (8), 85—106
 [4] Tomlinson G.A. A molecular theory of friction. // Phyl. Mag. Series 7, 1929, pp. 905-939.
 [5] Bhushan B. Nanotribology and Nanomechanics. — Heidelberg-Berlin: Springer-Verlag. — 2008
 [6] А.М. Мандель, С.Н. Григорьев, В.Б. Ошурко, Г.И. Соломахо, С.Г. Веселко Электроупругая модель сухого трения.- Трение и износ.- 2016(37), №3. С. 290-300.

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПРИСАДОК В МИНЕРАЛЬНОМ МАСЛЕ НА ОСНОВНЫЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРЫ "СТАЛЬ-ЧУГУН"

¹Гвоздев А.А., ²Казак А.В., ²Смирнова А.И., ²Усольцева Н.В. (ny_usoltseva@mail.ru),
¹Козинец М.В., ³Рожкова Н.Н., ⁴Ермаков С.Ф.

¹ Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. акад. Д.К. Беляева, Иваново, Россия;

² Ивановский государственный университет, НИИ наноматериалов, Иваново, Россия;

³ ФГБУН Институт геологии Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, Россия;

⁴ Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАНБ, Гомель, Белоруссия.

Исследовано влияние введения присадки на основе холестерического жидкого кристалла и наночастиц шунгитового углерода в моторное масло на основные триботехнические характеристики (момент трения, температура в зоне трения и время стабилизации). Показано, что добавка присадки в масло двигателя приводит к существенному снижению механических потерь (до 12,5%), уменьшает выделение тепла в зоне трения (на 25%) и снижает время стабилизации (на 20%).

Ключевые слова: износостойкость, двигателя внутреннего сгорания, присадки, шунгитовый наноуглерод.

Введение

Надежность и долговечность автомобильного и других видов транспорта во многом обусловлены уменьшением явлений трения и износа, происходящих в узлах машин. Изнашивание приводит к нарушению герметичности узлов, теряется точность взаимного расположения деталей и перемещений. Возникают заклинивания, удары, вибрации, приводящие к поломкам. Трение приводит к потерям энергии, перегреву механизмов, снижению передаваемых усилий, повышенному расходу горючего и других материалов [1]. Анализ успехов трибологии показывает, что на современном этапе идея реализации жидкокристаллического состояния структурно упорядоченных на наноуровне граничных слоев в зоне динамического контакта тел различной природы и изучение их свойств приобретают все более решающие значения [2]. Поэтому в данной работе опробованы технологии безразборного восстановления узлов трения машин и оборудования с использованием триботехнических составов на основе жидких кристаллов и наночастиц шунгитового углерода.

Материалы и методы

В качестве присадки применялся химически чистый тридецилат холестерина (заводская маркировка Х-20) и наночастицы шунгитового углерода (ШУ), полученные из высокоуглеродистой шунгитовой породы Шунгит I-разновидности (месторождение Шуньга). Для одновременной реализации процесса дезагрегирования наноматериала и его равномерного распределения, ШУ вводился в ХЖК-матрицу путем ультразвукового диспергирования соответствующей навески в ЖК-среде. Сначала диспергирование проводилось в течение 2 мин. при температурах, на 5–6 °С превышающих температуру перехода в изотропное состояние, затем – в течение 30 мин. при температуре мезоморфного состояния. Этот процесс повторялся трижды [3]. Диспергирование системы выполнялось при помощи ультразвуковой бани Sonorex Digital фирмы Bandelin.

Триботехнические испытания проводились на двух машинах трения: а) модели 2070 СМТ-1 по схеме скольжения “ролик — колодка” в условиях граничного трения, где в качестве подвижного образца применяли ролик Ø 50 мм из стали 40Х (HRC 48...50), в качестве колодки — чугун специальный для гильз цилиндров двигателей Д-240 Минского моторного завода (Республика Беларусь); б) модели 77МТ-1 с возвратно-поступательным характером движения по схеме “гильза — поршневое кольцо” (обе детали — из специального чугуна), при этом нижний образец (фрагмент гильзы) был шириной 20 мм, длиной 100 мм, верхний образец (фрагмент поршневого кольца) обработан по наружному диаметру для контакта с гильзой на длине 5 мм. Площадь контакта кольца с гильзой составляла 10 мм². Сравнительные испытания проводились с использованием следующих смазочных материалов:

1. Масло М-10Г2К;
2. Масло М-10Г2К с трибоприсадкой на основе холестерического жидкого кристалла и наночастиц шунгитового углерода.

Результаты и их обсуждение

Исследование влияния присадки на основные триботехнические характеристики проводилось в диапазоне концентраций от 1 мас.% до 3 мас.% и при концентрациях наночастиц шунгитового углерода в общей массе присадки от 0,005 мас.% до 0,05 мас.%.

Установлено, что при постоянной концентрации присадки 2 мас.% увеличение содержания наночастиц шунгитового углерода приводит к существенному снижению основных триботехнических характеристик: момента трения в системе от 200 Н·см до 175 Н·см (12,5%, рис. 1), температуры в зоне трения от 124 °С до 94,5 °С (23,8%, рис. 2) и времени стабилизации системы от 28,1 мин. до 22,5 мин. (20%, рис. 3).

При вариации общей массы присадки от 0 до 3 мас.% и содержании в ней 0,005 мас.% наночастиц шунгитового углерода, зависимость от концентрации имеет сложный характер. Примечательно, что введение 1 мас.% присадки приводит к существенному снижению как момента трения (от 200 Н·см до 175 Н·см, 12,5 %, рис. 4), так и температуры в зоне трения (от 124 °С до 93 °С, 25 %, рис. 5). Дальнейшее повышение концентрации присадки приводит к постепенному росту данных характеристик.

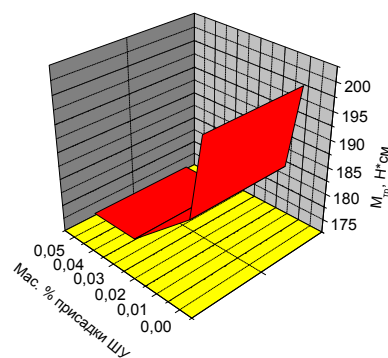


Рис. 1. Зависимость момента трения от концентрации наночастиц шунгитового углерода в присадке (концентрация присадки 2 мас.%, нагрузка 2500 Н).

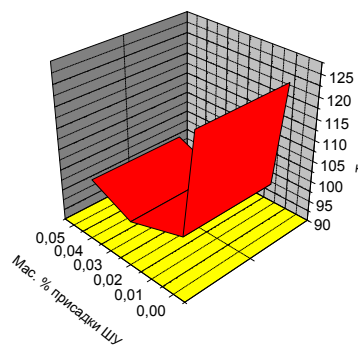


Рис. 2. Зависимость температуры в зоне трения от концентрации наночастиц шунгитового углерода в присадке (концентрация присадки 2 мас.%, нагрузка 2500 Н).

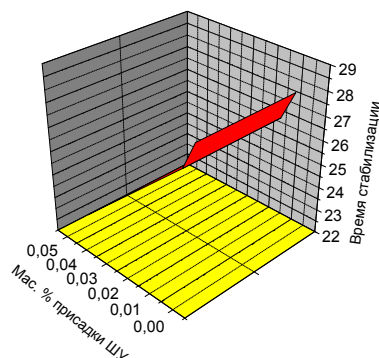


Рис. 3. Зависимость времени стабилизации от концентрации наночастиц шунгитового углерода в присадке (концентрация присадки 2 мас.%, нагрузка 2500 Н).

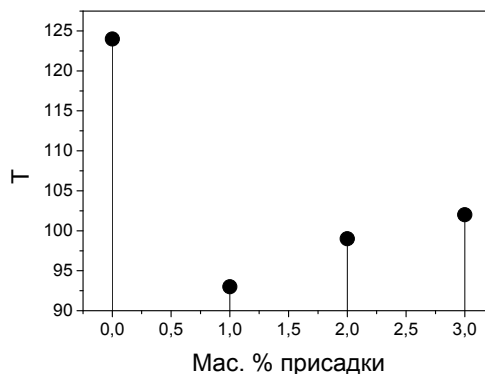


Рис. 5. Зависимость температуры в зоне трения от концентрации присадки (концентрация наночастиц шунгитового углерода 0,005 мас.%, нагрузка 2500 Н).

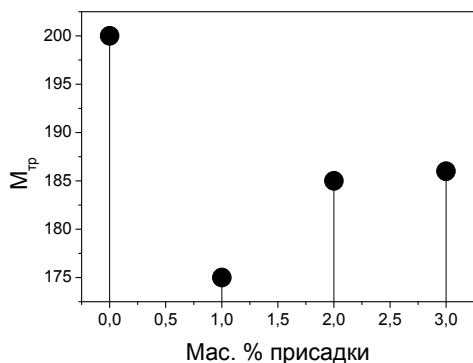


Рис. 4. Зависимость момента трения от концентрации присадки (концентрация наночастиц шунгитового углерода 0,005 мас.%, нагрузка 2500 Н).

Работа поддержана программой Минобрнауки РФ в рамках государственного задания Ивановскому государственному университету для выполнения научно-исследовательских работ на 2014-2016 гг, грант № 4.106.2014/К, и частично выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-7359.2016.9.

[1] Трибология. Физические основы, механика и технические приложения / Под. ред. Д.Г. Громаковского. — Самар. гос. техн. ун-т. Самара. — 2000.

[2] Трибология жидкокристаллических наноматериалов и систем / С.Ф. Ермаков. — Минск: Беларус. Навука. — 2011.

[3] Усольцева Н.В., Смирнова М.В., Казак А.В., Смирнова А.И., Бумбина Н.В., Ильин С.О., Рожкова Н.Н. Реологические характеристики дисперсий различных углеродных наночастиц в холестерических мезогенах как присадок к СОТС // Трение и износ. — 2015 (36), № 5, 499—505.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

¹Гологан В.Ф. (vgologan@mail.ru), ²Ажаронок В.В., ³Анисович А.Г.,
¹Бобанова Ж.И., ¹Ивашку С.Х., ¹Кроитору Д.М.

¹Институт прикладной физики АНМ, Кишинев, Молдова;

²Институт физики НАНБ, Минск, Беларусь;

³Институт технической физики НАНБ, Минск, Беларусь.

Варьированием параметров (L , C) индуктивно-емкостного устройства при осаждении твердых гальванических покрытий можно оказывать существенное влияние на кинетику электрохимического процесса, изменяя спектр переменных составляющих и формирование физико-технических свойств покрытий. Магнитно-импульсная и плазменная обработки, благодаря эффекту электропластичности, видоизменяют структуру осадков, что способствует повышению износостойкости в 2-3 раза.

Ключевые слова: индуктивно-емкостное устройство, магнитно-импульсная обработка, плазма, износостойкость.

Твердые гальванические покрытия применяются в машиностроении для повышения износостойкости и восстановления деталей машин [1].

Физико-механические свойства износостойких гальванических покрытий определяются условиями электролиза типом источника тока, составом электролита, режимами осаждения и после-

дующей обработкой (механической, термической, магнитно-импульсной, плазменной и др.).

Наибольшее распространение в машиностроении получил стандартный электролит хромирования (CrO_3 — 25 г/л H_2SO_4 — 2,5 г/л), в котором можно осаждать блестящие покрытия (плотность тока 5.0-6.0 kA/m^2 , температура — 50-60 $^\circ\text{C}$) с мик-

ротвердостью 8,5-10,0 ГПа, удовлетворяющие требованиям производства, при этом скорость осаждения составляет 30-32 мкм/час [1]. Эти условия осаждения на протяжении длительного периода времени не претерпевали изменений. Для повышения скорости осаждения и износостойкости покрытий было предложено индуктивно-емкостное устройство (параллельное соединение индуктивности (L) и емкости (C) соединенное последовательно в гальваническую цепь [2], которое при оптимальных значениях L, C позволило увеличить плотность тока до 8,5-10,0 кА/м² ($H_m = 11,0$ ГПа), в результате которого скорость осаждения возросла до 85 мкм/час и износостойкость покрытий увеличилась в 2 раза при выбранных условиях лабораторных и производственных испытаниях. Подбором параметров индуктивно-емкостного устройства (ИЕУ) у покрытий, осажденных из тетрахроматного электролита [1], которые применялись для декоративных целей, микротвердость возросла до 8,0 ГПа, а их износостойкость повысилась до уровня покрытий из стандартного электролита, осажденных без ИЕУ. Применение ИЕУ позволило впервые реализовать технологический процесс восстановления гильз цилиндров двигателя КАМАЗ на автоматической линии, обеспечив необходимое сцепление и износостойкость железоникелевого покрытия. Механическую обработку целесообразно проводить алмазными инструментами, так как при абразивной обработке покрытий образуется дефектный слой с меньшим сопротивлением износу.

Для повышения износостойкости покрытий, перспективным является импульсное воздействие электронно-магнитных полей, малоэнергетической (холодной) плазмы и др. [3,4].

Высокочастотную магнитно-импульсную обработку хромовых покрытий проводили модулированием по амплитуде в синусоидальном электромагнитном поле с частотой $f = 5,28$ МГц, амплитудные значения напряженностей магнитной и электрической составляющих поля достигали 17960 В/м и 835 А/м соответственно.

Установлено, что магнитно-импульсная обработка (МИО) благодаря эффекту электропластичности, оказывает влияние на структуру, микротвердость и остаточные напряжения, вызывает ликвидацию микротрещин и других микродефектов и степень влияния связана с условиями формирования осадка хрома при электролизе. Поэтому, варьированием условиями электролиза и МИО, можно обеспечивать формирование новой структуры и физико-механических свойств осадков, существенной отличающихся от исходных.

Для воздействия плазмы, также было использовано оборудование на основе высокочастотного генератора ($f = 5,28$ МГц), которое позволило осуществлять обработку образцов неравновесной холодной плазмой с емкостным разрядом при низких давлениях ($P \sim 1$ Тор) в воздушной среде

Как при МИО, воздействие плазмы вызывало аналогичные структурные изменения хромовых покрытий. Микротвердость уменьшалась на 1-1,5 ГПа, что свидетельствует о снижении их хрупкости.

В результате МИО и воздействия плазмы износостойкость хромовых покрытий увеличилась в 2-3 раза.

Для проведения исследований пар трения использовали методики, разработанные в ИМАШе Р.М. Матвеевским и его учениками [5].

[1] Гальванические покрытия в машиностроении под редакцией М.А.Шлугера. – Машиностроение, - Т. 1. – 1985.

[2] S4 462159. Устройство для электрохимических процессов. Гологан В.Ф., Унгурияну В.М. – 1990.

[3] Анисович А.Г., Румянцев И.Н., Морисович Е.И. Ажаронов В.В., Гончарук С.В. Изменение структуры чугуна СЧ35 в импульсном высокочастотном магнитном поле. //Электронная обработка материалов. – 2009(45), № 2, 7-26.

[4] Анисович А.Г., Ажаронов В.В., Басалай А.В., Гончарук С.В., Филатов И.И., Чивчик Н.И. Трансформация структуры меди под воздействием низкотемпературной плазмы воздуха. //Инженерно-физический журнал, - 2013. (89), №3, 731-738.

[5] Матвеевский Р.М., Буяновский И.А., Лозовая О.В. Противозадирная стойкость смазочных сред при трении в режиме граничной смазки. М. Наука. – 1978.

ЖИРНЫЕ КИСЛОТЫ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ПРОТИВОИЗНОСНЫХ ПРИСАДОК К ТОПЛИВАМ ДЛЯ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Горюнова А.К., Шаталов К.В., Лихтерова Н.М., Кондратенко В.В.

ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны РФ», Москва, Россия.
(25gosniihim@mil.ru)

В докладе представлены результаты сравнительного анализа действия противоизносной присадки к топливам для реактивных двигателей НТЕС 580 и жирных кислот растительного происхождения. Показано, что в одинаковой концентрации жирные кислоты более эффективно улучшают смазывающие свойства гидроочищенных керосиновых фракций, чем применяющаяся в настоящее время американская присадка НТЕС 580.

Ключевые слова: гидроочищенная керосиновая фракция, смазывающие свойства, противоизносные присадки, жирные кислоты.

В настоящее время более 55% топлив для реактивных двигателей вырабатывается на основе процессов гидроочистки и гидрокрекинга. Известно, что гидрогенизационные процессы ухудшают противоизносные свойства, что сказывается на ресурсе работы плунжерных насосов топливных агрегатов авиационных газотурбинных двигателей. Особенность топливных насосов – смазывание сопряженных деталей в них самим же топливом, которое они нагнетают.[1].

Наиболее эффективным способом улучшения противоизносных свойств керосиновых фракций является введение противоизносных присадок. За рубежом применялись присадки на основе синтетических жирных кислот, эфиров, димеров и тримеров жирных кислот [2]. В течение длительного времени в СССР, а затем в России в качестве противоизносной присадки к авиакеросинам применялась смесь очищенных моно- и бициклических нафтеновых кислот с молекулярной массой 180 – 230, получаемых высоковакуумной дистилляцией обезмасленного асидола – продукта выщелачивания нафтеновых кислот из фракций бакинских нефтей. В качестве примесей они содержали до 5% ароматических и до 20% жирных кислот. Такая смесь нафтеновых кислот под маркой ДНК (она же К) вырабатывалась в г. Баку (Азербайджан) по ГОСТ 13302-77 «Кислоты нефтяные. Технические условия».

По техническим причинам отечественные нефтеперерабатывающие предприятия с середины 2000-ых годов отказались от использования присадки ДНК и стали использовать в качестве противоизносной присадку НІТЕС 580, выпускаемую фирмой Afton Chemical (США). В условиях экономических санкций со стороны США и стран Европейского Союза зависимость производства топлив для реактивных двигателей от поставок из-за рубежа недопустима и диктует необходимость создания отечественной противоизносной присадки к авиационным топливам.

Целесообразной является возможность вовлечения растительных видов сырья, богатого жирными кислотами. С этой целью были выбраны три образца жирных кислот растительного происхождения различного состава. В ходе проведения исследования методом газовой хроматографии был установлен состав выбранных образцов (табл.1).

Как следует из приведенных данных, образцы в наибольшем количестве содержат кислоты C₁₈, более 90% из которых имеют двойные непредельные связи.

Таблица 1. Содержание жирных кислот в образцах

Число атомов углерода в кислоте	Образец 1	Образец 2	Образец 3
6 - 17	4,06	5,42	2,22
18	84,8	67,48	83,63
19 - 24	11,14	27,1	14,15

Исследование влияния вышеуказанных образцов присадок на противоизносные свойства керосиновой фракции, полученной процессом стандартной гидроочистки, проводили на аппарате ВОСЛЕ 100 по ГОСТ Р 53715 «Топлива авиационные для газотурбинных двигателей. Метод определения смазывающей способности на аппарате шар-цилиндр (ВОСЛЕ)», идентичному методу ASTM D 5001-2008. Оценку вели в соответствии со статистическими данными по значению диаметра пятна износа 0,51-0,70 мм. Результаты сравнительных испытаний полиненасыщенных жирных кислот и присадки НІТЕС 580 подтвердили высокую эффективность используемых в качестве противоизносной присадки полиненасыщенных жирных кислот (табл.2).

Таблица 2. Влияние жирных кислот и присадки НІТЕС 580 на противоизносные свойства гидроочищенной керосиновой фракции

Количество введенной присадки, % масс.	Диаметр пятна износа, мм			
	НІТЕС 580	Образец 1	Образец 2	Образец 3
без присадки	0,75			
0,003	0,68	0,51	0,52	0,54

Проведенные исследования показали, что смесь жирных кислот растительного происхождения в концентрации 0,003% масс. эффективно улучшают смазывающую способность гидроочищенных керосиновых фракций: диаметр пятна износа при исследовании присадки НІТЕС 580 уменьшился на 9%, тогда как при исследовании жирных кислот растительного происхождения диаметр пятна износа стал меньше на 30%.

[1] Дубовкин, А.Ф. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив. Справочник / А.Ф. Дубовкин, В.Г. Маланичева, Ю.П. Массур, Е.П. Федоров – М.: Химия, 1985. – 240 с.

[2] Вишнякова, Т.П. Стабилизаторы и модификаторы нефтяных дистиллятных топлив / Т.П. Вишнякова, И.А. Голубева, И.Ф. Крылов, О.П. Лыков. – М.: Химия, 1990. – 192 с.

ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕХАНИЗМОВ ПО СОВОКУПНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИНАМИКИ, ИЗНАШИВАНИЯ, УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Гриб В.В. (grib-vladimir.g@ya.ru), Петрова И.М.

ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» (МАДИ).

Рассматривается метод решения задачи прогнозирования изменения технического состояния машины в результате протекания взаимосвязанных процессов: изнашивания, динамики, усталостной прочности. Результаты решения необходимы для планирования системы ремонта и технического обслуживания машин.

Ключевые слова: надежность, износ, динамика, усталостная прочность.

Обеспечение безопасной эксплуатации многочисленного парка машин и оборудования, разработка рациональной системы ремонта и технического обслуживания, технологии и объема ремонтных операций неразрывно связаны с необходимостью оценки технического состояния объектов и прогнозированием показателей надежности на предстоящий период эксплуатации. Техническое состояние изменяется во времени в результате протекания деградационных процессов: старения, коррозии, изнашивания, накопления усталостных повреждений, необратимых деформаций в элементах конструкции [1,2]. В зависимости от вида и функционального назначения машины за критерии предельного состояния принимают: невозможность выполнения изделием заданных функций, приводящая к опасной эксплуатации (потеря прочности элементов конструкции, заклинивание механизмов, несрабатывание систем сигнализации, нарушение кинематических связей, критическое увеличение нагрузочно-температурного режима работы машины, увеличение времени и пути торможения, пожароопасность, невыполнение требований надзорных органов и др.; нарушение функций механизмов (точности позиционирования исполнительных органов, нарушение точности приборов, изменение передаточной функции механизмов и т.д.; потерю прочности элементов конструкции в результате изменения нагруженности, уменьшения живого сечения деталей; критическое увеличение скорости изнашивания элементов конструкции, появление триботехнических отказов, нарушение режимов смазки, схватывание при трении; ухудшение качества, экономичности эксплуатации.

Для механических систем эти критерии в первую очередь обусловлены динамикой механизмов, формоизменением элементов конструкции, изнашиванием трибосопряжений, потерей прочности. Показатели этих процессов взаимосвязаны и взаимно обуславливают друг друга, имеют вероятностный характер.

Под **динамикой** понимают движение механической системы под действием заданных сил. Наиболее универсальным способом решения этой задачи являются методы расчета в бесконечно малых перемещениях, основанные на использовании уравнений Лагранжа второго рода. Интегрируя это

уравнение, получают закон движения механической системы, реакции в кинематических парах, усилия, действующие на звенья механизма. Решение задачи осуществляется численными методами, т.е. последовательным рассмотрением статического состояния системы через малый промежуток времени или малое изменение обобщенной координаты. При учете зазоров в кинематических парах механизма, являющихся следствием процессов изнашивания, коррозии, остаточной деформации, появляются дополнительные степени свободы. В кинематической цепи появляется возможность ее размыкания и движения сопряженных звеньев в поле зазора между ними с последующим ударным взаимодействием (например, перекладка поршня в цилиндро-поршневой группе, пальца относительно втулки в подшипнике).

Под **изнашиванием** в общем случае понимают процесс постепенного формоизменения детали в результате разрушения и отделения материала с поверхности трения, накопления остаточной деформации при трении. Изнашивание трибосопряжений приводит к потере кинематической точности механизмов, увеличению динамических и ударных нагрузок, вибрации, шума, потере прочности деталей и другим изменениям технического состояния машин. Природа и виды разрушения поверхностей при трении разнообразны и зависят от свойств поверхностных слоев материалов, режимов и условий работы трущихся деталей, смазки, конструкции узлов трения. Поэтому при моделировании указанных процессов необходимо предварительное изучение объектов и выявление наиболее вероятного вида изнашивания. Для математического описания формоизменения и определения зазоров в трибосопряжениях рассматриваются упрощенные модели. Для векторной интерпретации процесса формоизменения вводится понятие поля износа. Изменение формы детали описывается движением множества точек, лежащих на поверхности трения.

При длительном воздействии циклически изменяющихся нагрузок, характерном для многих машин, происходит изменение механических и физических свойств материалов (**усталость материалов**). Изменение состояния материала при усталостном процессе отражается на макроструктуре, микроструктуре, субструктуре и в конечном

итоге на механических свойствах как в объеме материала, так и на поверхности деталей. Эти изменения зависят от исходных свойств, вида напряженного состояния, внешней среды. В зависимости от условий нагружения и окружающей среды в эксплуатации реализуются различные механизмы накопления повреждений и разрушения

В процессе эксплуатации осуществляется сложное взаимодействие механизмов нагружения и повреждения деталей машин и элементов конструкций по ряду критериев: прочности, износостойкости, коррозионной стойкости и др.

Рассмотренные процессы взаимосвязаны и взаимно обуславливают друг друга. Рассмотрение их в изоляции друг от друга существенно упрощает картину изменения технического состояния объекта.

Общий прием решения задачи изменения технического состояния механической системы заключается в дискретизации ее во времени и про-

странстве и рассмотрении ряда последовательных состояний через задаваемый достаточно малый промежуток времени (шаг наработки). Скорость изменения состояния на этом отрезке времени принимается зависящей от состояния системы, её свойств и режимных параметров в начале данного отрезка времени и неизменной на нем. В конце каждого отрезка времени находится новое техническое состояние, по которому определяются скорости и векторы перехода для последующего отрезка времени и т.д. Ресурс механической системы определяется достижением вектора состояния предельной величины по каждому критерию с заданной вероятностью.

[1] Гриб В.В. Диагностическое моделирование механических систем. Научное издание. : монография/В.В.Гриб – СПб.: «Экспертные решения», 2014 – 448 с.

[2] Трение, износ и смазка (трибология и триботехника)/ Под ред. А.В.Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003 – 576 с.

СМАЗОЧНЫЕ СВОЙСТВА ПИЩЕВЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ

Григорьев А.Я. (aygri@tut.by), Ковалёва И.Н., Кудрицкий В.Г.,
Гуцев Д.М., Мышкин Н.К.

¹Институт механики металлополимерных систем им.В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь.

Представлены результаты сравнительных триботехнических испытаний наиболее распространенных пищевых растительных масел.

Ключевые слова: растительные пищевые масла, триботехнические характеристики, физико-механические свойства.

Введение. Растительные масла все чаще рассматриваются в качестве альтернативы смазочным материалам из нефтепродуктов. Первоначальной причиной их внедрения являлась необходимость решения экологических проблем, однако проведенные исследования показали, что их триботехнические характеристики не хуже, а в ряде случаев даже лучше, чем у традиционных минеральных масел. Это существенно изменило отношение к смазочным материалам на основе растительного сырья и инициировало исследования по поиску присадок к ним, а также расширения области применения за традиционными пределами пищевой и медицинской промышленности.

К сожалению, в публикациях встречаются противоречивые данные о триботехнических характеристиках растительных смазок. Анализ работ в этой области показал, что такая ситуация обусловлена как расхождениями в методах их испытаний, так и тем, что свойства масел одного вида могут существенно отличаться. Особенности их получения существенно влияют как на физико-механические характеристики, так и состав жирных кислот.

Цель работы заключается в сравнительной оценке смазочных свойств наиболее распространенных видов растительных пищевых масел. Вы-

бор пищевых масел в качестве объекта исследований объяснялся их более стабильным составом.

Результаты исследований. Испытывались образцы оливкового; кукурузного; подсолнечного и рапсового пищевых масел. В качестве объекта сравнения было выбрано минеральное масло И-20 (ГОСТ 20799-88). Оценка триботехнических свойств проводилась на четырехшариковой машине ЧШМ-К1. Методика испытаний соответствовала ГОСТ 9490. В ходе экспериментов определялись критическая нагрузка, нагрузка сваривания показатель износа при нагрузке 20 и 40 кгс, индекс задира. В дополнение к триботехническим характеристикам были определены ряд функционально значимых физико-механические свойства объектов исследования: плотность, вязкость, температура вспышки и застывания. Основные данные о триботехнических характеристиках исследованных масел приведены в таблице.

Анализ полученных данных позволил сделать следующие выводы.

Установлено, что растительные масла соответствуют или превосходят минеральное масло И-20 по несущей способности на величину до 60%, обладают в 1,3-2,3 раза более эффективными противозносными свойствами, характеризуются в 2,3 раза большим индексом задира.

Таблица. Основные триботехнические характеристики исследованных масел.

Смазывающие материалы	Триботехнические характеристики			
	Крит. нагрузка, кгс	Износ при 20 кгс, мм	Коэф. трения	Индекс задира
Оливковое	40	0,68	0,065	35
Кукурузное	75	0,66	0,050	36
Подсолнечное	67	0,72	0,070	35
Рапсовое	62	0,70	0,060	35
И20	40	0,89	0,12	15

С помощью факторного анализа проведен анализ взаимосвязи триботехнических характеристик и физико-механических свойств смазочных материалов. Обнаружена корреляция между триботехническими характеристиками, кинематической вязкостью масел, их температурой вспышки и содержанием олеиновой кислоты.

Экспериментально установлено, что микротвердость поверхностей трения при истирании в растительных смазках в среднем на 23% выше, чем при истирании в среде минерального масла. Показано, что эти отличия обусловлены тем, что растительные масла, обладающие меньшей молекулярной массой, оказывают меньшее расклинивающее действие при формировании дефектного слоя за счет эффекта Ребиндера. Это приводит к меньшему снижению твердости поверхностного слоя и повышению его износостойкости. Лучшие теплофизические свойства способствуют большей десорбционной стойкости растительных масел, что также уменьшает износ за счет большего наклепа поверхностных слоев.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ и ГКНТ Беларуси (номер проекта Т15ЛИТ-027).

ПРОТИВОПИТТИНГОВЫЕ СВОЙСТВА СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Гришин Н.Н., Степанова С.Е.

ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», Москва, Россия.

(25gosnihim@mil.ru)

Приведены условия возникновения и механизм процесса питтингового разрушения сопряженных поверхностей металла, приборы, методы изучения этого показателя качества смазочных материалов. Представлены результаты оценки и нормы по значениям показателей усталостного разрушения моторных, газотурбинных, трансмиссионных и редукторных масел.

Ключевые слова: метод оценки, питтинг, моторные масла, газотурбинные масла, трансмиссионные масла, редукторные масла, присадки.

Питтинг один из видов износа – усталостное разрушение (выкрашивание) сопряженных поверхностей металла пар трения (тарелки толкателя клапана двигателя внутреннего сгорания, зубьев шестерен, в т.ч. гипоидных трансмиссий и редукторов, шариковых, роликовых, игольчатых подшипников качения и др.) с образованием т.н. питтинговых язв в результате воздействия переменных контактных нагрузок, в т.ч. в условиях сочетания трения качения и трения скольжения.

Механизм процесса разрушения включает образование межкристаллитных трещин в поверхностном слое в результате переменных нагрузок и (или) циклического изменения вида трения и превращение этих трещин вследствие расклинивающего действия смазочного материала, приводящего к выкрашиванию частиц металла, в каверны.

Противопиттинговые свойства смазочных материалов зависят от их химического, углеводородного и фракционного состава, определяющих их вязкостные характеристики, поверхностную и химическую активность. Присутствие воды в смазочном материале ускоряет развитие питтинга.

Оценку питтинговых свойств моторных масел, осуществляют на безмоторных стендах СИ.010 или СКТ-НАМИ. Суть методов определения противопиттинговых свойств масел для автомобильных бензиновых двигателей и для автомобильных тракторных и комбайновых дизелей заключается в визуальной оценке питтинга поверхности тарелки толкателя клапана после испытаний опытных образцов. Конструкция стендов практически идентична (рис. 1) – включает электродвигатель, приводящий во вращение через редуктор распределительный вал клапанной коробки (серийного автомобильного двигателя) с шестью парами трения (тарелка толкателя клапана – кулачок распределительного вала), оборудованной устройствами для разбрызгивания и регулирования температуры испытываемого образца, и масляный резервуар с подогревателем.

Испытания масла проводят в течение 33 ч (~3 млн циклов) непрерывно или с перерывами, но не более чем за 6 рабочих дней, при скорости вращения распределительного вала 1500 мин⁻¹, температуре масла в клапанной коробке 150°C и нагрузке на тарелку толкателя клапана 1850 Н.

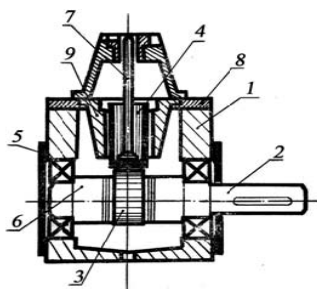


Рис. 1. Схема испытательного узла стенда СИ.010
1 – корпус; 2 – вал; 3 – кулачок; 4 – толкатель; 5 – крышка;
6 – втулка; 7 – шток толкателя; 8 – плита;
9 – направляющая толкателя.

Оценивают противопиттинговые свойства в основном, по количеству тарелок толкателей клапана, пораженных питтингом в результате испытаний опытного образца. Моторное масло считается выдержавшим испытания, если усталостное разрушение отмечено не более чем на двух тарелках толкателя клапана.

Результаты оценки противопиттинговых свойств некоторых образцов товарных масел на стенде СИ.010 приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты оценки противопиттинговых свойств некоторых моторных масел на стенде СИ.010

Масло				
М-8В	М-8В ₁	М-6 ₃ /10Г ₁	М-10Г ₂ К	М-10ГИ
Количество тарелок толкателей с питтингом				
1	3	5	1	4

Коэффициент корреляции результатов оценки противопиттинговых свойств моторных масел на стендах СИ.010 и СКТ-НАМИ составляет 0,98.

Противопиттинговые свойства трансмиссионных и редукторных масел оценивают на четырехшариковой машине трения (ЧШМ) по времени до питтинга верхнего шарика и на машине IAE по количеству циклов нагружения до питтинга хотя бы одного зуба ведущей шестерни. ЧШМ для испытания противопиттинговых свойств масел дополнительно оборудуют системой автоматического отключения приводного электродвигателя при первых признаках усталостного разрушения верхнего шарика. Испытания опытного образца масла на ЧШМ проводят при температуре 20°C, осевой нагрузке на верхний шарик 6000 Н и частоте его вращения 1500 мин⁻¹ до автоматической остановки машины.

Трансмиссионные и редукторные масла по противопиттинговым свойствам различают в соответствии с результатами испытаний на ЧШМ, приведенными в табл. 2.

Таблица 2. Условные нормы по показателю противопиттинговое свойство трансмиссионных и редукторных масел

Время работы ЧШМ до питтинга верхнего шарика, мин				
менее 35	от 35 до 40	от 40 до 45	от 45 до 50	свыше 50
очень плохо	плохо	удовлетворительно	хорошо	очень хорошо

Испытания противопиттинговых свойств на машине IAE проводят при температуре испытуемого образца на входе в зацепление шестерен 110°C и скорости его подачи в зону трения 0,57 дм³/мин, частоте вращения ведущей шестерни 1000 мин⁻¹ и контактном напряжении на поверхности ее зубьев 2400 МПа до появления питтинговых язв по всей ширине хотя бы одного зуба, или единичных поражений на двух и более не расположенных рядом зубьях ведущей шестерни. Проводят 3–4 параллельных испытания, каждое из которых продолжается от 8 ч до 35 ч в зависимости от качества масла. Противопиттинговые свойства масел оценивают по усредненному количеству циклов нагружения от момента появления первых признаков питтинга на зубьях ведущей шестерни (начало вибрации) до появления питтинга по всей ширине хотя бы одного зуба ведущей шестерни (характерный металлический стук). Достаточность уровня противопиттинговых свойств трансмиссионных и редукторных масел определяют по результатам сравнительных испытаний опытного образца с его товарным прототипом.

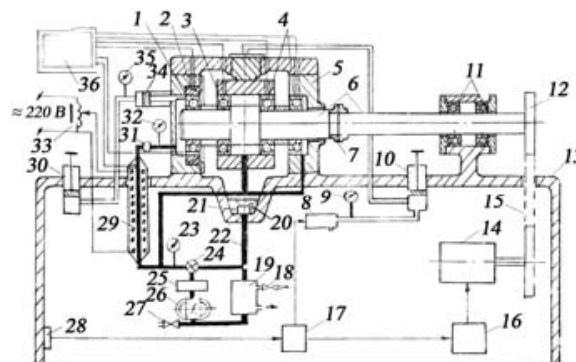


Рис. 2. Схема установки УСМ-1

1 – контрольный подшипник; 2 – узел асимметричного нагружения; 3, 4 – рабочие подшипники; 5 – оснастка; 6 – валы; 7 – муфта; 8 – электромагнитный клапан; 9, 23, 32, 35 – манометры; 10 – пресс радиального нагружения; 11 – коренные подшипники вала; 12 – шкив; 13 – станина; 14 – электродвигатель; 15 – клиноременная передача; 16 – магнитный пускатель; 17 – автоматическое устройство для отключения электродвигателя при появлении выкрашивания; 18 – кран системы охлаждения; 19 – холодильник; 20 – масляный бак; 21, 25, 31 – фильтры; 22 – масляная магистраль; 24 – перепускной кран; 26 – масляный насос; 27 – кран слива масла; 28 – датчик вибраций; 29 – нагревательное устройство; 30 – пресс осевого нагружения; 33 – регулятор напряжения; 34 – гидроцилиндр; 36 – потенциометр ЭПП-09МЗ

Для оценки противопиттинговых свойств масел для газотурбинных двигателей разработан метод, суть которого заключается в определении времени работы шарикового подшипника на установке УСМ-1 до наступления усталостного разрушения поверхности трения. Установка УСМ-1 (рис. 2) представляет собой приводной электродвигатель на валу, которого смонтирован один контрольный и три рабочих подшипника № А-208 или № 5208 по ГОСТ 520. Испытания проводят при предполагаемой максимальной температуре применения опытного образца, частоте вращения подшипников 5000 мин⁻¹, асимметричной осевой

нагрузке на контрольный подшипник 3400 Н, радиальной нагрузке на контрольный и каждый рабочий подшипник в течение первых 30 мин – по 3500 Н, последующих нагрузках на каждый подшипник в течение первого и последующих часов испытаний, реализуемых по схеме: 17 000 Н – 4 мин; 19 000 Н – 8 мин; 15 200 Н – 22 мин; 18 000 Н – 12 мин; 14 300 Н – 14 мин. Проводят три параллельных испытания, каждое – на новом контрольном подшипнике.

Опытный образец масла для газотурбинных двигателей признается выдержавшим испытания в том случае, если среднее время работы контрольных подшипников до питтинга при его применении больше времени работы этих подшипников при использовании товарного прототипа.

Сходимость результатов оценки противопиттинговых свойств масел различного назначения предлагаемыми методами с $P = 0,95$ не превышает 30 % значения измеряемых величин.

С целью улучшения противопиттинговых свойств смазочных материалов в их состав вводят присадки – соединения органические гетероатомные, содержащие в своем составе в различных сочетаниях N , P , F и некоторые металлы, уменьшающие усталостное разрушение сопряженных поверхностей трения и питтинговую коррозию за счет их физико-химического модифицирования. В зависимости от условий эксплуатации пар трения в качестве противопиттинговых присадок используют соединения различного состава: диалкилдитиофосфат цинка – в моторных маслах (присадки А-22, ДФБ, ДФ-11 и др.); хлорированные парафины, производные имидазолина, цинко-бариевая соль моноизобутилового эфира арилдитиофосфиновой кислоты (присадка ЭФО) – в трансмиссионных и редукторных маслах.

[1] Гришин Н.Н., Середа В.В. Энциклопедия химмотологии. — М.: Издательство «Перо». — 2016, 960 с.: ил.

ТВЕРДЫЕ СМАЗОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Гришин Н.Н., Орешенков А.В.

ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», Москва, Россия.
(25gosniihim@mil.ru)

Приведены определение, назначение, состав, технология нанесения, номенклатура, физико-химические свойства и эксплуатационные характеристики твердых смазочных покрытий для сопряженных поверхностей узлов трения техники, работающей в экстремальных условиях.

Ключевые слова: твердое смазочное покрытие, коэффициент трения, твердость, адгезия, потеря массы, время истирания, условия применения, узел трения, техника.

Твердые смазочные покрытия являются элементом конструкции подшипника скольжения и представляют собой жидкие технологические составы из порошкообразных смазочных материалов, связующих и растворителей, толщина которых после нанесения на поверхность трения (пневматическим распылением, окунанием, кистью) не превышает 20÷40 мкм. Покрытия такого вида предназначены для снижения коэффициента трения скольжения, износа сопряженных деталей и фреттинг-коррозии при возвратно-поступательном движении, предотвращения задира, заедания и схватывания в различных узлах трения скольжения, работающих в экстремальных условиях (при температуре от минус 200 до 600°C, в глубоком вакууме до 10 пПа, в жидком кислороде и азоте, при высоком уровне радиации до 10^6 Гр и др.), и пригорания резиновых манжет к металлическому валу, а также для применения при обработке металлов [1].

В качестве порошкообразного смазочного материала применяют твердые слоистые материалы с низким коэффициентом трения (графит, CaI_2 , PbI_2 , $CuCl$, $PbCl_2$, AgI , Ag_2SO_4 , BN, вермикулит, слюда, тальк, диалкогениды переходных металлов, на-

пример, MoS_2 , WS_2 , $MoSe_2$, WSe_2 , WTe_2 и др. Эффективность применения антифрикционного компонента обеспечивается степенью его чистоты и размером частиц.

В качестве связующего используют: нитраты целлюлозы, поливинилацетали и др. (термопластичные – образуют покрытие после высушивания); глифталевые, алкидно-акриловые, уралкидные, мочевиноформальдегидные, меламиноформальдегидные, эпоксиэфирные смолы (термореактивные – образуют покрытия при температуре выше 100°C за счет протекания реакций полимеризации); их смеси [2]. Для продления долговечности твердые смазочные покрытия наносят на металлические поверхности после их обезжиривания, пескоструйной, кислотной или бихроматной обработки, фосфатирования, азотирования, анодирования и др.

В настоящее время разработан широкий ассортимент отечественных твердых смазочных покрытий: ВНИИ НП-209, ВНИИ НП-212, ВНИИ НП-213, ВНИИ НП-229, ВНИИ НП-230, ВНИИ НП-251, ВНИИ НП-504М, ВНИИ НП-512, ВНИИ НП-556М, ВНИИ НП-579, ЭОНИТ-3 [3]. Твердые

смазочные покрытия характеризуются комплексом физико-химических свойств:

- коэффициентом трения скольжения, составляющим 0,02-0,08;
- относительной твердостью, определяемой по ГОСТ 5233, значение которой в зависимости от марки покрытия находится в диапазоне от 0,4 до 1 при 20°C;
- адгезией к металлической основе, определяемой по ГОСТ 15140 методом решетчатых и параллельных надрезов, составляющей в основном I₂ балла;
- потерей массы из чашечек-испарителей, определяемой по ГОСТ 9566 при температуре 350°C в течение 4 ч, не превышающей 10 %.

Твердые смазочные покрытия относительно долговечны; время их истирания, определяемое по ГОСТ 11613, при начальном контактном напряжении по Герцу 250,0 МПа составляет от 60 до 1000 мин.

Применяют твердые смазочные покрытия, в основном, в узлах трения авиационной и ракетно-

космической техники, однако они также эффективны при высоких удельных нагрузках в процессах холодной штамповки, резания металла, волочения проволоки, нарезания резьбы, особенно в случаях медленно окисляющихся (легированная сталь, титан) или склонных к налипанию (алюминий) металлов; в резьбовых соединениях, подшипниках скольжения паровых и газовых турбин, рефрижераторов; при использовании в паре трения одиановых материалов (легированная сталь по легированной стали, бронза по бронзе и др.); при высоком начальном трении в точных механизмах, где допуски малы и зазоры минимальны; и т.п.

[1] Горючие, смазочные материалы: Энциклопедический толковый словарь-справочник / Под ред. В.М. Школьникова. — М.: ООО «Издательский центр» «Техинформ» Международной Академии Информатизации. — 2007, 736 с.

[2] Гришин Н.Н., Серeda В.В. Энциклопедия химмотологии. — М.: Издательство «Перо». — 2016, 960 с.: ил.

[3] Громова Л.Г. Пластичные и твердые смазочные материалы, разработанные ВНИИ НП (Каталог-справочник). — Издание третье переработанное и дополненное. — М.: ВНИИ НП. — 1976, 174 с.

ТРИБОТЕХНИКА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ

Густов Д.Ю., Густов Ю.И., Воронина И.В. (VoroninaIV@mgsu.ru)

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва, Россия.

Представлены экспериментально-расчетные триботехнические показатели рабочих органов и сопряжений строительных машин и механического оборудования, полученные на основе деформационно-топографического метода исследования шероховатых поверхностей трения.

Ключевые слова: триботехнические показатели, модели изнашивания, парциальные величины, упрочнение, износ.

Проблема повышения долговечности строительных машин и механического оборудования вызывает необходимость оценки триботехнических характеристик рабочих органов и подвижных сопряжений. С этой целью разработан деформационно-топографический метод исследования на основе гипсоцентридной и склеробатической моделей абразивного изнашивания элементов трибосистем [1,2].

Парциальные величины позволяют рассчитать степень поверхностного деформационного упрочнения (разупрочнения) K_s и предельную степень упрочнения (разупрочнения) продуктов износа K_a

$$K_s = (D_{m\gamma} / D_m)^{D_m / D_a}, \quad (1)$$

$$K_a = K_s \left[K_s^{0.5} + (K_s - 1)^{0.5} \right] \quad (2)$$

при $K_s > 1$,

$$K_a = K_s \left[K_s^2 - (K_s - 1)^2 \right] \quad (3)$$

при $K_s < 1$.

Средний прирост температуры на поверхности трения ΔT_s и продуктов износа ΔT_a , можно определить по формулам:

$$\Delta T_s = \ln K_s / \lambda, \quad \Delta T_a = \ln K_a / \lambda, \quad (4)$$

где $\lambda = 2,15 \cdot 10^{-3}$, 1 / °C – среднее значение температурного коэффициента для металлических материалов.

Температурные эффекты определяются выражениями $t_s = \Delta T_s / T_0$, $t_a = \Delta T_a / T_0$.

Коэффициент трения скольжения выражается зависимостью

$$f = D_m^{1/D_a}, \quad (5)$$

Сила трения определяется по формуле

$$T = fN = fK_s H_0 t_{PP} D_a B R_{\max}, \quad (6)$$

где H_0 – исходная микротвердость металла; t_{pp} – относительное контурное давление при полном сближении; B – ширина поверхности трения; R_{max} – максимальная высота неровностей шероховатого слоя.

Величина объёмного и линейного износа определяются соответственно выражениями

$$J_v = R_{max} B D_a \alpha V \lambda \tau / n_p, \quad (7)$$

$$J_h = R_{max} D_a V \lambda \tau / (1 + K_{TS}) (\ln K_a / K_s)^l l, \quad (8)$$

где $\alpha = 1 / (1 + K_{TS})$ – вероятность закрепления абразивной частицы на поверхности трения; V – скорость трения, м/с; n_p – число циклов до разрушения металла; t – показатель фрикционной усталости металла; l – длина поверхности трения.

Ниже представлены экспериментальные и расчётные триботехнические показатели объектов исследования.

Таблица 1. Расчетные значения нормальной нагрузки на ножи дорожной фрезы.

Материал	H_0 , кгс/мм ²	K_s	D_a	t_{pp}	R_{max} , мкм	N , кгс	Δ , %
Сталь 45	225	1,51	0,450	0,50	28,6	54,66	16,3
110Г13Л	240	1,37	0,60	0,55	15,3	41,53	11,6
И-1	600	1,21	0,440	0,55	13,42	51,45	9,5
СКБ	500	1,19	0,595	0,50	10,46	46,30	1,5
ЦН-16	550	1,18	0,540	0,55	8,62	41,6	11,5
ПЛ-400Х38ГЗРТУ	800	1,251	0,510	0,49	7,94	49,96	4,3
Э-3	460	1,208	0,420	0,58	12,4	42,00	10,6
Т - 620	820	0,90	0,620	0,60	6,28	43,1	8,2

Таблица 2. Значения износа ножей дорожной фрезы.

Материал	Сталь 45	110Г13Л	СКБ	ЦН-16	ПЛ-У40Х38-ГЗРТУ	Т-620	КБХ-45	Х-5
J_h , мм	61,56	39,06	22,4	20,69	16,31	17,10	13,44	10,43
J_l , мм	56,35	40,39	25,04	20,38	17,68	17,11	15,07	8,6
Δ , %	8,47	3,4	11,8	1,5	8,42	0	12,12	17,5

Таблица 3. Трибологические показатели осей шарниров драги.

Показатели	Наплавленные металлы						
	ВСН-12	ОМГ-Н	ВСН-6	ОЗШ-1	ОЗИ-1	НГ-2	Х-5
D_a	0,580	0,445	0,406	0,416	0,402	0,514	0,320
H_0 , МПа	7500	4700	6200	5600	7300	6500	10400
(K_s) exper	1,333	1,255	1,306	1,214	1,164	1,215	0,817
(K_s) расчет	1,322	1,239	1,216	1,222	1,213	1,281	0,857
N , Н	127,3	86,2	92,0	64,4	125,8	155,0	107,5

Основные выводы:

1. Деформационно-топографический метод позволяет определить степень трибодеформационного упрочнения (разупрочнения) поверхностных слоёв и продуктов износа, температурно-силовое нагружение поверхностей трения, коэффициент трения, объёмный и линейный износ трущихся элементов.
2. На основе полученных экспериментально-расчётных показателей даны рекомендации по выбору триботехнических материалов для рабочих органов и подвижных сопряжений

строительных машин и механического оборудования (ножи дорожных фрез, шарниры черпающего аппарата строительных драг, дробящие плиты щековых дробилок и др.)

[1] Густов Ю.И., Густов Д.Ю., Воронина И.В. Методология определения триботехнических показателей металлических материалов // Сборник докладов XVI словацко-российского семинара «Теоретические основы строительства». - М.: МГСУ, 2007. - С. 339-342.

[2] Густов Ю. И. Триботехника строительных машин и оборудования; Монография. - М: Московский государственный строительный университет. МГСУ, 2011. - 192 с.

ВЛИЯНИЕ РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ МОДЕЛИ ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ «ВАЛ–КОЛОДКА»

Даровской Г.В. (graffDAROVSKOI@yandex.ru), Кохановский В.А.,
Буракова М.А., Поляков В.Н.

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

Теоретически установлено, что в условиях гидродинамики происходит саморегуляция трибологической системы, в результате которой она приходит в состояние гидродинамического равновесия.

Ключевые слова: гидродинамика, трибологическая система, саморегуляция, гидродинамическое равновесие

Рассмотрим пару трения «вал-колодка» (рис. 1) как модель саморегуляции трибологической системы «подшипник скольжения».

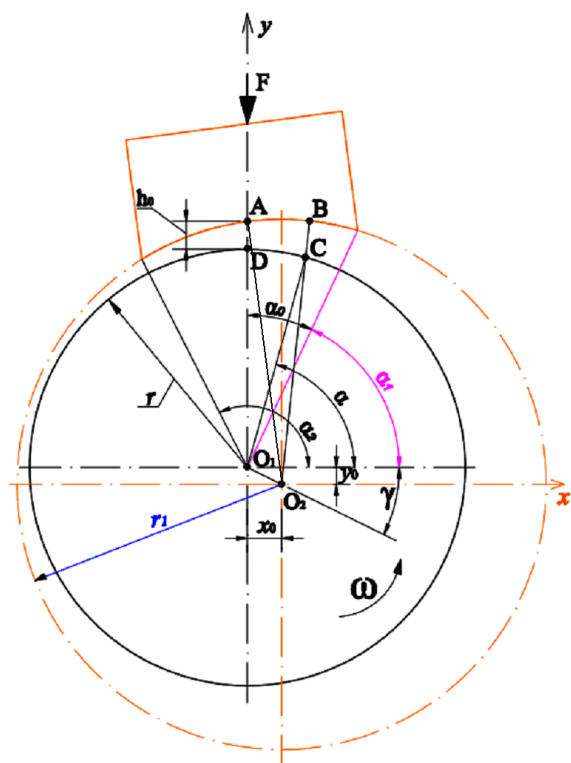


Рис. 1. Расчетная схема пары трения «вал-колодка».

Вал вращается против часовой стрелки с угловой скоростью ω . На колодку действует внешняя сила F .

В результате присутствия ЖСМ в зазоре с начальным значением толщины смазочного слоя $AD=h_0$ появляется гидродинамическое давление, которое приводит к смещению центров колодки и вала, определяемое эксцентриситетом

$$\varepsilon = \sqrt{x_0^2 + y_0^2}, \quad (1)$$

где $x_0 = r \sin \psi$ – смещение центра колодки по оси x ;

r – радиус вала;

$\angle O_1 A O_2 = \psi$ – угол поворота колодки;

$r_1 = r + \delta/2$ – радиус колодки,

где δ – величина, определяющая разницу между диаметром вала и колодки;

$y_0 = r + h_0 - r_1 \cos \psi$ – смещение центра колодки по оси y ;

$2a$ – длина зазора.

Построим функцию $h(\alpha)$, описывающую форму зазора, где α – текущий угол, которому соответствует значение

$$h(\alpha) = BC = O_2 B - O_2 C = r_1 - O_2 C.$$

После несложных преобразований получим

$$h(\alpha) = r_1 - \sqrt{r^2 + \varepsilon^2 - 2r\varepsilon \cos f(\alpha, \psi)} \quad (2)$$

где $f(\alpha, \psi) = -\arcsin\left(\frac{y_0}{\varepsilon}\right) + \alpha$.

Из-за малости ψ смещением точек входа и выхода ЖСМ в зазор в результате поворота колодки пренебрегаем и считаем, что

$$r_1 \cos \alpha_B \approx r \cos \alpha,$$

где $r_1 \cos \alpha_B$ – проекция точки B на ось x ;

$r \cos \alpha$ – проекция точки C – на ось x .

В уравнении Рейнольдса

$$\frac{dp}{dx} = 6\mu_0 U \frac{h(x) - h_m}{h(x)^3}$$

перейдем от переменной x к переменной α по формуле

$$x = r \cos \alpha. \quad (3)$$

Тогда получим

$$dx = -r \sin \alpha d\alpha. \quad (4)$$

Определим входной и выходной угол нагруженной области:

$\alpha_0 = \arcsin\left(\frac{a}{r}\right)$ – угол, соответствующий половине рабочей зоны колодки;

$$\alpha_{\text{вх}} = \alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{a}{r}\right) \quad (5)$$

$$\alpha_{\text{вых}} = \alpha_2 = \frac{\pi}{2} + \arcsin\left(\frac{a}{r}\right) \quad (6)$$

$$\alpha_{\text{вых}} = \alpha_2 = \frac{\pi}{2} + \arcsin\left(\frac{a}{r}\right) \quad (7)$$

Гидродинамическое давление будет действовать на колодку по дуге окружности вала радиусом r .

В выражениях (4–7) заменим текущий угол α на соответствующую ему длину дуги окружности

радиуса r . Как известно, длина дуги $l = r \cdot \alpha$, откуда имеем $\alpha = l/r$, $d\alpha = dl/r$.

Тогда

$$l_1 = \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{a}{r}\right) \right] \cdot r, \quad (8)$$

$$l_2 = \left[\frac{\pi}{2} + \arcsin\left(\frac{a}{r}\right) \right] \cdot r. \quad (9)$$

Делая замену переменных в выражении (2) и в уравнении Рейнольдса с учетом $U = \omega \cdot r$ уравнение примет вид

$$\frac{dp(l)}{dl} = 6\mu_0 \cdot \omega \cdot r \sin\left(\frac{l}{r}\right) \frac{h(l) - h_m}{h(l)^3}, \quad (10)$$

где h_m – минимальная толщина смазочного слоя в зазоре.

Задавая начальные значения h_0 и ψ , решая уравнение (11) с граничным условием $p(l_1) = 0$, получим эпюры гидродинамического давления в зазоре.

Рассмотрим влияние различных значений радиального зазора $\delta/2$ на величину и гидродинамическую устойчивость модели «вал–колодка».

Положим для простоты расчетов

$$K_1 = 6\mu_0 \omega \cdot r = 1.$$

Тогда уравнение (11) примет простой вид

$$\frac{dp(l)}{dl} = \sin\left(\frac{l}{r}\right) \frac{h(l) - h_m}{h(l)^3} \quad (11)$$

с граничным условием

$$p \left\{ \left[\frac{\pi}{2} - \arcsin\left(\frac{a}{r}\right) \right] \cdot r \right\} = 0. \quad (12)$$

Уравнение (11) не имеет аналитического решения. Численные решения уравнения (11) были получены с помощью стандартных пакетов символьной математики *Maple* и *MathCad*.

Несущие способности на входе в зазор и выходе из него, а также полная несущая способность масляного слоя определялась по формулам:

$$q_1 = s \cdot \int_{l_1}^{l_2} p(l) \cos\left(\frac{l}{r}\right) \cdot dl, \quad (13)$$

$$q_2 = s \cdot \int_{l_2}^{l_3} p(l) \cos\left(\frac{l}{r}\right) \cdot dl, \quad (14)$$

$$q = q_1 + q_2, \quad (15)$$

где l_3 – положение h_0 ; s – ширина колодки, равная 0,01 м.

Расчет моментов, вращающих колодку на входе в зазор и выходе из него, а также суммарного момента, вращающего колодку вокруг оси, про-

ходящей через её центр, проводился по схеме, изображенной на рис. 2, откуда

$$M_1 = q_1 \cdot (r + 0,5 \cdot EL), \quad (16)$$

$$M_2 = q_2 \cdot (r + 0,5 \cdot EL), \quad (17)$$

$$M = M_1 + M_2, \quad (18)$$

где EL – высота колодки, равная 0,008 м.

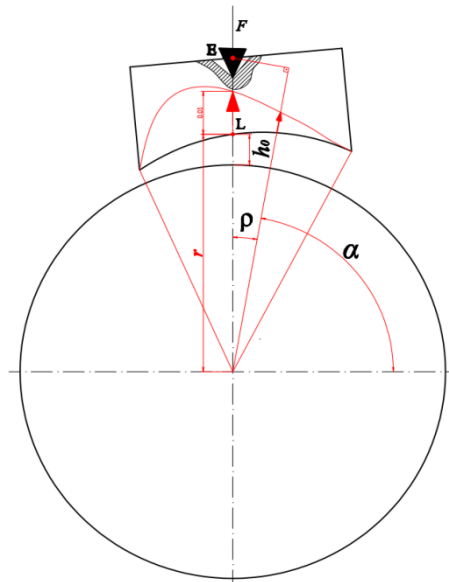


Рис. 2. К расчету вращающих моментов, действующих на входе и выходе в зазор

Расчеты характеристик гидродинамического контакта показали, что момент M_1 положительный и вращает колодку против часовой стрелки по ходу вращения вала, таким образом поворачивая колодку на угол ψ и расширяя зазор. Момент M_2 отрицательный, действует по часовой стрелки против направления движения вала, пытаясь вернуть колодку в исходное положение. Суммарный момент вращения положительный, так как $M_1 > M_2$, поэтому колодка будет постепенно поворачиваться, а зазор расширяться. По мере втягивания масляного клина в зазор гидродинамическое давление будет возрастать, а максимум давления смещается в сторону линии приложения нагрузки, при этом с увеличением угла поворота колодки h_m уменьшается и стремится к значению h_0 . Возрастает отрицательный момент M_2 и при определенном угле поворота $\psi_{\text{равн}}$ наступает равенство моментов M_1 и M_2 , а $h_m = h_0$. Положение максимума давления находится на линии приложения внешней нагрузки. Если по каким-то причинам достигнутое гидродинамическое равновесие в контакте нарушается и угол $\psi > \psi_{\text{равн}}$, вращательный момент M_2 станет больше, чем M_1 , в результате чего колодка будет возвращаться в равновесное положение.

РЕМОНТ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ УЗЛОВ МЕТОДОМ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Даровской Г.В. (graffDAROVSKOI@yandex.ru), Дюргеров Н.Г., Шеховцов К.В.

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

Авторами разработана технология восстановления изношенных поверхностей методом дополнительных деталей, который заключается в прикреплении специально изготовленного нового элемента (дополнительной детали) по форме соответствующего изношенному участку.

Ключевые слова: восстановление, детали машин, метод дополнительных деталей.

Сопряжённые детали узлов механизмов, перемещающиеся друг относительно друга в процессе работы, подвергаются изнашиванию, путём разрушения поверхностного слоя металлов за счёт сил трения. [1, 2].

В настоящее время существует порядка 30 фундаментальных, а всего с учетом «ветвления» - более 200 способов восстановления и упрочнения деталей [3].

При этом ремонт для каждой конкретной детали индивидуализирован и трудно поддается автоматизации. Одним из эффективных способов решения данной проблемы является ремонт методом дополнительных деталей (МДД).

Сущность этого метода состоит в том, что изношенную поверхность детали предварительно обрабатывают и затем вместо наплавки или другого способа восстановления размеров детали прикрепляют специально изготовленный новый элемент – дополнительную деталь (ДД), которая по форме и размерам соответствует изношенному участку основной детали и изготавливается из материала с необходимыми служебными свойствами [1].

Преимущества МДД перед другими способами восстановления деталей заключаются в следующем:

- возможность реализации принципа восстановления трибоузлов по эпюрам износа и деформаций, реализация принципа равной износостойкости;
- уменьшение сварочных деформаций и напряжений;
- возможность применения единой и массовой технологии восстановления деталей, обеспечение высокой производительности ремонта;
- экономия сварочных и наплавочных материалов, электроэнергии;
- применение дополнительных деталей из композиционных материалов;
- упрощается технология предварительной подготовки деталей по сравнению с окончательной обработкой после наплавки или других способов прикрепления ДД;
- изготовление трибоузлов из плохо свариваемых материалов.

Способы крепления ДД к основным деталям трибоузлов условно можно разделить на три группы: механическое крепление, запрессовкой или напрессовкой и способами, основанными на образовании неразъёмных соединений.

На практике, в подавляющем большинстве случаев, используется третья группа.

Для таких соединений характерна коррозионная стойкость – отсутствие проникновения коррозионной среды в зазор между соединяемыми деталями.

Особый интерес представляет возможность образования трибологических узлов из плохо свариваемых металлов и сплавов, например, сталь и алюминий, сталь и чугун.

В таких соединениях используется дуговая точечная сварка с формированием головки электрозаклёпки через отверстие в верхней детали. При этом отверстие образуют в металле с более высокой температурой плавления, а тело электрозаклёпки выполняют из металла с более низкой температурой плавления. Так применительно к соединению сталь-алюминий отверстие высверливают в стальной детали, а электрозаклёпку формируют из алюминиевого сплава.

Подобные соединения были опробованы при серийном изготовлении заднего моста самоходного зерноуборочного комбайна Ск-4.

Применительно к тележкам грузовых вагонов ремонт МДД может быть успешно применён для восстановления скользунов, наклонных поверхностей надрессорных балок, тормозных колодок, рёбер брук.

[1] Дюргеров Н.Г. Ремонт методом дополнительных деталей/ Н.Г. Дюргеров, В.Ф. Лукьянов, А.П. Павлов // Ремонт, восстановление, модернизация. №1, 2007, С. 19 – 21.

[2] Беркович И.И. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения, учебник для вузов/ И.И. Беркович, Д.Г. Громаковский / под редакцией Д.Г. Громаковского – Самара СГТУ. 2000. – 268 с.

[3] Поляк М.С. Технология упрочнения. Т.1 М. : Машиностроение, 1995, 832 с.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПАРЫ ТРЕНИЯ СТАЛЬ 35-ВК8 НА СТРУКТУРУ И ПАРАМЕТРЫ ТРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ, УПРОЧНЕННОЙ МЕТОДОМ ДЕФОРМИРУЮЩЕГО РЕЗАНИЯ

Дегтярева А.Г. (dega_70@mail.ru), Попцов В.В., Васильев С.Г. Симонов В.Н.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

Изучено влияния направления скольжения контртела ВК8 в паре трения – «диск - неподвижный диск» на структуру и износостойкость поверхности стали 35, упрочненной методом деформирующего резания. Показано, что, несмотря на наличие микронеровностей, в виде границ ребер и их особой макрогеометрии, вращение контртела совпадающего с направлением винтового формирования оребренной структуры и в противоположную сторону, не оказывает существенного влияния на коэффициент трения и интенсивность износа.

Ключевые слова: деформирующее резание, коэффициент трения, интенсивность износа.

Введение Деформирующее резание (ДР) - метод механической обработки, позволяющий создавать на поверхности детали макрорельеф различной формы. Идея использования метода ДР для изменения свойств материала заготовки в формируемых выступах (рёбрах) и впадинах изложена в патенте РФ № 2044606 [1]. Получение макрорельефа в виде наклонной оребренной структуры без зазоров между ребрами и его упрочнение, за счет фазовых превращений и быстрого охлаждения описаны в работе [2] на примере стали 35. Что приводит к проведению закалки непосредственно во время формирования макрорельефа методом ДР. В структуре поверхности получается мелкодисперсный мартенсит с остаточным ферритом микротвердостью равной 470HV0,1. При этом сердцевина материала сохраняет микротвердость исходного нормализованного состояния равной 210 HV0,1.

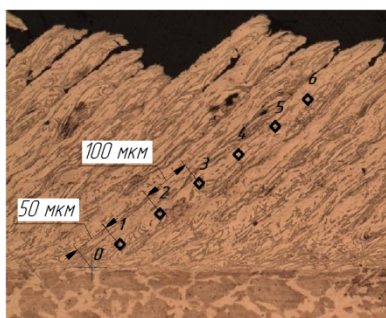


Рис.1. Схема измерения микротвердости на стали 35 с наклонной оребренной структурой без зазоров.

Материалы и методика Материалом для исследования выбрана сталь 35 в нормализованном состоянии. Обработку методом ДР осуществляли на следующих режимах скорость резания $V=4,5$ м/с; шаг формирования оребренной структуры $S_0=0,05$ мм/об; глубина обработки $t=1,0$ мм, инструментом типа проходного резца с определенной геометрией заточки. Для формирования опорной поверхности производили окончательную размерную обработку шлифованием, с достижением шероховатости не более $Ra 0,32$. В результа-

те общая толщина упрочненного слоя составляла 0,3...0,35 мм. Схема испытаний «диск – неподвижный диск» позволяет моделировать пару трения в условиях работы «чистое скольжение» без проскальзывания (рис.2).

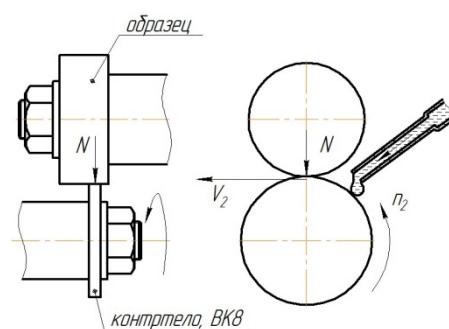


Рис. 2. Схема испытаний «диск – неподвижный диск».

Образец (сталь 35) оставался неподвижным, в качестве контртела, использовалось кольцо из твердого сплава марки ВК8, ГОСТ 3882-94 (87,5HRA. Смазка в зону трения подавалась дозированно. Скольжение проводили в двух направлениях, с совпадением направления винтового формирования оребренной структуры и в противоположном направлении на машине трения Amsler A135. Диаметр образца составлял 40 мм, форма и размеры образца выбраны согласно рекомендациям по ГОСТ [3]. Давление в контакте составляло 440 МПа. Время цикла испытания составляло 5 минут. Испытания повторялись троекратно. Эксперимент проводили с капельной подачей смазки в зону трения, в качестве смазки использовалось индустриальное масло И20А ГОСТ 20799-88, расход масла регулировался и составлял 4...6 капель в минуту. Температура в зоне контакта образец-контртело не измерялась, её приближенное значение контролировалось инфракрасным термометром, которая не превышала 33,8°C.

Для выявления структуры проводили травление микрошлифов в смеси 4-% спиртового раствора азотной кислоты (HNO_3) течение 4...6 секунд.

Микротвердость оребренной поверхности изменяли по схеме представленной на рисунке 1.

Результаты и их обсуждение В ходе эксперимента оценивали структуру и параметры трения упрочненной поверхности методом ДР на стали 35, в зависимости от направления вращения контртела. А именно при вращение контртела совпадающего с направлением винтового формирования оребренной структуры и в противоположную сторону.

Результаты показывают, что направление вращения контртела не влияет на значение коэффициента трения.

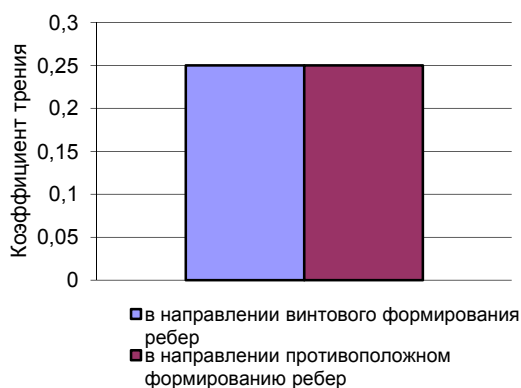


Рис. 3. Коэффициент трения, в зависимости от направления вращения контртела.

Наличие микрозазоров и несплошностей между рёбрами позволяет удерживать смазку и компоновать продукты износа, тем самым положительно влияя на параметры трения.

Проведенный анализ микроструктуры поверхности дорожки трения (рис.4) не выявил глубоких вырывов и дефектов поверхности, ни в од-

ном из направлений скольжения контртела, что соответствует признакам устойчивости работы в условиях трения и износа.

Важным в работе является то, что выбранная схема трения «диск – неподвижный диск», реализует нагружение со значительным сосредоточенным воздействием, равным 440 МПа. Такое контактное нагружение является значительным и предполагается для проведения экспресс исследований. Реальные условия эксплуатации предполагают контактное давление не более 5 МПа.

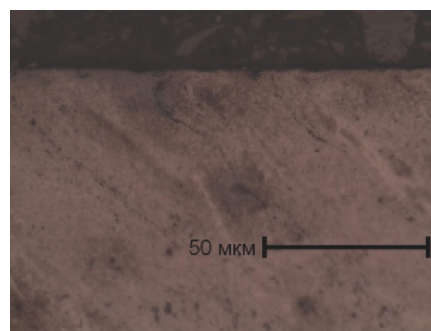


Рис. 4. Состояние поверхности «дорожки трения» при вращении контртела в направлении, противоположном направлению формирования оребренной структуры.

[1]Зубков Н.Н., Овчинников А.И. Способ получения поверхностей с чередующимися выступами и впадинами и инструмент для его реализации: пат.2044606 РФ.- Оpubл.13.06.94 г. Бюл. N 27, 1994.

[2] Формирование закаленных структур в стали 35 методом деформирующего резания. Дегтярева А.Г., Попцов В.В., Симонов В.Н., Васильев С.Г., Варламова С.Б. Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2014. № 9. С. 30-44.

[3] ГОСТ 9696-82 Индикаторы многооборотные с ценой деления 0,001 и 0,002 мм. Технические условия.

ПОВЫШЕНИЕ АКТИВНОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

Дунаев А.В. (dunaev135@mail.ru)

ФБГНУ ГОСНИТИ, Москва, Россия.

Приводятся материалы о значительном повышении активности ювенильных поверхностей металлов в образовании ими антифрикционных покрытий под влиянием воздействия минеральных трибосоставов как мягких абразивов и физико-химически активных частиц.

Ключевые слова: трение, абразив, очистка поверхностей, покрытие.

В нетрадиционной триботехнике ощутимы успехи в создании антифрикционных покрытий с помощью трибосоставов в процессе эксплуатации оборудования. Механизмы образования покрытий различны и полной ясности здесь нет.

Одна из возможных причин образования антифрикционных покрытий с помощью серпентиновых трибосоставов – появление повышенной каталитической активности силового поля поверхностей трения, усиливаемого очисткой поверхностей мягкими абразивами, а также необычные фи-

зико-химические процессы при трении, инициируемые частицами минералов, а органические молекулы усиленно адсорбируются на хорошо очищенных поверхностях.

Ранее [1] имелось «мнение о малой адсорбционной активности ювенильных поверхностей металлов по отношению, например, к жирным кислотам». Но А.С. Ахматов считал, что это противоречит «общеизвестной высокой физико-химической активности таких поверхностей», которое «не получило удовлетворительного объяснения и

поэтому нуждается в проверке». Но за прошедшие десятилетия ясность в этом повысилась [2, 3].

На наш взгляд повышенная каталитическая активность ювенильных поверхностей трения подтверждается по трем направлениям. Первым могут служить трибоиспытания [3] различных минералов – мягких абразивов на основе слоистых силикатов, в т.ч. серпентинов, монтмориллонита, цеолита, каолинита, полититаната калия и даже высокодисперсного аморфного кремнезема. Здесь разные по составу порошки очищают поверхности трения от пленок и разрушенных структур, чем создают условия для повышения их каталитической активности и образования ремонтно-восстановительного покрытия.

Наши испытания одного из серпентиновых составов проведены в Наносцентре на трибометре TRB-S-DE по схеме «палец – диск» при удельных давлений 155-212 МПа. По данным РФА на дифрактометре XRD 6000 в трибосоставе были выявлены:

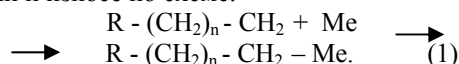
- $(Mg,Al)_3(Si,Fe)_2O_5$ – Aluminum Iron-Magnesium Silicate-1T – основной минерал группы серпентина;
- $Ni_3Si_2O_5(OH)_4$ – Nickel Silicate Hydroxide Pesoratite-2Mc1 – вторичный минерал группы серпентина;
- $Ni_5Al_4O_{11} \cdot 18H_2O$ – Nickel Aluminum Oxide Hydroxide – другая примесь из минералов группы серпентина.

Результаты наших испытаний показали высокую нагрузочную и антифрикционную эффективность масла «Mobil», совпадение свойств трибосоставов ЦНТ и МС-20 (СПб). Хорошие антифрикционные свойства подтвердили наноалмазные составы КАРАТ, а наш состав «Сарановский» оказался лучшим из серпентиновых и приближает трибосвойства масла М-10Г_{2К} среднего класса к высшему мировому уровню свойств масла «Mobil» класса SJ/SL.

Аналогичным подтверждением повышенной каталитической активности поверхностей трения являются результаты испытаний других минералов (рис. 1). Вторым подтверждением повышенной активности ювенильных поверхностей трения служит образование ячеистой структуры сталагмитов из серпентина на границах кристаллов, т.е. в зонах повышенной интенсивности их силовых полей [3].

Так Любимовым Д.Н. показано образование структур, выросших «в областях рядом с границами зерен кристаллов». Ячеистая структура заполняется пористым полимером с высоким содержанием углерода, который в литературе называется алмазоподобной углеродной пленкой (diamond like carbon films – DLC films). Формируемый на «сталагмитах» слой имеет «крайне высокую к поверхностям трения адгезию и износостойкость. Испытания порошка серпентина в режиме практически сухого трения на ЧШМ-1 показали коэффициент трения 0,6-0,8, но схватывания и задира из-за хороших свойств слоя при испытании за 20 тыс. с не произошло» [3].

Далее для третьего подтверждения учтем другое замечание А.С. Ахматова [1]: «Мы считаем, что в условиях трения возможны и прямые химические реакции свободных радикалов с окисленной и ювенильной поверхностью металла при трении и износе по схеме:



Такая активность поверхностей трения реализована в ИМАШ РАН, ЭЛИНП трибополимеризацией непредельных мономеров типа ЭФ-357 в трибосоставах АРВК, АРВО. Но и здесь важную роль играют опять-таки мягкие абразивные гидросиликаты серпентина.

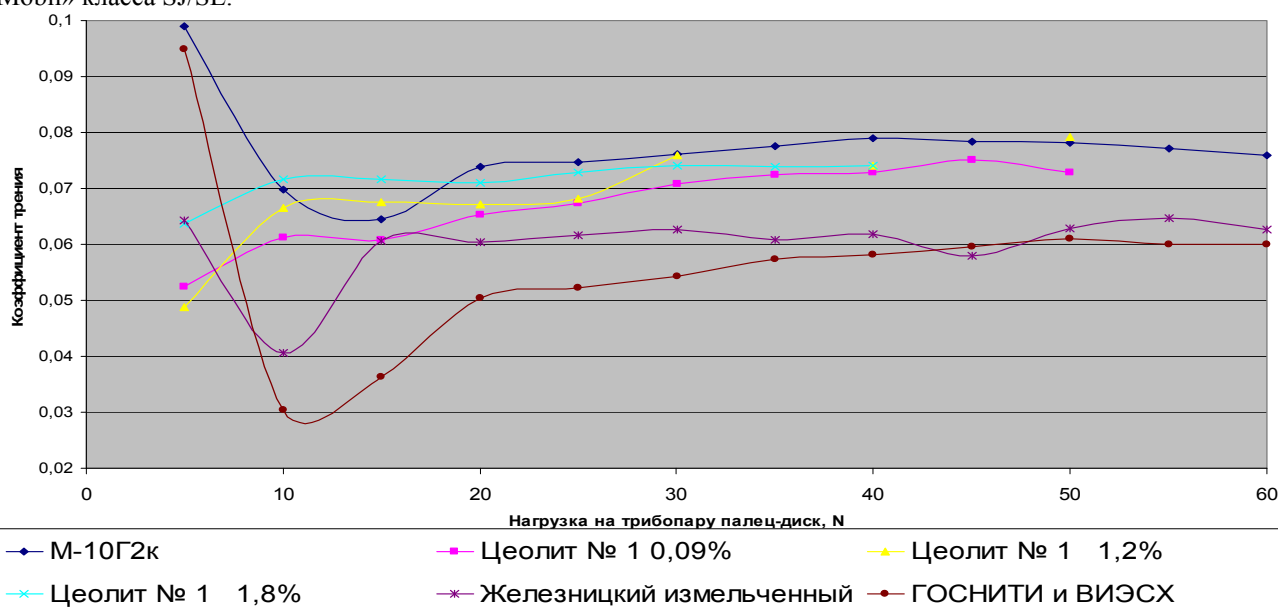


Рис. 1. Коэффициенты трения пары «палец-диск» в масле М-10Г_{2К} с различными минералами

Выводы: Проведенный анализ позволяет полагать, что открытие ювенильных поверхностей металлов на поверхностях трения вносит весомый вклад в образование новых антифрикционных покрытий.

- [1] Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. – М.: Физматгиз. - 1963
[2] Современная трибология. Итоги и перспективы. М.: ЛКИ.- 2008. - 480
[3] Дунаев А.В. Нетрадиционная триботехника. Модификация поверхностей трения. Lambert Academic Publishing.- 2013

СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ТЕХНОСФЕРЕ И БИОСФЕРЕ

Евдокимов А.Ю. (alexevdo@yandex.ru)

Московский государственный лингвистический университет, Москва, Россия.

Смазочные материалы являются важнейшим элементом техносферы, вступая вместе с ней в непримиримое противоречие с биосферой и порождая экологические проблемы. Частичным разрешением противоречия может являться обеспечение относительной сбалансированности между техническими и экологическими свойствами смазочных материалов.

Ключевые слова: смазочные материалы, техносфера, биосфера, экология.

В ходе культурно-исторического процесса, человек, по существу противопоставив себя биосфере и не имея в то же время возможности отказаться от своей биологической природы, создал техносферу, обеспечивающую его существование и породившую непримиримый конфликт с природой. Смазочные материалы – нефтяные, синтетические и растительные масла, пластичные и полужидкие смазки, смазочно-охлаждающие технологические средства, являются неотъемлемым и весьма важным элементом техносферы, без которого последняя, по сути, попросту не сможет функционировать. С другой стороны, в развивающемся глобальном экологическом кризисе, в росте загрязнений биосферы, смазочные материалы играют далеко не последнюю роль: попадание только отработанных смазочных материалов и только в водные экосистемы составляет порядка 20% от общего техногенного загрязнения вод.

Под экологическими проблемами принято понимать изменения природной среды в результате антропогенных воздействий, ведущие к нарушению структуры и функционирования экосистем. Используемые в технике смазочные материалы зачастую представляют собой существенную экологическую опасность и решением проблем экологии в данном случае будет, прежде всего, предотвращение воздействия на организм человека и загрязнения окружающей природной среды.

С экологическими проблемами тесно связано понятие «экологические свойства» смазочных материалов, прочно утвердившееся в химмотологии (как правило, независимо от технических свойств). К экологическим свойствам относят токсичность (ядовитость) и канцерогенность (биологическая активность, вызывающая раковые заболевания), а также биоаккумуляцию (возможность накопления компонентов техногенного материала в живых организмах, главным образом - в крови и жировых тканях) - свойства, связанные с непосредственной опасностью для живых организмов. Некоторые

показатели - взрывоопасность, стабильность состава и свойств в условиях хранения, транспортирования и применения, испаряемость, биоразлагаемость – представляют комплекс характеристик, связанных как с экологической опасностью, так и с вовлечением продукта в круговорот веществ (биоразлагаемость в окружающей среде под действием микроорганизмов).

Технические свойства представляют собой совокупность физико-химических и эксплуатационных характеристик, обеспечивающих эффективное функционирование смазочных материалов в техносфере, надежность и долговечность работы машин и механизмов.

Как следствие разнонаправленности техногенных и биосферных процессов, экологические и технические свойства также находятся между собой в противоречии (рис.1,[1]). Высокая стабильность смазочных материалов (термическая, антиокислительная, биологическая) необходима для поддержания высокого уровня технических свойств и длительной работоспособности.

Напротив – ее низкий уровень говорит о хорошей вовлекаемости продукта в круговорот веществ. Характеристика по одному аспекту, как правило, имеет свой антипод по другому: биоразлагаемость/биостойкость, взрывопожароопасность/негорючесть.

В ряде случаев технические свойства могут как бы «не противоречить» экологическим; например, современные смазочные материалы (в частности – моторные масла) ингибируют образование отложений в двигателях и механизмах, позитивно влияют на автомобильный выхлоп и не вызывают дезактивации каталитических дожигателей выхлопа, способствуют снижению расхода масла; хорошие триботехнические свойства способствуют уменьшению трения и износа, обеспечивая экономию энергии и снижение расхода топлива, то есть экономию природных ресурсов.

Однако такое впечатление весьма поверхностно и не учитывает взаимосвязанности всех перечисленных «совпадений», результирующая которых всегда направлена против биосферы, то есть ведет к росту степени неупорядоченности системы, росту энтропии. Кроме того, все перечисленные «совпадения», лишь тормозящие негативное влияние техносферы, можно отнести как к экологическим, так и к техническим свойствам.

[1] Евдокимов А.Ю., Фукс И.Г., Любинин И.А. Смазочные материалы в техносфере и биосфере. Экологический аспект. Киев: Атика-Н, 2012. – 292 с.

Взаимосвязь технических и экологических аспектов в применении смазочных материалов

Технический аспект	Экологический аспект
Биостойкость	Биоразлагаемость
Негорючесть	Биоаккумуляция
Стабильность: антиокислительная термическая	Взрывопожаробезопасность
состава и свойств	Токсичность
Срок службы	Канцерогенность
Расход смазочного материала	Влияние на состав автомобильного выхлопа
Триботехнические свойства	
Совместимость с уплотнениями	
Чистота смазываемого оборудования	

ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФРАКТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ АНТИФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

¹Евельсон Л.И. (levelmoscow@mail.ru), Камынин В.В., Кузнецов С.С., Ротарь Д.В.

¹Брянский государственный инженерно-технологический университет, Брянск, Россия.

Рассматриваются возможности использования фрактальных и мультифрактальных характеристик для управления триботехническими свойствами чугунов. Используется опыт, накопленный авторами ранее в исследованиях структуры и прочности строительных материалов. Показано, что для чугунов необходим мультифрактальный анализ, использование осредненных монофрактальных параметров недостаточно. Сделан вывод о целесообразности дальнейших исследований в данном направлении.

Ключевые слова: мультифракталы, чугун, микроструктура, трение, износ.

Введение

Для улучшения триботехнических свойств антифрикционных материалов желательно иметь количественные параметры структуры, зависящие от химического состава и способа термообработки и влияющие на характеристики трения и изнашивания. Такая параметризация позволила бы управлять структурой поверхностного слоя и через нее влиять на триботехнические характеристики. Внутренняя структура антифрикционного материала (поверхностного слоя) может характеризоваться тремя основными группами факторов: физическими свойствами элементов структуры, морфологическими параметрами (характерные размеры и параметры формы частиц) и характеристиками упорядоченности структуры. Параметры первой группы во многих работах подвергались экспериментальному исследованию, по второй группе число таких работ значительно меньше. И совсем мало работ, в которых изучаются параметры третьей группы, что, видимо, связано с принципиальными трудностями количественной оценки качественных особенностей структуры. В данной работе делается попытка построения математической модели структуры на основе фракталов и мультифракталов. Ранее такой подход был успешно применен авторами при исследовании прочностных характеристик наномодифицированных бетонов [1-3]. Далее излагаются первые результаты фрактального и мультифрактального моделирова-

ния микроструктуры антифрикционных чугунов. Снимки микроструктуры и экспериментальные данные (в том числе, по коэффициенту трения и износу) по этим материалам были взяты из работы [4].

Описание методов исследования

Основная идея, положенная в основу исследования, заключается в следующем. Материал рассматривается как система. Входами (экзогенными переменными) являются параметры, которыми можно управлять, и которые при этом могут влиять на внутреннюю структуру, в частности, на ее упорядоченность. Выходами (экзогенными переменными) являются триботехнические параметры, для антифрикционных чугунов были выбраны коэффициент трения и износ, определявшиеся экспериментально. Предлагается введение промежуточной математической модели, описывающей внутреннюю структуру, причем, в первую очередь внимание уделяется количественному описанию ее упорядоченности. Для этого предлагается использовать эндогенные переменные, являющиеся мультифрактальными характеристиками [5].

Мультифрактальный анализ микроструктуры чугунов

Фрактальные и мультифрактальные характеристики вычислялись с помощью компьютерной программы ImageJ [6] автоматически по фотоснимкам, сделанным с помощью микроскопа. При исследовании бетонов ценные результаты были получены уже с помощью монофрактальных ха-

рактических – фрактальной размерности и лакуарности. Для чугунов оказалось, что необходим мультифрактальный анализ, а описание структуры чугуна как монофрактала явно недостаточно.

Исследовались спектры обобщенных фрактальных размерностей Реньи, характеризующих распределение точек в изучаемой области, и так называемая функция мультифрактального спектра (спектр сингулярностей мультифрактала). Эту функцию можно трактовать как совокупность значений фрактальных размерностей регулярных фракталов, объединение которых дает исходный мультифрактал.

Результаты мультифрактального анализа

Исследованию были подвергнуты 11 различных антифрикционных чугунов, различающихся химическим составом. Они были условно разделены на 2 группы по критерию содержания марганца. Типичный вид микроструктуры показан на рис. 1.



Рис. 1 Пример снимка микроструктуры чугуна

С помощью программы ImageJ вычислялись фрактальные размерности, значения лакуарности и строились графики спектров обобщенных размерностей Реньи и функции мультифрактального спектра. Далее в качестве эндогенных переменных

были приняты координаты характерных точек указанных графиков. Оценивались статистические характеристики взаимосвязей между химическим составом, мультифрактальными параметрами и триботехническими величинами (коэффициент трения, износ).

Обсуждение результатов и выводы

По результатам расчетов можно сделать следующие выводы.

1. Монофрактальные характеристики (усредненная фрактальная размерность и лакуарность) не имеют значимой статистической связи с триботехническими характеристиками.
2. Предлагаемая методика параметризации мультифрактальных спектров может позволить строить значимые статистические модели, связывающие химический состав и выходные триботехнические величины.
3. Целесообразно проведение дальнейших исследований со значительно большим числом экспериментальных данных и соответствующих снимков микроструктуры.

[1] Разрушение твердых полимеров /Под. ред. Б. Роузена. – М.: Химия. – 1971

[1] Евельсон Л.И., Лукутцова Н.П., Николаенко А. Н., Хомякова Е.Н., Ривоненко Я.А. Некоторые практические аспекты фрактального моделирования структуры нанокomпозиционного материала //Строительные материалы. – 2015 (731), №11, 24 - 27

[3] Евельсон Л.И., Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Ротарь Д.В., Кузнецов С.С., Ефремочкин Р.А. Изучение статистической устойчивости результатов фрактального моделирования на примере структуры наномодифицированного бетона // Строительные материалы. – 2016 (733 - 734), №1-2, 48 – 54

[3] Evelson L., Lukutsova N/ Application of statistical and multifractal models for parameter optimization of nanomodified concrete // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015 (10), 24 - 27

[4] Камынин В.В. Разработка и использование антифрикционных чугунов для тяжело нагруженных узлов трения // Диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Брянск, 2000. – 143 с.

[5] Башкуев Ю.Б. Основы фрактальной геометрии и фрактального исчисления. – Улан-Удэ: Изд-во Бурятского госуниверситета, 2013. – 224 с.

[6] ImageJ[Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://imagej.net/Welcome> – Дата обращения 28.05.2016.

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ СКОРОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ НА ТРЕНИЕ И ИЗНОС

¹Евельсон Л.И. (levelmoscow@mail.ru), Цыганков А.Г., Ширяева Л.И., ²Памфилов Е.А.

¹Брянский государственный инженерно-технологический университет, Брянск, Россия;

²Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия.

Рассмотрено влияние параметров кинетической характеристики трения (зависимости коэффициента трения от скорости скольжения) на характеристики износа при качении с проскальзыванием колеса по железнодорожному рельсу. Использовано компьютерное моделирование с помощью программного комплекса «Универсальный механизм». Установлено, что параметры кинетической характеристики могут существенно влиять на износ, и уменьшение коэффициента трения может сопровождаться увеличением износа. Ключевые слова: кинетическое, трение, износ, моделирование.

Введение

Зависимость коэффициента трения от скорости скольжения имеет большое значение в трибологии. Хотя во многих случаях эта зависимость проявляется слабо, ее влияние может быть существенным, поскольку как показано во многих исследованиях, от нее зависит возникновение в трибодинамических системах фрикционных автоколебаний. Ранее в [1] были рассмотрены прямая и обратная задачи для сложных трибодинамических систем. Отмечено, что параметры кинетической характеристики трения могут значительно влиять на динамику системы и, в тоже время, динамические режимы нагружения способны изменять эти параметры.

В данной работе сделана попытка подробнее изучить кинетическую характеристику трения как математическую функцию, а также исследовать влияние кинетической характеристики трения на износ с помощью компьютерного моделирования.

История исследований кинетической характеристики трения

Можно отметить исследования Кулона, который экспериментально получил различные кинетические характеристики трения для различных материалов и условий контакта [2]. Следующим важным этапом явились экспериментальные исследования на французских железных дорогах во второй половине XX века, где была обнаружена падающая кинетическая характеристика. В работах И.В. Крагельского [2, 3] предлагается формула

$$f = (a + bv)e^{-cv} + d. \quad (1)$$

Эта формула достаточно универсальна. В зависимости от соотношения параметров a , b , c , d она может давать монотонно убывающие и возрастающие, а также унимодальные функции. В работах Полача (O. Polach) [4] были экспериментально изучены зависимости коэффициента трения от относительного проскальзывания и предложена эмпирическая формула

$$f = f_0 \left((1 - A)e^{-Bv} + A \right). \quad (2)$$

Как можно показать [4], формула (2) является упрощенным частным случаем формулы (1), так как (1) переходит в (2) при определенном соотношении параметров.

Компьютерное моделирование динамических процессов

Для компьютерного моделирования динамики сложных механических систем используются программные комплексы, реализующие в автоматическом режиме составление и решение систем дифференциальных уравнений. К числу наиболее «продвинутых» программных продуктов этого класса относится комплекс «Универсальный механизм» (УМ) [5], разработанный в Брянском государственном техническом университете. В нем имеется возможность задания кинетической характеристики трения в форме (2). Кроме динамических и кинематических выходных величин, в УМ имеется возможность вычисления характеристик, связанных с износом: работы и удельной ра-

боты, а также мощности силы трения.

$$M_{wear} = -F_{2x}v_{2x} - F_{2y}v_{2y}, \quad (\text{Вт}) \quad (3)$$

Величины A_{wear} и S_{wear} определяются по формулам

$$A_{wear} = \int_0^t M_{wear} dt \quad (\text{Дж}); \quad (4)$$

$$S_{wear} = \frac{A_{wear}}{S} \quad (\text{Дж/м}), \quad (5)$$

где S – пройденный путь.

Результаты расчетов и выводы

Осуществлялось многовариантное компьютерное моделирование движения одиночной колесной пары по рельсу с различными значениями параметров A и B , варьирувавшимися в широких пределах: A в интервале от 0 до 1, а B от -0,9 до 0,9, т.е. расчеты производились как при убывающей, так и возрастающей кинетической характеристике трения. В табл. 1 представлены сводные результаты, характеризующие разброс работы, удельной работы и мощности силы трения, по всем расчетам. Как видно, разброс оказался большим, причем наиболее чувствительной из этих характеристик оказалась мощность трения.

Таблица 1. Сводные результаты расчетов

	min	max	рост, %
S_{wear}	3.38	7.85	132.45
A_{wear}	338.90	787.90	132.46
M_{wear}	124.40	485.90	290.62

Характерные соответствующие графики для мощности трения приведены на рис. 1.

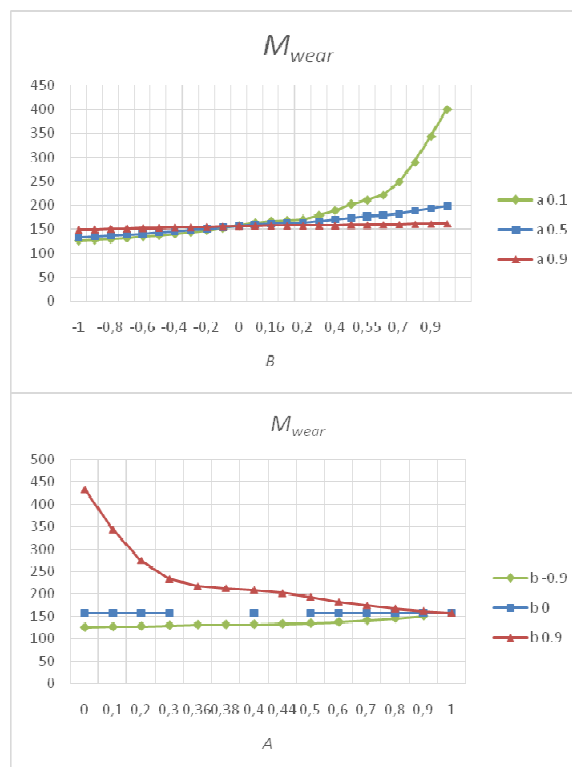


Рис. 1. Зависимость мощности трения для разных сочетаний параметров A и B .

По результатам выполненных расчетов можно сделать следующие выводы.

1. Износ в системе колесо-рельс может существенно зависеть от параметров кинетической характеристики трения.

2. Использование формулы (2) позволяет достаточно гибко моделировать кинетическую характеристику трения и оценивать характеристики, связанные с износом.

3. В определенных интервалах значений A и B , в частности, при сочетании $A=0,1$; $B=0,9$ увеличение коэффициента трения может сопровождаться снижением мощности трения и других характеристик, прямо связанных с износом.

4. Параметры A и B не имеют непосредственного физического смысла, они могут быть определены идентификацией по результатам реальных экспериментов. В то же время эти параметры отражают реальное поведение системы колесо-рельс. Представляется возможным и целесообразным разработать информационную систему для оценки A и B по количественным и качественным реальным факторам, таким, например, как влажность, наличие и степень загрязнения рельсов, режим смазки, использование песка для повышения сцепления и т.д. Общий подход к созданию такой информационной системы представлен в [6].

5. Оценивая износ по косвенным энергетическим характеристикам трения, следует иметь в виду: в ранее проводившихся трибологических исследованиях [7] было показано, что работа силы трения и износ представляют собой зависимые

случайные величины, но эта зависимость может быть далека от линейной и определяется многими факторами. Для полноценного компьютерного моделирования трибодинамических систем, в частности, системы колесо-рельс надо проводить дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования, с одной стороны, кинетической и динамической характеристики трения, а, с другой стороны, зависимости между мощностью трения и интенсивностью изнашивания.

[1] Евельсон Л.И. Методология математического и компьютерного моделирования трибодинамических систем. – Брянск: БГИТА. - 2015. – 204 с.

[2] Крагельский И.В., Гитис Н.В. Фрикционные автоколебания. — М.: Наука. — 1987. – 182 с.

[3] Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.

[4] O. Polach Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit //Wear. - 2005 (258), 992 - 1000

[5] Евельсон Л.И., Памфилов Е.А., Цыганков А.Г., Ширяева Л.И. Многовариантные расчеты факторов износа колеса и рельса при варьировании параметров кинетической характеристики трения //Компьютерное моделирование в железнодорожном транспорте: динамика, прочность, износ: III научно-технический семинар, г. Брянск, 6-7 апреля 2016 г. [Текст]+[Электронный ресурс]: сб. тез. / пол ред. Д.Ю. Погорелова. – Брянск: БГТУ, 2016. – С. 27 - 29.

[6] Евельсон Л.И., Хандыго В.Г., Ширяева Л.И., Захаров С.М. Построение базы знаний для систематизации опыта исследований взаимодействия колеса и рельса // Вестник компьютерных и информационных технологий. - №4, 2014. – С. 21 – 26.

[7] Бершадский Л.И. Борис Иванович Костецкий и общая концепция в трибологии //Трение и износ. – 1993 (14), №1, 6 – 18

ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗНАШИВАНИЯ ПЕРЕДАЧ ЗАЦЕПЛЕНИЕМ

Егоров И.М. (egrov@mail.ru)

Санкт-Петербургский политехнический университет, Санкт-Петербург, Россия.

На примере цилиндрической прямозубой зубчатой и червячной передач рассматриваются особенности построения моделей изнашивания плоских и пространственных передач зацеплением. Проверка пригодности моделей для изучения процесса изнашивания и проведения расчетов передач на износ проводится путем сравнения результатов моделирования с результатами экспериментов и сопоставления поведения моделей с закономерностями процесса изнашивания, известными из практики эксплуатации машин и механизмов.

Ключевые слова: моделирование изнашивания, зубчатая передача, червячная передача.

Особенности изнашивания передач зацеплением

При работе передач зацеплением, как и любых других механизмов, содержащих высшие кинематические пары, в различных точках рабочих поверхностей реализуются различные условия, определяющие интенсивность изнашивания (скорость скольжения, давление, время нахождения точки в контакте в течение одного цикла зацепления зубьев и др.). Непрерывное изменение формы изнашивающихся поверхностей приводит к непрерывному изменению условий изнашивания во

времени. При этом изначально точная передача становится приближенной, зоны многопарного зацепления превращаются в зоны упругого переоспарения зубьев. Аналитическое представление изнашивающихся поверхностей становится невозможным.

Принцип построения моделей изнашивания

При построении моделей процесса изнашивания рабочие поверхности задаются виде координат ряда точек, а сам процесс разбивается на ряд шагов.

Число точек должно быть достаточно большим, чтобы передавать геометрические и кинема-

тические свойства зацепляющихся поверхностей и отражать распределение давлений в точках много-точечного изнашивающегося контакта. Шаг изнашивания, приращение числа оборотов шестерни или червяка (Δn), должен быть достаточно мал, чтобы в его пределах считать параметры зацепления и условия изнашивания постоянными.

На каждом шаге изнашивания для ряда положений ведущего звена находятся давления, орты контактных (e), радиусы кривизны и другие геометрико-кинематические показатели, являющиеся аргументами функции интенсивности изнашивания. Методика анализа зацепления при точечном задании рабочих поверхностей зубьев изложена в работах [1,2].

Интенсивность изнашивания (J) определяется как приращение износа в точке за один цикл взаимодействия зубьев. Она описывается функцией, которая зависит от конкретных условий изнашивания. Если износ пропорционален давлению и пути трения:

$$J = K \cdot \int_0^T p(t) \cdot V_c(t) \cdot dt, \quad (1)$$

где T – время пребывания точки в контакте; p – давление; V_c – скорость скольжения; K – коэффициент, характеризующий износостойкость материалов колес, условия работы передачи (смазывание, наличие и свойства абразива, температуру окружающей среды) и другие параметры, считающиеся неизменными.

Изменение радиуса-вектора i -ой точки поверхности на шаге изнашивания определяется уравнением:

$$\Delta r_i = e_i \cdot J_i \cdot \Delta n \quad (2)$$

Модель изнашивания зубчатой передачи

Поверхность зуба цилиндрической прямозубой передачи в начале шага изнашивания задается координатами ряда точек его торцевого профиля x_i, y_i ($i = 1, \dots, n$). Координаты точек в конце шага изнашивания определяются по формулам (2).

Уравнение (1) в случае плоского зацепления можно привести к виду:

$$J = K \cdot \vartheta \cdot F, \quad (3)$$

где ϑ – удельное скольжение; F – сила в зацеплении.

Сравнение результатов расчета износа колеса с результатами эксперимента, приведенными в работе [3] показано на рис. 1.

Передача имеет следующие параметры: $z_1=15, z_2=23, m=10$ мм, $a_w=198.5$ мм, $b=15$ мм, $T_2=1100$ Нм, $n_1=230$ об/мин. При моделировании изнашивания после $4 \cdot 10^5$ оборотов колеса подобраны коэффициенты K в формуле (3), при этом:

$$J_1 = 6.31 \cdot 10^{-6} \cdot \vartheta_1 \cdot F; J_2 = 2.1 \cdot 10^{-4} \cdot \vartheta_2 \cdot F \text{ [мм/об]}. \quad (4)$$

В дальнейшем остальные этапы изнашивания воспроизводятся в реальном времени.

На рис. 2 в относительном масштабе представлены некоторые результаты моделирования изнашивания передачи ($z_1=18, z_2=36, m=1$ мм).

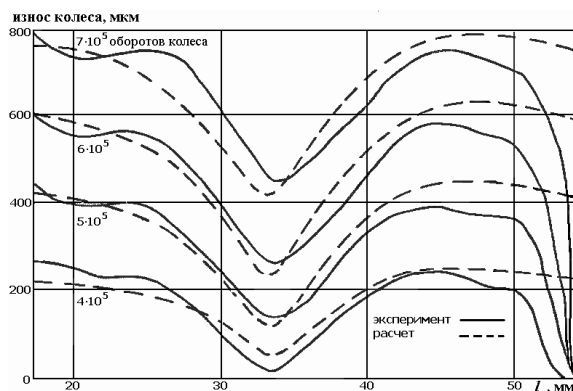


Рис. 1. Распределение износа колеса вдоль линии зацепления.

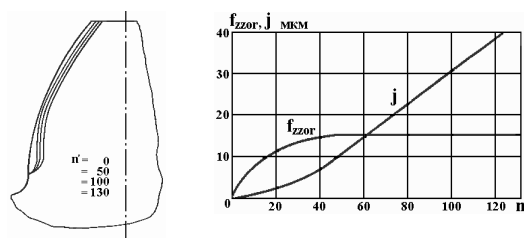


Рис. 2. Изменение профиля зуба шестерни, циклической погрешности зубцовой частоты $f_{z\text{zor}}$ и мертвого хода j .

Моделирование изнашивания червячной передачи

Поверхность зуба червячного колеса задается полярными координатами точек ряда торцевых сечений (см. рис. 3), которые могут быть получены измерением колеса на координатной измерительной машине или, как в данной модели, в ходе моделирования процесса зубофрезерования.

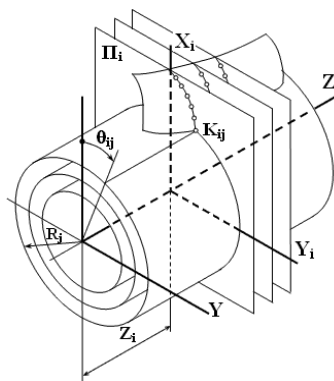


Рис. 3. Задание поверхности зуба червячного колеса.

В начале шага изнашивания для ряда фаз зацепления находятся мгновенные площадки контакта и распределение на них давлений и скоростей скольжения. Так определяется поле изнашивания червячной передачи (см. рис. 4).

Участки траекторий точек звеньев внутри поля изнашивания выделены цветом.

С учетом рис. 4, уравнение (1) принимает вид:

$$J = K \cdot \int_{\varphi_H}^{\varphi_K} p(\varphi) \cdot V_c(\varphi) \cdot d\varphi, \quad (5)$$

где φ_H, φ_K – углы поворота звена в начале и в конце движения точки внутри поля изнашивания.

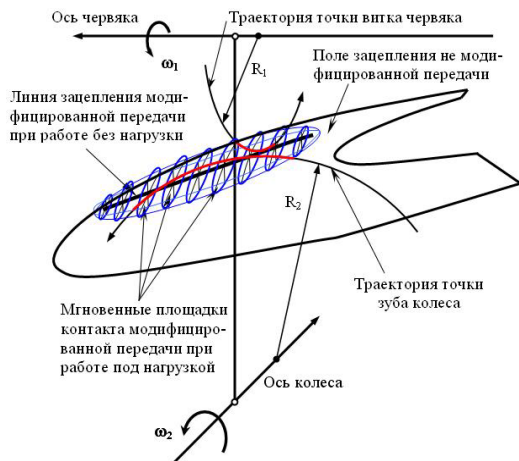


Рис. 4. Поле изнашивания червячной передачи.

На рис. 5-6 представлены некоторые результаты моделирования изнашивания модифицированной червячной передачи ($z_1=1$, $z_2=36$, $a_w=80$ мм, $m=4$ мм, $q=9$, $d_0/d_1=1.033$).

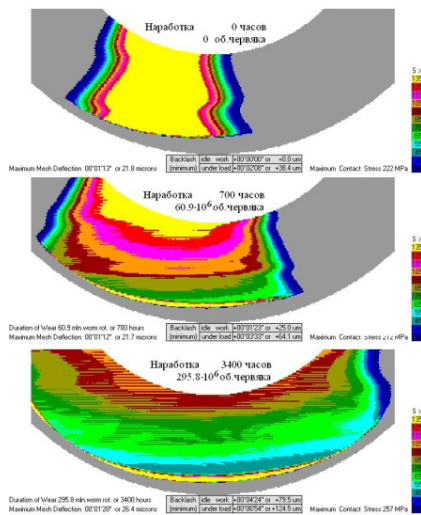


Рис. 5. Пятно контакта и распределение давлений.

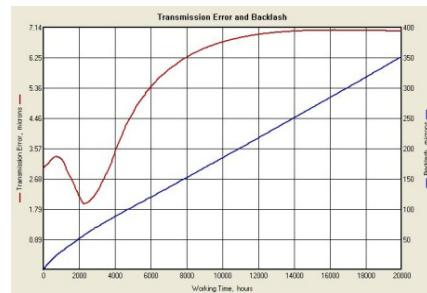


Рис. 6. Кинематическая погрешность и мертвый ход.

Выводы. Математические эксперименты по изнашиванию точных передач показали, что модели адекватно отображают закономерности поведения реальных объектов, основными из которых являются наличие периодов приработки и установившегося изнашивания. Во время приработки происходит рост пятна контакта (в локализованной передаче), перераспределение давлений, быстрое увеличение ошибки положения, кинематической погрешности, погрешности передаточного отношения. Затем в передаче реализуется устойчивая форма естественного изнашивания зубьев и наступает стабилизация всех параметров.

- [1] Egorov I. and Morish L. Digital approach for the solution of gearing problems. //Proceedings of DETC2003 ASME 2003 Design Engineering Technical Conferences, Chicago, Illinois, USA, September 2-6, 2003, p.483 DETC2003/PTG-48085
- [2] Егоров И. М. Обратная задача теории зацеплений при дискретном задании профилей зубьев. Машиноведение //Сб. науч. трудов. — СПб: СПбГТУ, 1997, 146—150
- [3] Adam G. Untersuchungsergebnisse zum Verschleißverhalten von Geradstirnrädern aus Stalguß bei Kleinen Zahnumfangsgeschwindigkeiten //Schmierungstechnik, — 1980, Bd.11, Nr.4, 104—109

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРУКТУРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ МОЩНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ПРОИСХОДЯЩИХ В ОСНОВНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯХ ДНОУГЛУБИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Ежов Ю.Е. (tribotex@narod.ru, EzhovYE@gumrf.ru)

Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Россия.

В докладе представлен комплексный подход к решению триботехнических задач для условий гидроабразивного изнашивания ответственных деталей земснарядов. Основой данного подхода являются теоретические предпосылки структурно-энергетических критериев мощности разрушения поверхностных слоев, с достаточной полнотой для инженерных расчетов, описывающих необходимые параметры и показатели процесса. В докладе достаточно подробно представлены теоретические алгоритмы и разработанные локальные

технологические приемы и методы модификации и восстановления изношенных поверхностных слоев ответственных деталей.

Ключевые слова: трение, гидроабразивный износ, структурно-энергетические критерии, мощность разрушения, мощность деформации, удельное давление.

Основным средством гидромеханизации во всех отраслях народного хозяйства являются плавучие землесосные и черпаковые снаряды. Земснаряды (з/с), используемые на дноуглубительных работах, при мелиорации, добыче, погрузке в суда и выгрузке на берег нерудных строительных материалов. В связи с этим вопросы усовершенствования и правильной эксплуатации огромного парка з/с весьма актуальны и имеют важное значение в народном хозяйстве. Главные резервы повышения надежности, работоспособности и общей эффективности работы з/с при этом заключается в правильном проектировании и использовании комплекса грунтопровод – насос – двигатель. Общая эффективность снижается в связи с низкой долговечностью отдельных деталей в трибосопряжениях.

Цель

Повышения эффективности работы з/с может быть достигнуто посредством конструктивных, технологических и режимных (гидродинамических) мероприятий. Причем достижение цели может быть осуществлено на основе полученных зависимостей расчетно-экспериментальных работ, позволяющих на этапе моделирования и проектирования процессов, за счет полученных зависимостей структурно-энергетического критерия мощности разрушения поверхностных слоев деталей, корректно применить современные износостойкие материалы (на основе сталей, чугунов), наплавочные и синтетические материалы для изготовления и защиты от изнашивания деталей грунтовых насосов.

Накопленный собственный опыт эксплуатации з/с и исследования других авторов показывает, что наибольшему износу в трибосопряжении подвергаются черпаковые пальцы, рабочие колёса насосов и детали ЦПГ СДВС, установленных на з/с. Разновидности эрозии трибосопряжений указаны в табл. 1.

Таблица 1. Разновидности эрозии рабочих устройств земснарядов.

Эрозия рабочих устройств земснарядов.	Абразивная эрозия при высоких давлениях, ударах и заедании в трибосопряжениях.	Детали шарнирного соединения черпаковой цепи, черпаки, барабаны, роульсы.
	Гидроабразивная и кавитационная эрозия, износ при трении скольжения	Детали грунтовых насосов и разрыхлительных устройств, пульпопроводы

В ходе научного исследования был получен **критерий относительной кавитационно-эрозионной стойкости материала в сравнении с эталоном** в случае преобладания процессов деформирования на мезоструктурном уровне окажется равной:

$$k_{\Delta V} = \frac{\Delta V_{\partial}}{\Delta V_i} = \left(\frac{W_{kp_i}}{W_{kp_s}} \right)^{k_1} = \left(\frac{E_{y\partial_i}}{E_{y\partial_s}} \right)^{\frac{3}{2}k_1} = \left(\frac{v_{kp_i}}{v_{kp_s}} \right)^{3k_1}, \quad (1)$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий влияние на долговечность материалов коррозионно-активной среды, $E_{y\partial}$ удельной энергоемкостью, v_{kp} критическая скорость деформации, P_{kp} давление; $E_{y\partial} \sim v^2 \sim P_{kp}^2$ удельная энергия разрушения, W_{kp}^* предельной плотностью мощности деформации, N_{kpi} – критическое число импульсов давления (скорости гидроударов).

Соотношение (1) имеет многочисленные экспериментальные подтверждения и указывают на то, что энергетические характеристики W_{kp} , $E_{y\partial_i}$, v_{kp} и N_{kp} (τ_{kp}) могут быть использованы в качестве объективных критериев эрозионной стойкости материалов.

Аналогично могут быть использованы другие зависимости, для преобладающего вида изнашивания, являющегося паспортом состояния процесса, что очень выгодно при выборе упрочняющей технологии.

[1] Ежов Ю.Е., Погодаев Л.И. / Моделирование надежности, прогнозирование и увеличение ресурса ведущих деталей рабочих устройств и энергетических установок судов технического флота. Монография. СПб, СПГУВК, 2012г. - 132с.

[2] Ежов Ю.Е., Погодаев Л.И., Фролов Ю.В. А.С. Порошковая проволока для износостойкой наплавки. Патент № 4825406/27 от 14.05.90г.

[3] Погодаев Л. И., Ежов Ю. Е. Основные закономерности гидроабразивного и ударноабразивного изнашивания наплавочных материалов. Ч. 1 // Трение и износ. 1991. Т.12 №5. - С. 801-811.

[4] Погодаев Л. И., Ежов Ю. Е. Основные закономерности гидроабразивного и ударноабразивного изнашивания наплавочных материалов. Ч. 2 // Трение и износ. 1991. Т.12 № 6. – С. 983-992.

ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАТОРОВ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АДГЕЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ТРЕНИИ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ

¹Емаев И.И., ¹Криони Н.К., ¹Шустер Л.Ш.

¹ФГБОУ ВО Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия.
(oknim@ugatu.ac.ru)

Исследовано влияние графита, дисульфида молибдена и углеродного каркаса, используемых в качестве модификаторов пластичных смазочных материалов (ПСМ), а также давления и температуры на характеристики адгезионного взаимодействия при трении. Приведено обоснование того, что применение углеродного каркаса обеспечивает меньшую величину прочности адгезионных связей при трении.

Ключевые слова: прочность адгезионных связей на срез, графит, дисульфид молибдена, углеродный каркас.

Введение

Одним из путей повышения эффективности применения пластичных смазочных материалов (ПСМ) в тяжело нагруженных трибосопряжениях и в операциях механообработки металлов является их модификация различного рода наполнителями.

В работах [1] и [2] показано, что применение так называемого «углеродного каркаса» (УК) в ПСМ взамен известных наполнителей – графита (Г) и дисульфида молибдена (ДМ) существенно улучшает характеристики адгезионного взаимодействия в условиях скользящего пластического контакта. Однако при этом не выявлены закономерности влияния УК на показатели трения с учетом совместного влияния температуры контакта и давления, что сдерживает эффективное применение этого наполнителя в ПСМ.

Настоящая работа направлена на восполнение этого пробела и имеет целью установление закономерностей влияния различных модификаторов (в том числе, УК), давления и температуры на характеристики адгезионного взаимодействия при трении и рассмотрение возможности повышения эффективности применения ПСМ путем замены наполнителей Г и ДМ на УК.

Расчетные зависимости

Рядом исследователей предпринимались попытки вычислить значение прочности адгезионных связей на срез τ_n с учетом температуры и давления на основании лишь теоретического анализа. И кинетическая теория прочности твердых тел С.Н. Журкова, и теория металлов Я.И. Френкеля, и гидродинамическая аналогия устанавливают линейный характер зависимости τ_n от контактного давления p_r :

$$\tau_n = \tau_0 + \beta \cdot p_r; \quad (1)$$

$$\tau_0 = C_1 \left(1 + \frac{E_b}{R \cdot \Theta} \right); \quad (2)$$

$$\beta = \frac{C_1 \cdot \Delta A}{R \cdot \Theta}; \quad (3)$$

где τ_0 – прочность адгезионных связей на срез при отсутствии контактного давления; β – коэффициент упрочнения адгезионных связей; C_1 – констан-

та; R – постоянная Больцмана; Θ – температура контакта; E_b – энергия активации вязкого течения фрикционного контакта; ΔA – приращение объема зоны контакта, связанное с необходимостью образования некоторого зазора для разрыва образовавшихся связей и зависящее от пластичности материала в этой зоне.

Из приведенных выражений видно, что величина прочности адгезионных связей на срез τ_n зависит не только от контактного давления p_r , но и от пластичности материала фрикционного контакта, энергии активации его вязкого течения, а также от температуры, которая оказывает как прямое, так и косвенное воздействие (через изменение величины ΔA) на рассматриваемые параметры.

Однако использовать выражения (1) – (3) для расчета величины τ_n применительно к реальным условиям контактирования и трения тел их поликристаллических металлов в настоящее время не представляется возможным в виду отсутствия достоверных данных о характеристиках зоны контакта E_b , ΔA и C_1 .

Поэтому в данной работе для оценки триботехнических параметров использовали экспериментальные исследования.

Методика исследования

С помощью специального прибора (адгезиометра) замеряется прочность τ_n на срез адгезионных связей при различных давлениях p_r и температурах Θ на фрикционном контакте. При этом сферический индентор радиусом 2,5 мм из инструментального сплава ВК8, сжатый двумя плоскими образцами из стали 45 диаметром 20 мм и толщиной 7 мм, вращается вокруг собственной оси. Нагрев зоны контакта осуществляется электроконтактным способом. С помощью метода ступенчато изменяющихся нагрузок определяется зависимость прочности адгезионных связей на срез от давления [3].

Перед каждым экспериментом поверхности образцов и индентора обезжиривают техническим спиртом. После этого кисточкой наносят на них слой испытываемого ПСМ. Все эксперименты повторяются по 3 раза для получения среднеарифметических результатов.

Смазочные композиции исследуемых ПСМ состоят из 60 % цилиндрического масла (ЦМ), 20 % литола и 20 % модифицирующих добавок. В ПСМ-УК добавляют УК, в ПСМ-ДМ – дисульфид молибдена, в ПСМ-Г – графит, соответственно.

Анализ полученных результатов

Для всех исследованных пар трения зависимость τ_n (p_r) в исследованном диапазоне температур (рис.1) имеет прямо пропорциональный характер и описывается биномиальной функцией (1). Расчеты показали, что выборочный коэффициент корреляции во всех опытах был в пределах 0,97 – 0,985, что указывает на наличие устойчивой функциональной базы. Как показали исследования, состав ПСМ и температура оказывают существенное влияние на фрикционные параметры β и τ_0 (рис.2).

Установленные закономерности изменения фрикционных параметров β и τ_0 можно объяснить следующими факторами. В соответствии с выражением (2) параметр ΔA пропорционален отношению $\Delta A/\Theta$ и зависит непосредственно от температуры (Θ) и пластичности материалов в зоне контакта (ΔA) – так называемого «третьего тела», – изменяющейся в связи с изменением температуры. Таким образом, температура Θ оказывает на параметр β как прямое, так и косвенное влияние. Причем, направление этого влияния прямо противоположное: с повышением Θ увеличивается пластичность «третьего тела» (ΔA), т.е. увеличивается числитель в выражении (3), но одновременно увеличивается и знаменатель – произведение $R\Theta$. Это является причиной немонотонного характера зависимости $\beta = f(\Theta)$ и может сформировать экстремумы на этой зависимости (рис. 2, а).

Как видно из рис. 2, а, модификация ПСМ углеродным каркасом ощутимо снижает параметр β и делает его практически независимым от температуры Θ . Это косвенно свидетельствует о том, что при использовании ПСМ, модифицированного УК, изменение пластичности «третьего тела» при трении практически компенсирует прямое действие температуры. Можно предположить, что это может быть связано с появлением вторичных структур на поверхностях трения.

В соответствии с выражением (3) фрикционный параметр τ_0 зависит от отношения $E_b/R\Theta$. Из выражения (3) видно: если с повышением Θ на фрикционном контакте не происходит изменение величины E_b (энергии вязкого течения «третьего тела»), то параметр τ_0 при этом должен уменьшаться. В противном случае зависимость $\tau_0(\Theta)$ может иметь точки экстремумов, что и подтверждают экспериментальные данные, приведенные на рис. 2, б. Из этого рисунка видно, что модификаторы ДМ и УК уменьшают величину E_b , способствуя уменьшению параметра τ_0 .

Вывод

Установлено, что модификация ПСМ углеродным каркасом обеспечивает при прочих равных условиях (по давлению и температуре) наименьшую прочность на срез адгезионных связей τ_n по сравнению с другими исследованными модификаторами ПСМ. Это связано главным образом с тем, что модификация УК обеспечивает более низкие значения параметров β и τ_0 адгезионного взаимодействия на фрикционном контакте.

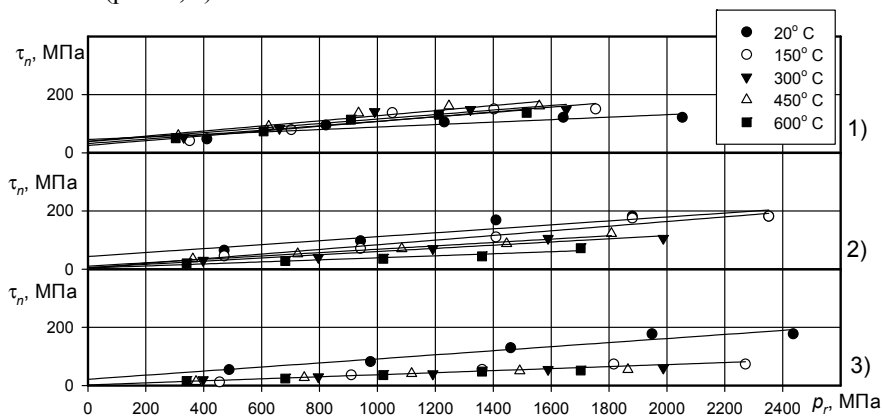


Рис. 1. Влияние контактного давления на тангенциальную прочность адгезионных связей при различных температурах контакта: 1) ПСМ-Г; 2) ПСМ-ДМ; 3) ПСМ-УК

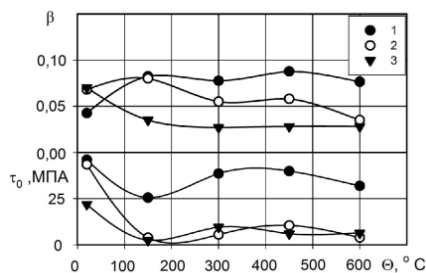


Рис. 2. Влияние температуры контакта и модификатора ПСМ на триботехнические характеристики β и τ_0 : 1) ПСМ-Г; 2) ПСМ-ДМ; 3) ПСМ-УК

[1] Емаев И.И., Зубер В.И., Криони Н.К., Нигматуллин Р.Г., Шустер Л.Ш. Влияние модифицирования смазочных материалов углеродным каркасом на их триботехнические характеристики // Трение и смазка в машинах и механизмах. - 2015. - №9. - С. 25 - 28.
 [2] Емаев И.И., Криони Н.К., Зубер В.И., Нигматуллин Р.Г. Вопросы модификации пластичных смазочных материалов // Кузнечно-штамповое производство – 2016 - №4. – С.39-42.
 [3] Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. - Уфа: Гилем, 1999. - С. 198

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ПАР ТРЕНИЯ УПЛОТНЕНИЙ ВРАЩАЮЩИХСЯ ВАЛОВ НА НАДЕЖНОСТЬ

Еремин В.Н., Зарецер Я.М., Лисовский В.А., Овчинин Д.И.

ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», Москва, Россия.

(25spec@25spec.ru)

В статье предложена конструкция универсального стенда для испытаний уплотнений вращающихся валов на безотказность и сохраняемость ускоренными методами, а также проводить исследования износостойкости материалов пар трения после различных сроков хранения.

Ключевые слова: уплотнения вращающихся валов, пары трения, надежность, сохраняемость.

В отдельных образцах военной техники (ВТ) широкое применение нашли насосы для перекачки нефтепродуктов, жидкого ракетного топлива и других специальных жидкостей. В состав сборочных единиц насосов входят уплотнения вращающихся валов (УВВ), выход из строя которых приводит к отказу насоса и образца ВТ в целом. Следует отметить, что в мирное время ВТ длительное время содержат на базах хранения в постоянной готовности к использованию по назначению. В связи с этим значительное внимание уделяется вопросам повышения безотказности и сохраняемости УВВ насосов при эксплуатации и хранении ВТ.

Испытания УВВ в реальных условиях дают наиболее достоверную информацию, однако являются весьма продолжительными и трудоемкими. Поэтому ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России» разработана методика ускоренных климатических испытаний УВВ и создан комплекс лабораторно-стендового оборудования для ее реализации [1, 2].

Стенд представляет собой набор приспособлений (модулей) [3] на различные типы УВВ (рис. 1) устанавливаемых на станину привода с помощью специального крепления. Через штуцеры 4 и 5 соответственно подводится и отводится рабочая жидкость с заданными параметрами (температура, давление), а привод обеспечивает вращение втулки с заданной частотой, обеспечивая имитацию работы УВВ в составе насоса.

Проведенные исследования по оценке влияния климатических факторов на сохраняемость насосных установок после различных сроков хранения в войсках позволили сформировать годовой цикл ускоренных испытаний, который по своему воздействию на техническое состояние УВВ равен календарному году хранения в натуральных условиях.

Климатические испытания проводятся, как правило, в течение 10-15 условных лет (один условный год равен 358 ч). Перед началом испытаний производится оценка начальных технических характеристик (параметров) образцов УВВ, после чего их помещают в климатическую камеру в составе модулей, чтобы моделировать условия их хранения в составе насоса. После первых четырех, а затем через каждые два условных года оценивается работоспособность образцов, а также отдельные показатели физико-механических свойств материала пар трения и других деталей.

Отличительной особенностью конструкции стенда является то, что она предусматривает возможность монтажа (демонтажа) модуля в сборе на вал привода без нарушения посадок уплотнительных элементов, что очень важно при испытаниях на сохраняемость. При работе стенда осуществляется принудительная циркуляция рабочей жидкости в полости модуля под заданным давлением, при этом подвижные части (пары трения) уплотнений, закрепленные на промежуточной втулке модуля, осуществляют вращательное движение с

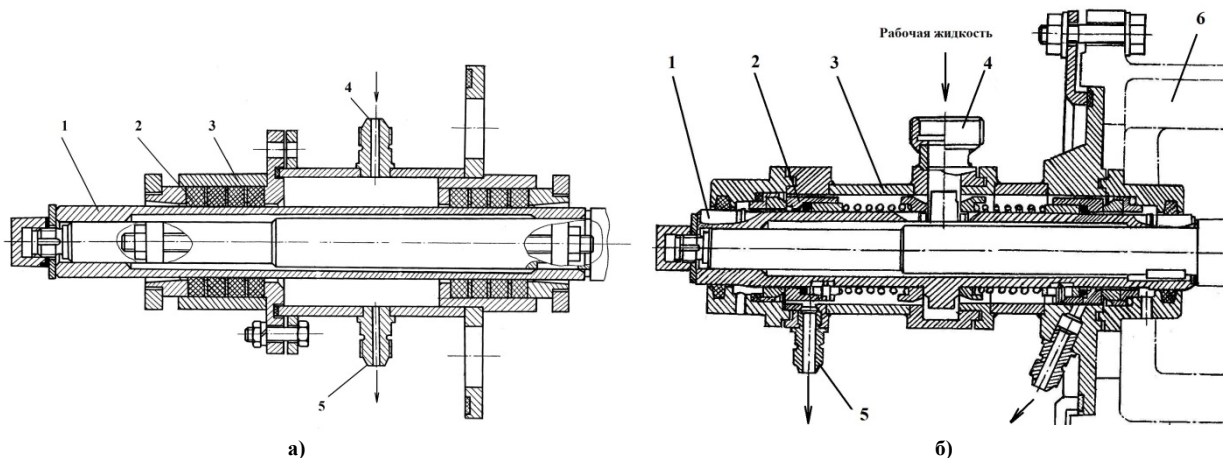


Рис.1 Стенд для испытаний УВВ:

1 – промежуточная втулка; 2 – пара трения (уплотнение: а) – торцовое, б) – сальниковое); 3 – камера в сборе; 4, 5 - штуцеры подвода и отвода рабочей жидкости; 6 – станина привода

установленной частотой вращения, что соответствует реальным условиям работы насосных установок.

Таким образом, широкое внедрение ускоренных методов испытаний УВВ на сохраняемость способствует проведению мероприятий по повышению их надежности в различных направлениях:

- предъявление требований к промышленности по улучшению качества применяемых материалов, совершенствованию конструкции деталей путем сравнения полученных показателей сохраняемости и заданных в техническом задании;
- выбор эффективных средств защиты наиболее слабых элементов от коррозии, старения и биоповреждений;
- прогнозирование сроков службы пар трения и других деталей и обосновать сроки их замены при проведении регламентированного технического обслуживания.

Стенд также может быть использован для проведения испытаний по подбору новых материалов пар трения и исследования их износных и других эксплуатационных характеристик.

[1] Еремин В.Н. и др. Ускоренные методы испытаний уплотнений вращающихся валов // Ремонт, восстановление, модернизация. - 2014 г. - №11. - С. 16-19

[2] Мониторинг технического состояния технических средств службы горючего ВС РФ и разработка рекомендаций по повышению их надёжности и совершенствованию технологий технического обслуживания и хранения. Отчет о НИР. ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России». М.: 2009. Инв. № 3742.

[3] Авторское свидетельство СССР на изобретение №1688007, МПК F16J, 15/00. Стенд для испытания уплотнений вращающихся валов / Еремин В.Н. и др.; заявитель и патентообладатель «Государственный научно-исследовательский институт по химмотологии» - 2013123756/05; заявл. 07.08.89; опубл. 23.07.91 Бюл. №27 - 4 с. с ил.

ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ АЛКИЛЬНОГО РАДИКАЛА НА СМАЗОЧНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ХОЛЕСТЕРИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ И ИХ СМЕСЕЙ

¹Ермаков С.Ф. (erm-s@yandex.ru), ¹Мышкин Н.К., ²Усольцева Н.В.

¹Институт механики металлополимерных систем НАН Беларуси, Гомель, Беларусь;

²Ивановский государственный университет, НИИ наноматериалов, Иваново, Россия.

Установлена взаимосвязь триботехнических свойств холестерических жидких кристаллов и их молекулярного строения. Показано, что смазочная способность жидких кристаллов холестерического типа зависит от их молекулярной массы. С увеличением длины алкильного радикала в холестерических жидких кристаллах наблюдается снижение напряжения волочения заготовки и увеличение диаметра пятна износа. Установлено, что при добавке холестерических жидких кристаллов в минеральные и синтетические масла зависимость величины угла вращения плоскости поляризации света от числа атомов углерода в алкильном радикале эфиров холестерина для всех исследуемых сред в полулогарифмических координатах носит линейный характер.

Ключевые слова: холестерические жидкие кристаллы, молекулярное строение, смазочная способность, напряжение волочения, диаметр пятна износа.

Введение

Как известно, повышение триботехнических показателей уже имеющихся смазочных материалов (СМ) путем введения в них присадок представляет собой оптимальный и экономически целесообразный способ повышения долговечности узлов трения и снижения их энергоемкости [1, 2]. Опыт показывает, что важную роль при этом могут играть холестерические жидкие кристаллы (ХЖК). Очевидно, что максимальный эффект их смазочного действия будет достигаться при условии реализации в зоне трения упорядоченного состояния СМ, для которого характерно ориентированное расположение молекул как ЖК-добавки, так и молекул смазочной среды. Поэтому, исходя из представлений о структуре смазочных слоев, образованных молекулами ХЖК, можно предположить, что эффективность смазочного действия

таких ХЖК будет зависеть от их молекулярного строения и содержания в СМ. С другой стороны, не менее важным с трибологической точки зрения является разработка эффективных методов и средств определения содержания ХЖК в СМ. Анализ литературных источников показывает, что основой для проведения таких работ может быть свойство эфиров холестерина изменять в зависимости от молекулярной массы оптическую активность содержащих их растворов [3].

В связи с этим в настоящей работе предпринята попытка установить взаимосвязь триботехнических и оптических свойств ХЖК и их молекулярного строения.

Материалы и методы исследования

В исследованиях использовали синтезированные в лабораторных условиях как индивидуальные

ХЖК, так и их растворы в минеральных и синтетических маслах.

Исследования зависимости триботехнических свойств жидких кристаллов от их молекулярного строения проводили в два этапа. На первом этапе исследовали указанную зависимость для индивидуальных ХЖК, а на втором — для их растворов в смазочных маслах. Оценка смазочной способности ХЖК на первом этапе осуществлялась по напряжению волочения медной катанки. ХЖК при этом наносились на предварительно подготовленную, как описано выше, поверхность катанки из раствора в CCl_4 . После испарения растворителя заготовка подвергалась испытанию.

Триботехнические свойства исследуемых ХЖК оценивались по величинам напряжения волочения медной катанки (ТУ 16.К 71-003-87) диаметром 7,2 мм через волоку, обеспечивающую степень деформации 28,3%. Предварительно заготовки из медной катанки травили в смеси азотной и серной кислот, промывали дистиллированной водой, сушили, затем калибровали путем пропускания через волоку диаметром 6,985 мм при смазывании вазелиновым маслом. Волочение осуществляли на разрывной машине ZD-20, оборудованной держателем волок. Скорость волочения составляла 0,002 м/с. Противоизносные свойства растворов ХЖК оценивали на четырехшариковой машине в соответствии с ГОСТ 9490—75. Исследовали смазочные композиции, содержащие 1,5 мас.% ХЖК в вазелиновом масле (ВМ). В качестве контролируемого параметра износа выбран диаметр пятна износа.

Исследования зависимости величины вращения плоскости поляризации света от концентрации в изучаемых растворах ХЖК проводили с помощью сахариметра СУ-4. Измерения производили в сахарных градусах ($^{\circ}S$, $1^{\circ} = 2,8885^{\circ}S$) с использованием кюветы длиной $L = 200$ мм.

Результаты исследования и их обсуждение

Исследования зависимости напряжения волочения от числа атомов углерода в алкильном радикале для выбранных ХЖК показали, что оно уменьшается с увеличением длины алкильного радикала (рис. 1). Следовательно, смазочная способность ХЖК, входящих в исследуемый гомологический ряд, зависит от молекулярной массы алкильного радикала. Более высокомолекулярные гомологи обеспечивают более низкое трение при волочении.

Поскольку в указанных условиях ХЖК выполняют роль твердой смазки, то для объяснения установленной закономерности мы обратились к теплофизическим свойствам, в частности, энтальпии плавления ХЖК. Как показали исследования, энтальпия плавления исследуемых гомологов является линейной функцией количества атомов углерода в алкильном радикале. Такая закономерность обусловлена преимущественным значением в образовании жидкокристаллической структуры сил взаимодействия между алкильными цепями исследуемых гомологов. Поскольку последние не

обладают дипольным моментом, то взаимодействие между ними определяется преимущественно дисперсионными силами. В то же время известно, что дисперсионные силы на единице площади поверхности любой молекулы или вещества постоянны и зависят не от природы вещества, а только от межмолекулярного расстояния. С учетом этого становится вполне очевидным рост сил межмолекулярного взаимодействия и, следовательно, энтальпии плавления при увеличении длины алкильного радикала в ХЖК.

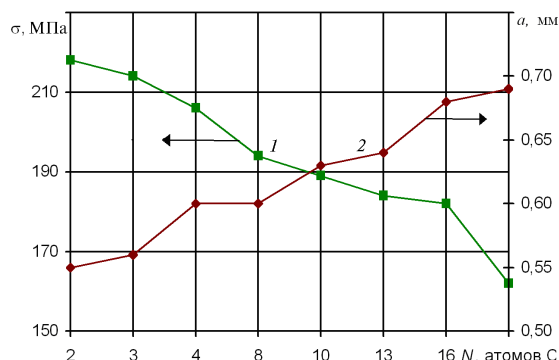


Рис. 1. Влияние длины алкильного радикала ХЖК на напряжение волочения (1) и показатель износа (2).

Влияние молекулярного строения ХЖК на их триботехнические свойства проявляется не только при исследованиях коэффициента трения и нагрузочной способности, но и при изучении изнашивания. Как показали исследования, выполненные на четырехшариковой машине трения, диаметр пятна износа a для 1,5%-ных растворов в ВМ ХЖК с длиной алкильного радикала от C_2 до C_{15} изменяется в зависимости от номера используемого гомолога (см. рис. 1). Как следует из рисунка с ростом длины алкильного радикала наблюдается увеличение a , что свидетельствует о снижении их противоизносных свойств. Парный регрессионный анализ полученных результатов показал, что зависимость a от длины алкильного радикала в исследуемых ХЖК является линейной с коэффициентом корреляции 0,9. При анализе причин, обуславливающих зависимость износа от длины радикала в ЖК, обращает на себя внимание то обстоятельство, что росту a соответствует уменьшение растворимости ХЖК в вазелиновом масле. Низкая растворимость высокомолекулярных гомологов ХЖК является препятствием к образованию на поверхностях трения адсорбционных слоев молекул ХЖК, что и приводит к увеличению износа контактирующих поверхностей.

Кроме того, установлено, что при введении ХЖК в минеральные и синтетические масла зависимость величины угла вращения плоскости поляризации света от числа атомов углерода в алкильном радикале ХЖК для всех исследуемых сред в полулогарифмических координатах носит практически линейный характер (рис. 2).

Показано, что зависимость интенсивности вращения плоскости поляризации света от конкретного состава ХЖК объясняется как различиями в

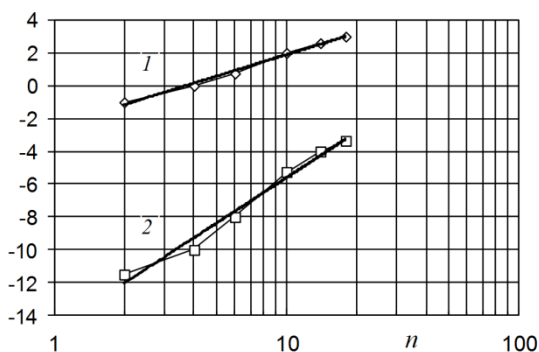


Рис. 2. Зависимость угла вращения плоскости поляризации от числа атомов углерода n в алкильной цепи ХЖК: 1 – 5%-ная концентрация ХЖК в ВМ; 2 – 10%-ная концентрация ХЖК в ВМ

строении молекул, так и различной молярной массой исследуемых соединений холестерина. Сделан вывод о том, что различие в строении молекул ХЖК приводит при одинаковой их массовой концентрации в базовом составе к различным количествам молекул в единице объема раствора, и, следовательно, к различной оптической активности исследуемых масляных композиций, что и наблюдается экспериментально.

- [1] Kolesnikov V.I., Myshkin N.K., Ermakov S.F., Sychev A.P. Thermoinduced Effect of Reversible Lubricating Ability of Cholesteric Liquid-Crystalline Nanomaterials in Friction of Solids // Doklady Physical Chemistry. — 2014(457), Part 2, 123-126
 [2] Жидкие кристаллы: дискотические мезогены / Н. В. Усольцева, О.Б. Окопова, В.В. Быкова, А.И. Смирнова, С.А. Пикин. Под ред. Н.В. Усольцевой. — Иваново: Иван. гос. ун-т — 2004
 [3] Трибология жидкокристаллических наноматериалов и систем / С.Ф. Ермаков. — Минск: Беларус. Навука. — 2011

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДНЫХ ЭМУЛЬСИЙ ОЛЕИНОВОЙ КИСЛОТЫ

¹Есипова Н.Е., ¹Лознецова Н.Н., ¹Малкин А.И., ²Павелко Г.Ф.,
¹Соболев В.Д., ¹Топоров Ю.П. (yupt@rambler.ru)

¹ Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия;

² Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Москва, Россия.

Изучены противоизносные и противозадирные свойства водных эмульсий олеиновой кислоты. Обнаружена зависимость трибологических свойств эмульсии от размера капель дисперсной фазы.

Ключевые слова: эмульсии, трение, износ, смазочно-охлаждающие жидкости.

Экологически безопасные водные эмульсии олеиновой кислоты находят в последнее время все более широкое применение в качестве смазочно-охлаждающих и технологических жидкостей в технике [1]. Однако их возможности и трибологические свойства изучены далеко не полностью [2]. Настоящая работа посвящена исследованию противоизносных и противозадирных свойства водных эмульсий олеиновой кислоты, полученных разными методами диспергирования кислоты.

Материалы и методы.

В работе исследовали 2%-ную эмульсия олеиновой кислоты в 0,1 мольном водном растворе катионоактивного ПАВ (цетилтриметиламмонийбромид-ЦТАБ). Для получения устойчивых эмульсий использовались: кавитационная обработка с помощью УЗ-диспергатора марки МЭФ-392 (при этом получаемая эмульсия - эмульсия №1 представляла собой гомогенную жидкость молочно-белого цвета) и дезинтеграторная обработка с помощью дезинтегратора, в котором смесь воды и кислоты подвергали ударным воздействиям при проходе через зазор между двумя вращающимися в разных направлениях дисками с выступающими в зазор кулачками (при этом получали полупрозрачную эмульсию-эмульсию №2).

Измеренные методом динамического светорассеяния на приборе Malvern-Nano ZS размеры

капель кислоты эмульсий оказались разными: эмульсия №1 имела широкий спектр размеров весьма крупных капель (от 100 до 10000 нм), а эмульсия №2 характеризовалась узким спектром существенно более мелких капель (от 10 до 100 нм).

Трибологические свойства полученных систем оценивали по стандартной методике [3] на 4-х шариковой машине трения типа ЧМТ-1. Определяли следующие противозадирные характеристики испытуемых эмульсий: критическую нагрузку (P_k), нагрузку сваривания (P_c) и индекс задира (I_3). Противоизносные свойства оценивали по показателю износа D_n при постоянных нагрузках 196 Н и 490 Н при продолжительности испытания 60 мин.

Результаты экспериментов

Результаты испытаний приведены в табл.1 и 2, из сопоставления которых четко проявляются существенные отличия в трибологических характеристиках исследуемых эмульсий.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что уменьшение размера капель эмульсий сопровождается улучшением противозадирных свойств: увеличением критической нагрузки, нагрузки сваривания и индекса задира. При этом противоизносные свойства эмульсий с уменьшением капель дисперсной фазы несколько ухудшаются. Особенно это отчетливо заметно при нагрузке 490 Н (табл. 2).

Таблица 1. Зависимость среднего диаметра пятна износа d_n от нагрузки при испытаниях эмульсий на машине трения ЧМТ-1.

Нагрузка, Н	Эмульсия №1,	Эмульсия №2,
	d_n , мм	d_n , мм
235	0,32	0,29
314	0,32	0,31
392	0,32	0,32
490	0,36	0,33
617	0,39	0,39
784	0,44, P_k	0,41
980	2,70	0,45
1039	P_c	
1098		0,46, P_k
1166		P_c

Результаты исследования не только подтверждают факт зависимости свойств смазочно-охлаждающих жидкостей от технологии их получения [4], но и демонстрируют влияние размера капель дисперсной фазы на трибологические свойства эмульсий.

Последнюю зависимость можно объяснить влиянием размера капель на реологические свойства и смачивающую способность эмульсий, поскольку именно эти свойства определяют скорость проникновения эмульсии в зону контакта [5, 6].

Таблица 2. Сопоставление трибологических характеристик водных эмульсий олеиновой кислоты.

Эмульсия №	P_k , Н	P_c , Н	I_s , Н	D_n , мм	
				196 Н	490 Н
1	784	1039	371	0,63	0,70
2	1120	1166	521	0,67	0,87

Выводы

Проведенные исследования показали не только перспективность использования водных эмульсий олеиновой кислоты в качестве смазочно-охлаждающих технологических жидкостей, но и возможность изменения их трибологических свойств путем изменения степени дисперсности эмульсий без изменения компонентного состава.

[1] Абдулгасис Д. У. Композиционные смазочно-охлаждающие технологические среды на основе растительных масел // Резание и инструмент. Межд. научно-техн. сб. Харьков НТУ «ХПИ». - 2007, вып. 73, 38-42.

[2] Берлинер Э. Д., Буяновский И. А. Подбор СОЖ для обработки металлов с учетом их смазочно-охлаждающего действия // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2012, №6, 34-37

[3] ГОСТ 32502-2013. Жидкости смазочные. Определение противозадирных свойств на 4-х шариковой машине трения. – М.: Стандартинформ, - 2013.

[4] Марков В. В., Киселева Е. В. Влияние способа перемешивания технологических жидкостей на их структуру // Вестник Иван. гос. энерг. ун-та. – 2009, вып.9, 1-3.

[5] Сумм Б. Д., Горюнов Ю. В. Физико-химические основы смачивания и растекания. – М.: Химия, - 1976, 232 с.

[6] Годлевский В. А., Волков А. В., Латышев В. Н., Маурин Л. Н. Проникающая способность смазочно-охлаждающей технологической среды как фактор эффективности обработки резанием // Трение и износ. – 1995, (16), №5, 938-949.

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КОМПЛЕКСНОЙ СУЛЬФОНАТ КАЛЬЦИЕВОЙ СМАЗКИ

**Жорник В.И. (zhornik@inmash.bas-net.by), Ивахник А.В.,
Ивахник В.П., Бухтилова М.А.**

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск, Беларусь.

Одним из эффективных способов получения пластичных смазок из сульфонатных соединений является их обработка при определенных условиях активными агентами, преобразующими аморфный карбонат кальция в одну из кристаллических его модификаций (кальцит). Форма структурированного подвижного каркаса дисперсной фазы комплексной сульфонат кальциевой смазки обеспечивает ее высокую адаптивность к уровню механической и термической нагруженности трибосопряжения.

Ключевые слова: сульфонат кальциевая смазка, дисперсная фаза, аморфный карбонат кальция, кальцит, структура.

Введение

Повышение эффективности использования современной техники неразрывно связано с применением новых смазочных материалов, характеризующихся повышенным уровнем физических и трибологических свойств. Сульфонат кальциевые пластичные смазки относятся к числу высокоэффективных смазочных материалов для обслуживания узлов трения широкого спектра машин, экс-

плуатирующихся при высоких нагрузках и температурах, в условиях повышенной влажности. Совершенствование технологических процессов синтеза сульфонат кальциевых смазок невозможно без установления особенностей формирования их дисперсной фазы (ДФ) и выявления взаимосвязи между характером структуры ДФ и уровнем свойств смазки.

Целью работы является исследование закономерностей формирования структуры и свойств комплексной сульфонат кальциевой смазки.

Материалы и методы исследования

Объект исследования – комплексная сульфонат кальциевая (kSulCa-) смазка, изготовленная загущением сульфонат кальциевым комплексом смеси нефтяных масел с кинематической вязкостью 240–360 мм²/с при 40 °С.

Исследование структуры дисперсной фазы смазки проводилось с использованием методов сканирующей электронной микроскопии и ИК-спектроскопии. Для определения физических и трибологических характеристик применялись стандартизованные методики.

Результаты и их обсуждение

Изучение структуры карбоната кальция в коллоидных частицах показывает, что существует четыре формы CaCO₃: аморфная и три кристаллических (кальцит, фатерит и арагонит). В сульфонатных присадках аморфные частицы карбоната кальция с размером 2–15 нм стабилизированы в масле сульфонатом кальция, образуя дисперсии малой вязкости. Простейшим способом получения пластичных смазочных материалов из сульфонатных соединений является их обработка при определенных условиях активными агентами, преобразующими аморфный карбонат кальция в одну из кристаллических его модификаций (кальцит).

В комплексных сульфонат кальциевых дисперсиях отдельные микромицеллы с индивидуальным наноразмерным ядром из аморфного CaCO₃ и стабилизирующей оболочкой из сульфоната кальция и кальциевой соли 12-гидрооксистеариновой кислоты образуют макромицелярную трехмерную структуру, т.е. непосредственно дисперсную фазу, которая может быть использована для получения пластичных смазок.

Для получения kSulCa-смазок характерен химический принцип модифицирования дисперсной фазы наночастицами, в соответствии с которым сначала синтезируются центры кристаллизации в виде аморфноподобных частиц карбоната кальция, затем они покрываются высокомолекулярной оболочкой, происходит переход аморфного наноразмерного центра в кристаллическую модификацию карбоната кальция (нанокальцит), рост на его поверхности иглообразных волокон и формирование трехмерной структуры дисперсной фазы.

Для получения комплексной сульфонат кальциевой смазки с повышенными свойствами необходимо добиваться степени перехода аморфного карбоната кальция с пиком поглощения при 860 см⁻¹ в его кристаллическую кальцитную модификацию, характеризующуюся полосой поглощения ИК-спектра при 874 см⁻¹, до уровня более 60–70%.

Структура единичного элемента дисперсной фазы kSulCa-смазки представляет собой микромицеллу в виде нанокальцитного ядра (размером до 200 нм) и тонких иглообразных кристаллов кальцита толщиной порядка 100 нм и длиной 1–5 мкм (рис. 1, а).

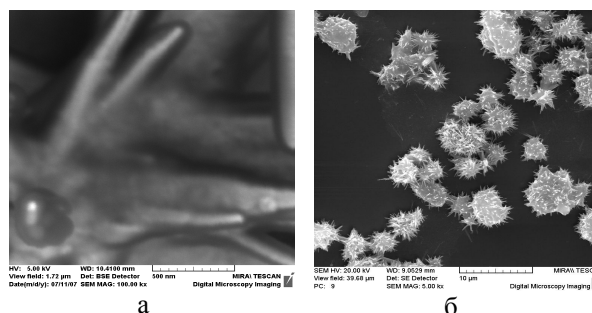


Рис. 1. Структура отдельной микромицеллы (а) и пространственного каркаса (б) дисперсной фазы kSulCa-смазки

Единичные элементы дисперсной фазы скрепляются остатками фатерита и аморфноподобной модификации карбоната кальция в отдельные конгломераты микронных размеров, которые представляют собой макромицелярную трехмерную структуру, и, в свою очередь, за счет сил различного межмолекулярного взаимодействия образуют в совокупности пространственный каркас kSulCa-смазки (рис. 1, б).

Подобная форма структурированного подвижного каркаса ДФ обуславливает высокую адаптивность kSulCa-смазки к уровню механической и термической нагруженности узла трения при высокой температуре каплепадения (свыше 320 °С), повышенной механической стабильности (изменение пенетрации после 100000 циклов нагружения 35·10⁻⁴ м) и улучшенных противозадирных свойствах (нагрузка сваривания 5600 Н).

Заключение

Химический синтез центров кристаллизации дисперсной фазы kSulCa-смазки обеспечивает химическую чистоту и стабильность размеров наночастиц дисперсной фазы, высокую степень упорядоченности ее структуры, что в значительной степени предопределяет повышенные эксплуатационные характеристики kSulCa-смазки. По совокупности эксплуатационных параметров (термостойкость, механическая и коллоидная стабильность, водостойкость, смазывающая способность, прокачиваемость и др.) kSulCa-смазки существенно превосходят комплексные литиевые, комплексные кальциевые, комплексные алюминиевые и полимочевинные смазки. Особенно эффективно использование kSulCa-смазки в узлах трения, работающих в экстремальных условиях (при высоких (до 240 °С) температурах, в контакте с соленой водой, при высоких ударных нагрузках).

Разработанная комплексная сульфонат кальциевая смазка OIMOL KSC WR 2 (ТУ ВУ 190410065.017-2014) является универсальной смазкой для подшипников качения и скольжения, работающих при низких и средних скоростях в диапазоне температур от –30 до +200 °С (кратковременно до +240 °С) в условиях повышенной влажности (до 100%), что делает ее перспективной для использования в узлах трения строительного-дорожного и горно-шахтной техники, кузнечно-прессового и металлургического оборудования, автомобильного и железнодорожного транспорта, средств морского базирования и др.

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ НИКЕЛЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР ПРИ ФРИКЦИОННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ

¹Задошенко Е.Г. (zadoshenkoq@rambler.ru), Бурлакова В.Э., Новикова А.А.

Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону, Россия.

В работе рассмотрено влияние содержания наночастиц никеля на триботехнические свойства смазки ЦИАТИМ-201. Наночастицы никеля размером 30 нм получали разложением прекурсора формиата никеля. На основе смазки ЦИАТИМ-201 и синтезированных наночастиц никеля создавали смазочные композиции с содержанием в них никеля от 0,1 до 8 % масс. Результаты трибологических исследований показали, что введение наночастиц никеля приводит к улучшению триботехнических характеристик смазки ЦИАТИМ-201.

Ключевые слова: трение, износ, наночастица, никель, пластическая смазка, присадка.

Введение. Благодаря своим уникальным физико-механическим характеристикам наноматериалы находят применение в различных областях техники и медицины [1]. В настоящее время с использованием наноразмерных порошков металлов разрабатываются объемно-модифицирующие добавки, сухие смазочные материалы и твердосмазочные покрытия. Используются нанопорошки металлов и в качестве присадок к абразивным суспензиям и пастам для притирочно-доводочных работ, к смазочно-охлаждающим жидкостям, применяемых в процессах резания металлов, к технологическим средам для обработки металлов давлением, к моторным, трансмиссионным, промышленным маслам и пластическим смазкам [2-5].

В связи с этим, поиск новых функциональных наноматериалов и изучение особенностей их влияния на триботехнические характеристики узлов трения имеет практический интерес. Целью данной работы является изучение возможности использования нанопорошков никеля в качестве металлоплакующей добавки к пластичной смазке, работающей в паре трения сталь-сталь.

Материалы и методы. Объектами являлись смазочные композиции, созданные на базовой основе пластической смазки ЦИАТИМ-201 и добавок наночастиц никеля (табл.1).

Наночастицы никеля получали разложением при температуре 260°C прекурсора дигидрата формиата никеля, синтез которого осуществляли последовательным проведением ряда обменных реакций между сульфатом никеля (х.ч. ГОСТ 4465-61) и карбонатом натрия (х.ч. ГОСТ 83-79), а затем между карбонатом никеля и муравьиной кислотой (НСООН-85% ГОСТ 5848-73).

Таблица 1. Исследуемые смазочные композиции

Смазочные композиции	Базовая основа	Содержание наночастиц никеля, % масс.
Смазка 1	ЦИАТИМ-201	-
Смазка 2		0,1
Смазка 3		0,5
Смазка 4		1
Смазка 5		2
Смазка 6		8

Рентгенофазовые (РФА) исследования прекурсора, наночастиц никеля и поверхности трения выполняли на автоматизированном дифрактометре ARL X'TRA. Размеры и форму частиц никеля определяли с использованием седиментационного анализа и сканирующей туннельной микроскопии. Эволюционные изменения коэффициента трения в паре трения сталь 45- сталь 45 в присутствии смазочных композиций с различным содержанием наночастиц никеля исследовали на машине трения АЕ-5 в течение 3 часов при нагрузке 100 Н. Противоизносные и противозадирные свойства смазок определяли на четырехшариковой машине трения по ГОСТу 9490-75.

Анализ топографии поверхностей трения и износа проводили с использованием атомно-силовой микроскопии (АСМ) на приборе марки RHYWE Compact. Для установления элементного состава поверхности трения использовали сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) TESCAN MIRA 3 XMU с программным обеспечением «AZtec 2.1».

Результаты и их обсуждение. Результаты трибологических испытаний пары трения сталь-сталь показывают, что наличие наночастиц никеля улучшают противоизносные и противозадирные свойства смазки ЦИАТИМ-201. С ростом концентрации наночастиц никеля в смазочной композиции уменьшается значение диаметра пятна износа (рис.1), а значения критической нагрузки, нагрузки сваривания и индекса задира увеличиваются (рис.2).

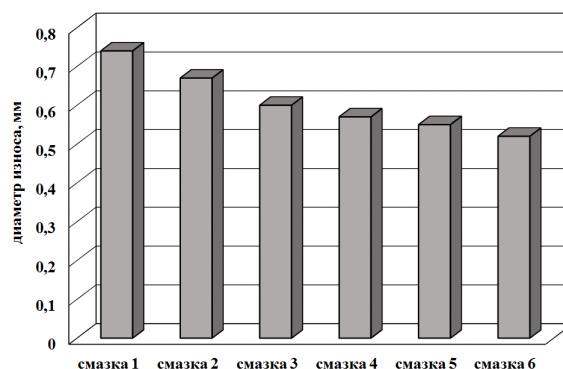


Рис. 1. Гистограмма диаметра пятна износа.

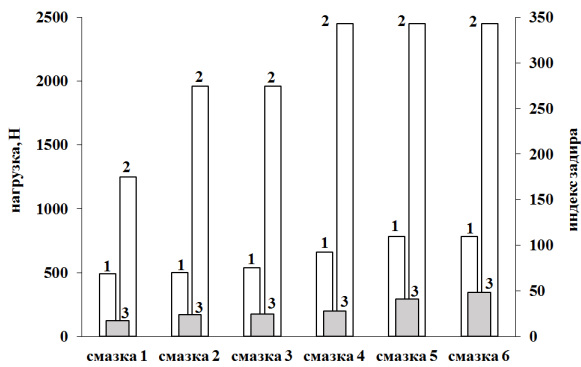


Рис. 2. Гистограмма критической нагрузки (1), нагрузки сваривания (2) и индекса задира (3).

Повышение несущей способности пленки обнаруживается для смазочных композиций с содержанием наночастиц никеля более 1% масс.

Проведенные длительные эволюционные изменения коэффициента трения в паре сталь-сталь в присутствии различных смазочных композиций позволили установить снижение коэффициента трения на 30%. При этом введение нанопорошка никеля в базовую смазку не приводит к образованию металлоплакирующих пленок на поверхности трения.

Анализ поверхностей дорожки трения и пятен износа, проведенный РФА и СЭМ, не обнаруживает следов никеля, в то время, как при использовании масла РАОб с частицами никеля, напротив, обнаруживается его присутствие на поверхности износа при высоких нагрузках [4].

Улучшение триботехнических характеристик пластичных смазок, по-видимому, обусловлено формированием в зоне трения устойчивого разде-

лительного слоя, в состав которого включаются фрагменты основного металла поверхности трения, его оксидов, продукты окисления смазки, а также оксиды никеля, образующиеся в зоне фрикционного контакта в результате окисления наноразмерного никеля. Вследствие этого изнашивание пары трения сталь-сталь локализуется в пределах защитного граничного слоя, что предотвращает металл от разрушения [6].

Таким образом, введение наночастиц никеля в базовую смазку ЦИАТИМ-201 приводит к повышению ее противозносных и противозадирных и антифрикционных характеристик. Улучшение триботехнических параметров смазки обусловлено формированием устойчивого разделительного слоя в зоне трения. Увеличение содержания наночастиц никеля в пластической смазке ЦИАТИМ-201 способствует росту ее несущей способности.

- [1] Елисеев А.А., Лукашин А.В. Функциональные материалы / под ред. Третьякова Ю.Д. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010.
- [2] Patil Sangram J., Patil D. P., Shrotri A. P., Patil V P. A review on effect of addition of nanoparticles on tribological properties of lubricants. //Inter. J. of Mech. Eng. and Tech. – 2014(5), 120-129.
- [3] Chou R., Hernández Battez A., Cabello J.J., Viesca J.L., Osorio A., Sagastume A. Tribological behavior of polyalphaolefin with the addition of nickel nanoparticles. //Trib. Inter. – 2010(43), 2327–2332.
- [4] Задошенко Е.Г., Бурлакова В.Э. Влияние нанопорошков никеля на триботехнические характеристики пластичной смазки /Е.Г. Задошенко, // Материалы XII междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы синергетики в трибологии, трибоэлектрохимии, материаловедении и мехатронике, Новочеркасск: ЮРГРУ(НПИ).- 2013, 28-30.
- [5] Тарасов С.Ю., Беляев С.А., Гирсова С.Л. Окислительное изнашивание конструкционной стали в присутствии нанопорошков металлов. /Физическая мезомеханика 7. Спец. выпуск. Ч.1 (2004) 433-436.

НАКОПЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ В МЕТАЛЛЕ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО ПОДХОДА

¹Зайнетдинов Р.И., ²Гадолина И.В.

¹МИИТ, Москва, Россия;

²Институт машиноведения РАН, Москва, Россия,

Мультифрактальная трактовка феноменологических процессов накопления повреждений от износа и усталости проводится с целью адекватного описания поведения конструкций.

Ключевые слова: мультифрактал, вейвлетный анализ, накопление повреждений

Для анализа была использована модель стохастического точечного процесса. Если масштабировать время τ_i i -го единичного повреждения с учетом максимального времени наблюдения τ_{max} , получим интервал времени T единичной продолжительности, на котором располагаются все точки множества. Кумулятивная функция меры повреждения в определенном смысле подобна фракталу (точнее, предфракталу при любом конечном N). Чтобы определить распределение вероятностной меры повреждения по единичному временному интервалу, разделим его сначала на две равные части $\Delta t = 1/2$. Поставим в соответствие левой час-

ти $[0, 1/2]$ интервала отвечающую ей накопленную меру μ_0 повреждения, а правой части $[1/2, 1]$ - меру μ_1 . Продолжив двоичную разбивку временного интервала, на n -ом шаге получим $K = 2^n$ подынтервалов длительностью $\Delta t_n = 2^{-n}$ с определенными мерами μ_j повреждения в каждом из них.

Множество таких вероятностных мер для K временных подынтервалов

$$\Omega = \left\{ \mu_j \right\}_{j=0}^{K-1} \quad (1)$$

позволяет полностью и единственным способом описать распределение повреждения при хорошем

разрешении, т.е. при достаточно малом $\Delta t_j = 2^{-n} = 1/2^n$ и $n \rightarrow \infty$.

Рассмотрим, что произойдет, если данный процесс будет отвечать условиям статистических испытаний Бернулли. Исходом испытания Бернулли на n -ом шаге считалось попадание времени t_j наступления события (единичного повреждения) в левый или правый подынтервал Δt_n единичного временного интервала T . При этом на каждом шаге процесса левая часть подынтервала ставится в соответствие отвечающая ей вероятностная мера $\mu_0 = p$, а правой части - мера $\mu_1 = q = 1 - p$, причем вероятности p и q остаются неизменными для всех поколений процесса. На первом шаге ($n = 1$) плотность перераспределяется таким образом, что мера $\mu_0 = p$ равномерно распределяется по левой половине $[0, 1/2]$ единичного интервала T , а оставшаяся часть $\mu_1 = q$ равномерно распределяется по правой $[1/2, 1]$. В течение всего процесса выполняется условие нормировки $\mu_0 + \mu_1 = p + q = 1$, т.е. первоначальная вероятностная мера временного интервала сохраняется.

На следующем шаге ($n=2$) над подынтервалами выполняются те же операции, какие выполнялись на предыдущем шаге ($n=1$) над всем интервалом, т.е. плотность перераспределяется между новыми подынтервалами с использованием тех же вероятностей p и q . В результате получаем следующие меры повреждений в подынтервалах:

$$M_2 = \left\{ \mu_j \right\}_{j=0}^{2^2-1} = \{pp; pq; qp; qq\} \quad (2)$$

На k -м шаге процесса получаем k -е поколение, в котором мера распределена между $N = 2^k$ временными подынтервалами. Мера, распределенная по двоичному интервалу, имеющему двоичный адрес $0, \beta_1 \beta_2 \beta_3 \dots \beta_k$, равна [1]:

$$\mu[0, \beta_1 \beta_2 \beta_3 \dots \beta_k] = \prod_{i=1}^k \mu[\beta_i] = p^{n_0} q^{n_1}, \quad (3)$$

где n_0 - число цифр 0 в двоичном адресе $0, \beta_1 \beta_2 \beta_3 \dots \beta_k$ подынтервала; $n_1 = k - n_0$ - число цифр 1. Как видно из формулы (3), вероятностная биномиальная мера каждого двоичного временного интервала является результатом перемножения k сомножителей $\mu[\beta_i]$, т.е. она сгенерирована мультипликативным биномиальным процессом (МБП). Сам же мультипликативный процесс порожден испытаниями Бернулли с постоянным параметром - вероятностью p того, что событие (единичный скачок) произойдет в первой половине интервала, на интервале $[0, 1/2]$. Вероятностная мера повреждения, порождаемая МБП, распределяется по множеству точек интервала времени $T = [0, 1]$.

С целью отработки методического и программного обеспечения для вычисления функций, характеризующих мультифрактальные свойства вероятностной меры повреждения, выполнено статистическое моделирование серии испытаний Бернулли с различными значениями параметра p , в результате которых сгенерированы соответствующие МБП. В процессе анализа рассмотрены три типичные формы кумулятивной функции $F(x)$

(рис. 1), соответствующие замедляющемуся ($p > 0,5$ - линия 1), ускоряющемуся ($p < 0,5$ - линия 2) и линейному. С ростом параметра число ступенек функции $F(x)$ растет, а их высота уменьшается, в результате ступенчатые кривые все ближе к диагонали.

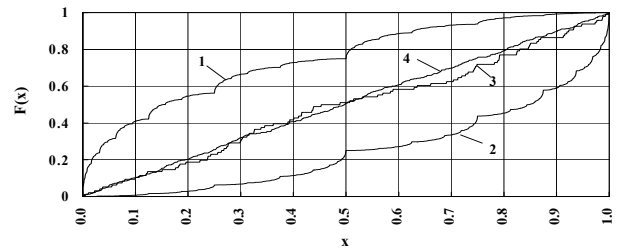


Рис. 1. Формы кумулятивной функции $F(x)$.

Мультифрактальные свойства характеризуются обычно рядом функций [1], среди которых спектр сингулярностей $f(\alpha)$, являющийся функцией показателя α сингулярности, последовательность показателей τ_q , определяющих, по какому степенному закону изменяются вероятности во множестве (1) в зависимости от разрешения, обусловленного разбивкой на подынтервалы, а также обобщенная фрактальная размерность D_q . В работе [1] приведены графики перечисленных функций и уравнения, устанавливающие связь параметра p испытаний Бернулли с функциями, характеризующими мультифрактальность вероятностной меры, сгенерированной этими испытаниями.

Таким образом, вероятностная мера повреждения материала, обладающая мультифрактальными свойствами, рекурсивно генерируется мультипликативным би- или полиномиальным процессом, порождаемым серией независимых повторных испытаний Бернулли.

Вывод о мультифрактальной природе процесса накопления повреждений подтверждается также вейвлетным анализом ряда тестовых примеров и результатов испытаний. В общем виде вейвлет-преобразование $W\{\mu(x)[a,b]\}$ вероятностной меры $\mu(x)$ состоит в разложении этой меры по базису, сконструированному из материнского вейвлета $\psi(x)$ путем дилатаций, которые контролируются параметром масштаба $a > 0$, и путем трансляций, контролируемых параметром сдвига b [2]:

$$W\{\mu(x)[a,b]\} = \int_{Supp \mu} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) d\mu(x), \quad (4)$$

где $Supp \mu$ - множество-носитель вероятностной меры $\mu(x)$.

Результатом вейвлет-преобразования вероятностной меры является двухмерный массив коэффициентов (амплитуд) этого преобразования в координатах "временной масштаб a^{-1} , временная локализация b ". Картины линий локальных экстремумов, называемые скелетом вейвлет-преобразования, четко визуализируют внутреннюю структуру исследуемого процесса и позволяют количественно оценить наличие самоподобных или самоаффинных свойств у исследуемого объекта. Вейвлет-преобразованию подвергались

реализации, полученные путем статистического моделирования процессов, при испытаниях и в реальных условиях эксплуатации конструкций.

Покажем применение непрерывного вейвлет-преобразования к данным о отказах образцов при испытании на усталость. Графики эмпирических функций распределения $F(N)$ наработки образцов трех выборок в зависимости от числа циклов N нагружения показаны на рис. 2[4].

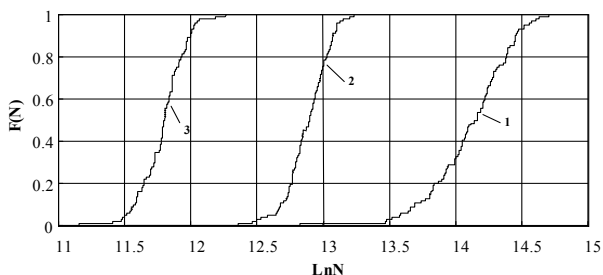


Рис. 2. Эмпирические функции распределения $F(N)$ наработки до отказа при испытаниях образцов из выборок 1, 2 и 3.

Для проверки гипотезы о мультифрактальности процесса накопления повреждений эти данные подвергнуты вейвлетному анализу [5]. На рис. 3 показан скелет максимумов непрерывного вейвлет-преобразования вероятностной меры эмпирической наработки образцов первой выборки. Количественная оценка наличия самоподобных свойств в исследуемых процессах выполнялась по методике, изложенной в [3].

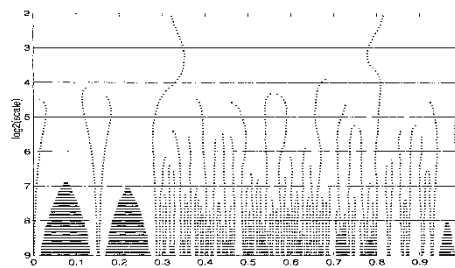


Рис. 3. Скелет вейвлет-преобразования.

Выполненный анализ скелетов вейвлет-преобразования показал возможность линейной регрессии эмпирических точек на графиках в координатах $\log_2(N_1(a)) - \log_2(a)$. Анализ показал, что процесс накопления повреждений стохастически самоподобен. Теория фракталов может служить основой для описания внутренней структуры процесса накопления повреждений, что позволяет глубже понять его природу на основе универсальных закономерностей самоподобия.

[1] Evertsz C., Mandelbrot B. Multifractal Measures // Chaos and Fractals: New frontiers of science. - New York: Springer-Verlag, 1992. - P. 921 - 953.

[2] Зайнетдинов Р.И. Представление результатов испытаний Бернулли в виде мультифрактала // Методы менеджмента качества, 2000, № 3. - С. 36 - 41.

[3] Зайнетдинов Р.И. Вейвлетный анализ и его применение в инженерном деле. Уч. пособие. - М.: МИИТ, 2001. - 56 с.

[4] Bogdanoff J., Kozin F. Probabilistic Models of Cumulative Damage. - New York: Wiley, 1985. - 341 p.

[5] Zainetdinov R.I. Wavelet Analysis of Statistical Data on Reliability for Exploring the Multifractal Properties of Failure-Cascading Process // Wavelets and Multiscale Methods. Abstracts of the Intern. Wavelets Conf. Paris-Tangier, 1998. - P. 245-246.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫМ КОМПОЗИЦИОННЫМ СПЛАВОМ

¹Залеснов А.И. (Alexey_zalesnov@mail.ru), ²Петухов Е.Н., ¹Аборкин А.В.

¹Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», Владимир, Россия;

²ОАО ВЗПО «ТЕХНИКА», Владимир, Россия.

В работе представлены результаты исследований износа алмазного инструмента при тчении металломатричных композиционных сплавов (ММКС), упрочненных дисперсными частицами Al_2O_3 , SiC , B_4C . Разработана и проверена математическая модель износа алмазного инструмента, учитывающая мощность воздействия упрочняющих частиц, твердость инструмента в зависимости от температуры в зоне резания, абразивную способность и массовую долю дисперсных частиц упрочняющих матрицу.

Ключевые слова: износ, алмазный инструмент, металломатричный композиционный сплав.

Введение. Износ алмазного инструмента является сложным процессом, включающим в себя, как механическое, так и физико-химическое разрушение поверхностей контактирования.

Многочисленные исследования у нас в стране и за рубежом [1-7] позволяют сказать о том, что в зоне контакта инструмента и ММКС преобладает абразивный износ инструмента по задней поверх-

ности, который ускоряется с увеличением процентного содержания армирующих частиц, их размера и абразивной способности. Также из исследований видно, что не меньшим эффектом обладают режимные параметры взаимодействия: мощность и температура.

Исследования, упомянутые ранее, имеют прикладной характер и не позволяют описать про-

цесс износа алмазного инструмента при точении ММКС, что позволяет сказать о перспективности исследований связанных с комплексным установлением зависимости износа алмазного инструмента от параметров взаимодействия и характеристик ММКС.

Материалы и методы. В работе исследовались сплавы с упрочняющими частицами SiC, Al₂O₃, В₄C с их абразивной способностью A = 0,15; 0,45; 0,6, массовой долей наполнителя P от 0,05 до 0,25 и размерами d от 40 нм до 40 мкм.

Выбор обрабатываемых ММКС основан на применяемых материалах наполнителя, а это абразивные микропорошки и шлифпорошки с их эксплуатационной характеристикой – абразивной способностью. Массовая доля наполнителя регламентирована отсутствием эффекта повышения триботехнических характеристик, с концентрацией менее 0,05, а верхний диапазон в 0,25 – потерей жидкотекучести при литье ММКС. Размеры зерен наполнителя зависят от назначения ММКС и условий его работы в трибосоединении.

В качестве инструмента применялись сменные вставки на основе поликристаллического алмаза АСПК-2 изготовленные по ТУ2-037-98-84 [8].

Режимные параметры точения в экспериментальных исследованиях, принимались: скорость резания $v = 100 \dots 300$ м/мин, из условий отсутствия катастрофического износа инструмента; снимаемый припуск назначался $t = 0,1 \dots 0,5$ мм, с учетом метода получения отливок из ММКС (в кокиль или литья под давлением); а требования к шероховатости рабочих поверхностей деталей изготавливаемых из ММКС, таких как подшипники скольжения, предопределили диапазон подач на оборот $s = 0,01 \dots 0,05$ мм/об.

Обработка до критического износа проводилась на станке с ЧПУ HAAS-SL10, с бесступенчатым регулированием частоты вращения и подачи, в требуемом для проведения эксперимента диапазоне. При проведении исследования, через определенный интервал времени, зависящий от условий резания и свойств материала, алмазная вставка снималась для измерения износа по задней поверхности, который проводился на малом инструментальном микроскопе МИМ-7 с увеличением в 5 раз.

Дальнейшее исследование износа проводилось методом изучения топографии изношенной поверхности после продольного точения втулок из ММКС как визуальным, так и фотографированием с последующим анализом изношенной поверхности инструмента при помощи оптического микроскопа (увеличение видеомикроскопа 200x, 800x, 2000x), CSM (Швейцария).

Исследование масс-переноса элементов инструментального материала в стружку обработанного материала проводилось на элементном анализаторе Flash EA 1112.

Результаты и их обсуждение.

Изучение топографии изношенной задней поверхности инструмента из АСПК-2, показывает

наличие параллельных царапин по направлению вектора скорости резания на изношенной поверхности рис. 1, что характерно для абразивного износа и позволяет сделать вывод о его доминировании.

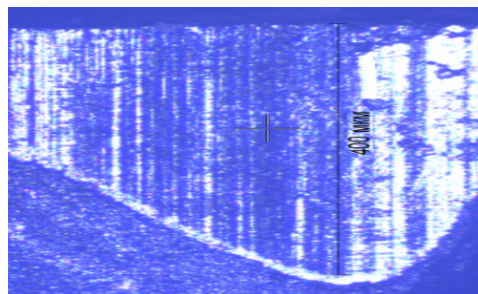


Рис. 1. Износа по задней поверхности

Для подтверждения выдвинутой гипотезы получены данные с масс спектрального анализа рис. 2. стружки композиционного материала, в навесках которых обнаружен углерод весом 0,011мг, что также может свидетельствовать о присутствии в стружке материала изношенной части инструмента.

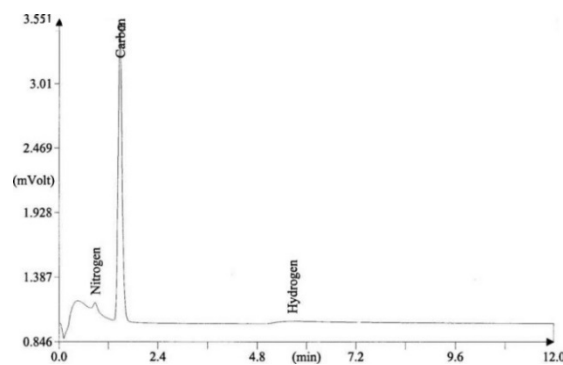


Рис. 2. Спектрограммы продуктов износа

После определения механизма износа переходим к построению обобщенной его модели, которая позволит определять стойкость инструмента из АСПК-2 с заданной точностью при точении известных в настоящее время ММКС.

$$T = \frac{th^2HV}{6WK_a f \operatorname{tg} \varphi (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \gamma)} K_d^{-1},$$

где f – коэффициента трения; K_d – отношением диаметра абразивной частицы, к диаметру внедрения в инструментальный материал; K_a – массовая доля абразивных частиц; $HV(\Theta)$ – твердости алмаза с учетом контактной температуры [9], количественная зависимость которой установлена в [10]; W – мощность воздействия частиц наполнителя расположенных по длине поперечного среза, на заднюю поверхность инструмента, которая зависит от силы резания, полученной в [11] и скорости резания, $H_{\text{мин}}^M$; – глубина резания, мм; h – износ инструмента по задней поверхности, принимаемый для чистовой обработки точением 0,4 мм; φ – главный угол в плане, град; α и γ – соответственно задний и передний угол, град.

Для подтверждения математической модели износа инструмента из АСПК-2 были проведены

натурные испытания, позволившие получить эмпирическую модель для определения времени до наступления критического износа по задней поверхности [12].

Сравнение расчетных и экспериментальных значений стойкости инструмента из АСПК-2 от режимных параметров и характеристик упрочняющих частиц показало, что расхождение расчетных и фактических характеристик контролируемого параметра (времени до критического износа по задней поверхности) не превышает 15%.

Полученные результаты подтверждают правомерность выбранных методов расчетов и принятых допущений, что позволяет использовать разработанную автором математическую модель.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 16-38-00817 мол_а).

- [1] Tomac, K. Machinability of particulate aluminium matrix composites / K. Tomac, S. Tonnessen // Ann. CIRP. – 1992. – № 41 (1). – P. 55 – 58.
- [2] Lane, C. The effect of different reinforcements on PCD tool life for aluminium composites / C. Lane // Proceedings of the Machining of Composite Materials Symposium. – Chicago, 1992. – P. 17 – 27.
- [3] Weinert, K. A consideration of tool wear mechanism when machining metal matrix composites (MMC) / K. Weinert // Ann. CIRP. – 1993. – № 42 (1). – P. 95 – 98.
- [4] Тхагапсоев, Х. В. Механизм износа в правящем алмазном инструменте / Х. Г. Тхагапсоев [и др.] // Там же. – 1982. – №3. – С. 3 – 6.
- [5] Шейко, М. Н. Абразивный износ отдельных зерен в алмаз-

ных роликах и брусках при правке абразивных кругов и его связь с износом алмазов в инструменте в целом / М. Н. Шейко // Сверхтвердые материалы. – 2007. – № 6. – С. 58 – 64.

[6] Muthukrishnan, N. Machinability issues in turning of Al-SiC metal matrix composites / N. Muthukrishnan [et al.] // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2008. – № 393. – P. 211 – 218.

[7] Srinivasan, A. Machining performance study on metal matrix composites – a response surface methodology approach / A. Srinivasan [et al.] // American Journal of Applied Sciences. – 2012. – № 9 (4). – P. 478 – 483.

[8] Залеснов, А. И. Износ режущих инструментов из сверхтвердых синтетических материалов при точении алюмоматричных композиционных материалов, упрочненных дисперсными частицами AL₂O₃ и SiC [Текст] / А. И. Залеснов, Е. Н. Петухов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 4/2 (288). – С. 46 – 51.

[9] Залеснов, А. И. Исследование обрабатываемости точением алюмоматричных композиционных материалов [Текст] / А. И. Залеснов, Е. Н. Петухов, А. В. Аборкин // Научно-технические проблемы в машиностроении. – 2014. – № 10 (40). – С. 14-19.

[10] Бакуль, В. Я. Микротвердость алмаза и ее зависимость от температуры / В. Я. Бакуль, М. Г. Лошак, В. И. Мальте // Синтетические алмазы. – 1978. – №1. – С. 7 - 11.

[11] Залеснов, А. И. Экспериментальное исследование влияния режимов обработки, размера и процентного содержания армирующих частиц на составляющие силы резания при точении композиционных материалов на металлической матрице [Электронный ресурс] / А. И. Залеснов // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 5.

[12] Залеснов, А. И. Стойкостные испытания алмазного инструмента при точении композиционных материалов на алюминевой основе армированных дисперсными нано - и микрочастицами [Текст] / А. И. Залеснов, Е. Н. Петухов, В. А. Подшивалкин // ежемес. науч.-технический журн. - М. : ООО "СТИН". 2013. №12. – С. 20 – 24.

ВЛИЯНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ РАЗГРУЗКИ НА ТРЕНИЕ В ЦАПФАХ РОЛИКОВ-РАЗДЕЛИТЕЛЕЙ РОЛИКО-ЛОПАСТНЫХ ГИДРОМАШИН.

Зарецер Я.М., Думболов Д.У., Еремин В.Н., Асметков И.Д.

ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России»
(25spec@25spec.ru)

На ролик-разделитель ролико-лопастной гидромашинной действуют радиальные силы со стороны рабочей камеры и меж роликовой полости. Проведен расчет определения грузоподъемности цапфы и вектор направления ее приложения.

Ключевые слова: ролико-лопастная гидромашинная, разгрузка, ролик-разделитель, трение.

Ролико-лопастные беспульсационные машины относятся к области машиностроительного гидропривода и пневмопривода и предназначены для привода рабочих органов различных гидрофицированных машин, а также в качестве насосов, в частности, насоса перекачки мультимедийных вязких нефтепродуктов [1]. Ролико-лопастная гидромашинная содержит ротор с лопастями, установленный в корпусе, в котором выполнены каналы для подвода и отвода рабочей среды, в расточках которого размещены ролики-разделители с пазами для обеспечения свободного прохождения лопастей ротора, причем вращение роликов-разделителей синхронизировано с ротором посредством синхронизирующего механизма рис. 1.

На ролик-разделитель действуют радиальные силы со стороны рабочей камеры и меж роликовой полости. Кроме того, дополнительную радиальную силу создает синхронизирующий механизм и сила трения в цапфах роликов-разделителей. Гидростатическая разгрузка ролика-разделителя должна уравновесить эти силы. Для уравновешивания сил, действующих со стороны рабочей камеры и меж роликовой полости, необходимо, чтобы площадь разгрузочного кармана была равна площади поверхности ролика-разделителя, соприкасающейся с рабочей камерой или же с меж роликовой полостью и чтобы карман был расположен диаметрально противоположно этим карманам. В нашем случае цапфы ролика-разделителя выполняют роль подшипника скольжения, и в случае появления

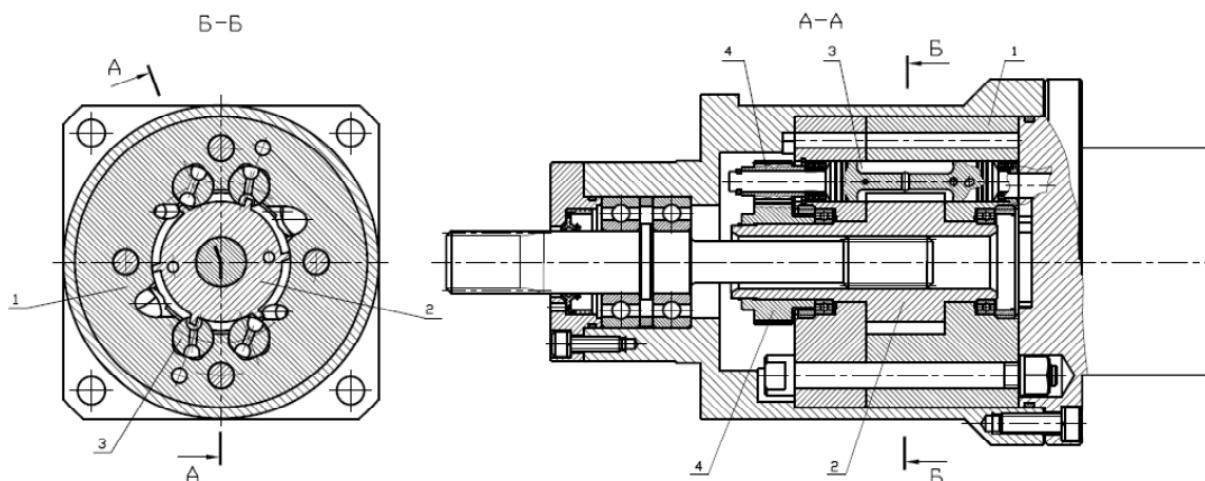


Рис. 1. Ролико-лопастная гидромашинна

1- корпус, 2- ротор, 3-ролик-разделитель, 4-шестерни синхронизирующего механизма.

дополнительных сил или же вне центрального приложения сил, действующих на ролик-разделитель, в цапфах в соответствии с контактно-гидродинамической теорией смазки при движении масла возникает гидродинамическое давление, равнодействующая которого – гидродинамическая подъемная сила – уравнивает внешние (относительно цапф ролика-разделителя) нагрузки, приложенные к ролику-разделителю. Для решения задачи по контактной гидродинамике теории смазки [2], принимаем давление жидкости в подшипнике скольжения в свободном состоянии равным нулю. В нашем случае давление распределяется неравномерно, так как на ролик-разделитель в рабочей камере действуют два давления: одно – давление нагнетания, второе – давление межроликной камеры, равное полу сумме давлений нагнетания и слива. Это давление воздействует на один ролик-разделитель. На второй ролик-разделитель воздействует давление межроликной камеры и давление слива. Кроме вышесказанного, на ролик-разделитель воздействует давление разгрузочных карманов, состоящее из давления полостей, с которыми связаны эти разгрузочные карманы. В дополнение к этому давление в зазоре по длине цапфы изменяется от максимального значения до давления дренажа. Так, давление дренажа равно 0,05 МПа при давлении нагнетания 8...10 МПа, им можно пренебречь и приравнять для простоты расчета к нулю.

Определив исходные параметры, рассчитаем гидродинамическую грузоподъемность цапф ролика-разделителя [2].

$$K_0 = r B \sqrt{\frac{2}{C_1 + 1}} K,$$

где: K_0 – гидродинамическая грузоподъемность единицы длины цапфы ролика-разделителя с учетом зависимости вязкости масла от давления, кг/м;

r – радиус цапфы ролика-разделителя, м;
 B – основной контактно-гидродинамический параметр
 C_1 – новый коэффициент режима работы
 K – безразмерная погонная нагрузка.

На основании определенной гидродинамической грузоподъемности единицы длины цапфы, вычислим полную грузоподъемность цапфы:

$$N = K_0 l,$$

где: l – длина цапфы.

Определим направление вектора грузоподъемности:

$$\alpha_2 + \xi = a \sqrt{\frac{2}{C_1 + 1}} + \operatorname{arctg} \frac{\int_a^b k_z \sin\left(z \sqrt{\frac{2}{C_1 + 1}}\right) dz}{\int_a^b k_z \cos\left(z \sqrt{\frac{2}{C_1 + 1}}\right) dz}$$

Таким образом, внедрение теоретического расчета разгрузки роликов-разделителей позволяет проектировать ролико-лопастные гидромашинны:

- у которых отсутствуют узлы сухого трения, в результате чего механический КПД приближается к 100%,
- с малым давлением страгивания с места в режиме гидромотора на холостом ходу, которое на порядок ниже, чем у гидромоторов других типов (поршневых, лопастных, героторных и др.) и составляет величину не превышающую 0,01 МПа,
- беспульсационные с широким диапазоном частоты вращения выходного вала под нагрузкой от 0,1 до 5000 мин⁻¹,
- с возможностью работать на рабочих жидкостях, имеющих вязкость от 1 до 2000 мм²/с в широком интервале температур.

[1] Патент РФ на изобретение № 2194191, МПК F04C. 2000 г. Ролико-лопастная гидромашинна. (авторы Зарецкер Я.М. и др.)

[2] Д.С.Коднир «Контактная гидродинамика смазки деталей машин». М. Машиностроение. 1976 г.

РАЗВИТИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ Н.А. БУШЕ

(к 100- летию со дня рождения)

Захаров С.М.(zakharov.sergey@vniizht.ru), Гершман И.С., Миронов А.Е.

«Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», Москва, Россия.

Изложены направления трибологического материаловедения развитые Н.А.Буше и лабораторией цветных металлов и трибологии ВНИИЖТа, которую он создал и возглавлял многие годы

Ключевые слова: трибологическое материаловедение антифрикционные сплавы, совместимость, самоорганизация.



**Николай Александрович Буше
(1916-2008)**

Подшипниковые антифрикционные сплавы

Работами лаборатории было установлено, что высокооловянистый баббит Б83, который применялся для тонкостенных подшипников коленчатого вала тепловозных дизелей, не пригоден для этих условий работы. Были сформулированы требования к антифрикционному материалу, касающиеся однородности структуры, повышенной сопротивляемости усталостному разрушению, улучшенной прирабатываемости, повышенной прочностью соединения с основой подшипника. Был предложен кальциевый баббит БК2 за разработку которого Н.А.Буше и группа ученых и инженеров, работавших под его руководством, получила в 1951 году Сталинскую премию.

Подшипники скольжения из алюминиевых сплавов и технология из производства [2]. Лаборатория провела цикл работ по исследованию трибологических свойств свинцовистой бронзы, алюминиевых сплавов и сопоставлению их преимуществ и недостатков. Были сравнены усталостная прочность, реакция материалов на ужесточение режима трения, коррозионная стойкость, последствия задирав подшипников, уровень технологии изготовления. Полученные результаты свидетельствовали о преимуществах биметаллических подшипников с алюминиево-оловянными сплавами, изготавливаемыми из биметаллической

ленты над подшипниками из свинцовистой бронзы БрС30, изготавливаемой литейным способом. Эти преимущества состояли в лучшей приспособляемости к ужесточению режима трения из-за «выжимаемости» мягкой структурной составляющей (олова) на поверхность трения, более высокой коррозионной стойкости, более совершенной технологии изготовления. Одно из основных преимуществ было в меньшей повреждаемости коленчатого вала при задире. Была разработана технология изготовления биметаллических полос путем соединения алюминиево-оловянного антифрикционного сплава со сталью с алюминиевым подслоем в процессе холодной прокатки с большой степенью обжатия.

Узлы трения под действием тока. Наиболее важным узлом трения силовоточного контакта является медный контактный провод – токосъемные элементы электроподвижного состава. Здесь имелась масса проблем, связанных с износом контактного провода, его разрушением из-за разупрочнения при перегреве, что в значительной мере определялось материалом токосъемных элементов. Одним из наиболее значимых достижений была разработка химического состава и технологии изготовления порошковых материалов для контактных пластин с самосмазывающими свойствами и создание производства на Выксунском металлургическом комбинате. За эту работу, Н.А. Буше и В.Я Берент получили в 1983 году премию Совета министров СССР.

Совместимость трибосистем [3]. Совместимость представлялась как способность трущихся пар приспособляться друг к другу, обеспечивая устойчивую без повреждений работу системы в течение заданного ресурса. Совместимость трущихся поверхностей оценивается на основе различных критериев (показателей). Процесс совместимости определялся реакцией на изменение (ужесточение) режима трения. Благоприятная реакция может обеспечиваться при образовании на поверхности легко подвижных и трудно схватывающихся пленок, либо специально выполненными защитными покрытиями из мягких металлов или полимеров. В частности Н.М.Алексеевым, а позднее И.Г.Горячевой была предложена модель массопереноса мягкой структурной составляющей, формирования и разрушения этих слоев и критерий совместимости основанный на величине накоп-

ленной пластической деформации. Позднее многими авторами были предложены другие показатели совместимости трибосистем. В результате находится сочетание параметров, обеспечивающее заданный уровень надежности трибосистемы при ограничениях, накладываемых на остальные параметры. Введенное Н.А.Буше понятие совместимости трущихся поверхностей было принято в трибологии и в дальнейшем получило развитие как в направлении расширения номенклатуры показателей (критериев), так и методов их определения и практического использования.

Самоорганизация при трении. Первым и наиболее удачным оказалось применение теории самоорганизации к условиям работы токосъемных устройств, таким как контактный провод-токосъемная пластинка [5]. Были изучены закономерности образования и разрушения вторичных структур при трении сильноточечных скользящих контактов вставок и контактных проводов электрифицированных железных дорог. Было установлено, что каждый токосъемный материал создает на контактном проводе вторичные структуры определенного состава. Были использованы методы термодинамики необратимых процессов для определения устойчивого состояния и подтверждения экспериментальной зависимости коэффициента трения от проходящего тока. С помощью неравновесной термодинамики и теории самоорганизации применительно к трению удалось показать, что самоорганизация приводит к снижению интенсивности изнашивания, установить признаки прохождения самоорганизации и применить эти критерии для разработки новых износостойких материалов для различных узлов трения. Например, применение катализаторов несамопроизвольных физико-химических процессов для их интенсификации, применение веществ, сдвигающих самоорганизацию в мягкие условия трения и другие.

Заключение. Основными составляющими направления трибологического материаловедения, развитого Н.А.Буше и его лабораторией были: трибологическое материаловедение подшипников скольжения; скользящих электрических контактов; совместимость трущихся материалов; прикладные аспекты неравновесной термодинамики и теории самоорганизации применительно к процессам трения и изнашивания; металловедение и технология изготовления алюминиевых, медных, цинковых, свинцовых и оловянных сплавов для узлов трения; материаловедение и технология изготовления уг-

леродных и композиционных материалов для узлов трения; технологии создания износостойких покрытий и восстановления изношенных поверхностей узлов трения железнодорожного транспорта; закономерности трения и изнашивания в транспортных трибосистемах; необходимость учета при создании материалов узлов трения условий их работы в сложных транспортных трибосистемах.

Результаты исследований и разработанных материалов вошли в справочники [4], а технологии были внедрены на различных предприятиях для: производства биметаллических подшипников методом прокатки на АО «Завод подшипников скольжения», ОАО «Заволжский моторный завод», производства дизелей, оборудованных сталеалюминиевыми вкладышами подшипников на Заводе транспортного машиностроения им. В.А.Мальшева; изготовления биметаллических полос для подшипников скольжения сваркой взрывом ООО «МАТЕМ», г. Новосибирск; цехов по заливке моторно-осевых подшипников и подшипников коленчатого вала на строительных и ремонтных заводах и в депо; кабельных заводов, изготавливающих контактные провода по ГОС-Там, разработанными в лаборатории; производства кальциевых баббитов на Подольском заводе цветных металлов, г. Подольск; производства токосъемных вставок на электродных заводах; цехов и отделений по заливке буксовых подшипников скольжения на вагоноремонтных заводах и в вагонных депо.

Н.А.Буше вместе с учениками и коллегами опубликовал 5 монографий, 6 разделов в коллективных монографиях, справочниках и учебниках, 39 авторских свидетельств и патентов: всего - 337 публикаций [6].

Н.А.Буше лауреат Международной Золотой медали в области трибологии (2002 г)

[1] Буше, Н. А. Подшипниковые сплавы для подвижного состава / Н.А. Буше. — М. : Транспорт, 1967.

[2] Подшипники из алюминиевых сплавов / Н. А. Буше [и др.]. — М. : Транспорт, 1974.

[3] Буше, Н.А. Совместимость трущихся поверхностей / Н.А. Буше, В.В. Копытько. — М. : Наука, 1981.

[4] Буше, Н. А. Материалы триботехнического назначения / Н.А. Буше, А. П. Семенов // Справочник по конструкционным материалам / под ред. Б. Н. Арзамасова, Т. В. Соловьевой. — М. : Из-во МВТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. — С. 141—208. .

[5] Буше Н.А., Гершман И.С. Физические концепции совместимости трибосистем // Трение и износ. 1998. Т.19. №1. С.141.

[6] Захаров С.М. Николай Александрович Буше. К 100-летию со дня рождения /. — М. : РАС, 2016, 80 с.

СЛОЖНЫЕ ТРИБОСИСТЕМЫ: МОДЕЛИРОВАНИЕ, ИССЛЕДОВАНИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ

Захаров С.М. (zakharov.sergey@vniizht.ru), Жаров И.А.

АО «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», Москва, Россия.

Изложен общий подход к моделированию сложных трибосистем. Дано краткое описание сложной трибосистемы «коленчатый вал-подшипники-опоры блока цилиндров ДВС» и в

самом общем виде формулировка ее модели. Приведены результаты влияния угловых перемещений шеек вала и опор на минимальные толщины смазочного слоя в коренном подшипнике. Перечислены некоторые решаемые практические задачи

Ключевые слова: сложная трибосистема, модель, многоопорный вал, девиация шеек.

Введение. Трибологический объект рассматривается как сложная система; применяются принципы и методы общей теории систем. Для сложных трибологических систем строятся модели, включающие ряд уровней. Каждому уровню соответствует свой круг проблем, методы их решения и программное обеспечение для моделирования. Все уровни тесно связаны между собой, имеют место прямые и обратные связи трибологического характера. Существенным этапом анализа методологии моделирования сложных механических систем является выделение подсистем. Подсистемы могут выделяться по принципу функционального назначения элементов конструкции и значительно облегчают процесс создания модели, особенно если выделенные подсистемы повторяются в данной механической системе. На этапе анализа трибосистема представляется в виде направленного графа - связи основных величин трибосистемы. Показателями сложности трибосистемы являются число вершин графа, которые соответствуют моделируемым величинам, число связей и порядок системы, определяемый как наименьшее число вложенных итераций [1]. Базируясь на этих принципах были созданы модели трех сложных трибосистем: многоопорного вала двигателя внутреннего сгорания, роликового подшипника буксы тележки железнодорожного вагона и трибодинамическая модель взаимодействия экипажа и пути.

Модель сложной трибосистемы «коленчатый вал-подшипники-опоры блока» двигателя внутреннего сгорания. Модель охватывает основные механические системы двигателей внутреннего сгорания, которые состоят из четырех основных блоков: модели расчета коленчатого вала как статически неопределимой рамы, лежащей на упругих опорах, модели гидродинамического и теплового расчета нестационарно-нагруженных подшипников, моделей определения упругих деформационных характеристик коленчатого вала. Коленчатый вал считается трехмерной статически неопределимой рамой. Для нахождения сил и реакций в опорах используется матричная формулировка метода надпорных моментов, развитая Е. Шорохом и Ю.Л. Тарсисом [2], сводящаяся к уравнению

$$\mathbf{B} \times \mathbf{M} = \mathbf{N}, \quad (1)$$

где \mathbf{B} - матрица податливости коленчатого вала и опорных узлов; \mathbf{M} - вектор неизвестных изгибающих моментов; \mathbf{N} - вектор угловых девиаций опорных сечений от заданной нагрузки на вал, линейной податливости опор, несоосности шеек вала и подшипников.

Упругие характеристики вала опор определяются методом конечных элементов - трехмерным для колена вала и двухмерным для опор блока.

Матричное уравнение разрешается относительно вектора надпорных моментов, зная которые можно определить вектор сил, действующих в опорах для всех выбранных положений вала. Силы, действующие на подшипники, зависят от конструкции двигателя и его элементов, описываемых матрицей \mathbf{B} , от несоосности шеек вала и опор, описываемой матрицей \mathbf{N} . Это позволяет объединить модели подшипников и вала, так как перемещение шеек вала в пределах диаметрального зазора в каждом подшипнике интерпретируется как переменные несоосности шеек вала.

Гидродинамический и тепловой расчет подшипников проводился методом, основы которого были изложены в [4]. Задачей расчета нестационарно-нагруженных подшипников коленчатого вала является определение траектории движения оси шейки вала - геометрического места точек мгновенных равновесий вала в подшипнике под действием нагрузки $F(t)$ и реакции смазочного слоя $R(t)$. Внешняя нагрузка $F(t)$ находится из вектора сил, которые находятся из матричного уравнения (1).

$$\begin{aligned} F_v(t) + R_v(\varepsilon, \beta, \frac{d\varepsilon}{dt}, \frac{d\beta}{dt}, \omega, \eta) &= 0 \\ F_w(t) + R_w(\varepsilon, \beta, \frac{d\varepsilon}{dt}, \frac{d\beta}{dt}, \omega, \eta) &= 0 \\ \frac{d(T_1 V_1)}{dt} + \frac{1}{\rho c_v} \sum P_{i1} &= \frac{E}{\rho c_v} M_{ep}^{(1)} \\ \frac{d(T_2 V_2)}{dt} + \frac{1}{\rho c_v} \sum P_{i2} &= \frac{E}{\rho c_v} M_{ep}^{(2)} \omega \\ \eta &= \eta(T, p) \end{aligned} \quad (2)$$

Реакция смазочного слоя находится из уравнения Рейнольдса при ряде допущений [3].

Поскольку коленчатый вал и опоры деформируются в процессе работы и меняется положение и угол наклона оси шеек по отношению к оси опоры и образующей вкладыша подшипника, то моделирование процессов в подшипниках коленчатого вала должен производиться с учетом линейных и угловых перемещений шеек вала и опор. Это достигается учетом изменения гидродинамических составляющих реакции смазочного слоя в подшипниках при различных наклонах шеек вала, с учетом возможных режимов смешанной смазки, а также в организации соответствующего итерационного процесса, обеспечивающего пересчет траектории в среднем сечении подшипника и определение углов наклона шеек вала относительно каждого подшипника за цикл работы двигателя [3].

Для получения совместного решения систем уравнений (1)-(2) используется итерационный процесс. В результате расчета определяются гидродинамические характеристики подшипников,

Таблица 1: Минимальные толщины смазочного слоя в коренных опорах блока дизеля

h, мкм	Номера опор										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
h_{min}	8,5	6,3	9,5	5,2	5,7	14,2	5,5	4,7	8,6	5,6	5,1
h_o	9,3	7,0	10,9	5,3	6,1	14,4	6,0	4,7	9,2	6,1	5,4
h_1	5,1	6,6	7,3	2,6	6,0	6,0	1,8	4,5	1,7	3,1	7,2
h_2	3,3	2,6	2,1	3,1	2,8	11,0	2,5	2,2	5,5	3,0	3,2

траектория движения шеек вала в каждом подшипнике, изменение минимальной толщины смазочного слоя, изменение расхода и потерь на трение, изменение температуры в частях смазочного слоя за цикл работы двигателя. Характеристики упругости коленчатого вала и опор блока определяются заранее и используются в совместном расчете в качестве исходных данных. Определяются также напряжения в опасных сечениях шеек коленчатого вала и рассчитываются запасы прочности коленчатого вала.

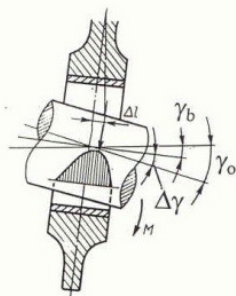


Рис.1. Схема коренной опоры и положения шейки вала в ней.

В таблице 1 приведены минимальные толщины смазочного слоя в коренных подшипниках многоопорного вала тепловозного дизеля 10 Д 100 с учетом девиации шеек вала. В этой таблице: h_{min} - наименьшая толщина смазочного слоя в модели с параллельными осями; h_o - минимальная толщина смазочного слоя в среднем сечении подшипника с учетом девиации шейки; h_1, h_2 - минимальные толщины смазочного слоя соответственно у правого и левого краев подшипника.

Как видно из приведенного примера при рассмотрении данной сложной трибосистемы при учете гидродинамических и деформационных процессов существенно меняются минимальные толщины смазочного слоя и могут возникать режимы смешанной смазки.

С помощью созданных моделей был решен ряд практических задач, в частности:

- оценка условий работы и прочности коленчатого вала и опор для новых или модернизируемых конструкций тепловозных двигателей и их модификаций;
- согласование линейных и угловых податливостей коленчатого вала и опор вместе с участвующими в деформациях элементами блока цилиндров;
- выбор гиперболической расточки подшипников, а также материала и толщины приработочного слоя подшипников на основе данных о реальных угловых и линейных перемещениях шеек вала и опор;
- установление обоснованных норм на несоосность опор и шеек коленчатого вала, зазоры в подшипниках, предельные износы и овальность шеек вала по критериям прочности коленчатого вала и работоспособности подшипников;
- оптимизация положения и величины противовесов коленчатого вала по трибологическим критериям;
- прогнозирование вероятности задира подшипников коленчатого вала и статистических характеристик ресурса подшипников.

[1] Захаров С.М. Жаров И.А. Методология моделирования сложных трибосистем, Трение и износ, 1988, Т 14, №5, С.825-833.

[2] Захаров С.М., Тарсис Ю.Л., Шорох Е.А. Совместный расчет многоопорного коленчатого вала и подшипников скольжения // Вестник машиностроения.- 1985, № 1, 5-7.

[3] Захаров С.М., Жаров И.А. Расчет нестационарнонагруженных подшипников скольжения с учетом девиации вала и режимов смешанной смазки// Трение и износ, - 1996 (17), №4, 425-434.

[4] Современная трибология: итоги и перспективы/Отв. редактор. К.В. Фролов - М. Издательство ЛКИ. 2008-480 с

САМОСМАЗЫВАЮЩИЕСЯ ЭПОКСИДОФТОРОПЛАСТЫ ДЛЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

Захарычев С.П. (zakharychev53@mail.ru), Иванов В.А.

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск, Россия.

Рассмотрены эпоксидфторопластовые композиты для подшипников скольжения. Разработана гамма материалов антифрикционного назначения и приведены основные свойства и рекомендации по применению подшипниковых материалов в машиностроении и ремонте.

Ключевые слова: самосмазывающиеся подшипники, эпоксидфторопласты, несущая способность, износостойкость.

Проблема обеспечения износостойкости подшипниковых узлов остается одной из важнейших в машиностроении. Подшипники скольжения зачастую эксплуатируются в условиях ограниченной смазки и повышенного трения. Их все чаще изготавливают из полимерных композиционных материалов, имеющих набор специфических свойств, позволяющих эксплуатировать их в различных условиях [1]. Важной остается проблема замещения импортных комплектующих на изделия российского производства.

Практический опыт последних лет, связанный с разработкой, производством, ремонтом и заменой фирменных подшипниковых материалов на материалы группы МАС в импортных машинах и оборудовании свидетельствует о существовании альтернативных решений данных проблем с помощью не широко известных отечественных разработок [2, 3].

В качестве базовых материалов для изготовления самосмазывающихся подшипников были разработаны компаундные эпоксиэфторопласты: МАС-1 и МАС-2 включающие связующие на основе эпоксидных смол, порошки фторопласта-4, твердые смазки, армирующие рубленые волокна. Базовые композиции обеспечили требуемые уровни комплекса физико-механических и триботехнических свойств.

Изучены важные триботехнические характеристики материалов. Зависимости коэффициента трения материала МАС-1 от номинального давления на подшипник при работе без смазки, в водной среде и в масле приведена на рис. 1.

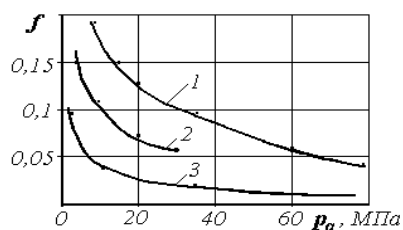


Рис. 1. Коэффициент трения материала МАС-1+М при следующих условиях: 1 – сухое трение возвратно-вращательной пары трения: $V = 0,033$ м/с; 2 – в водной среде при скорости $V = 1-0,5$ м/с; 3 – в масле при скорости $V = 1-5$ м/с

Закономерности снижения коэффициента трения с увеличением давлений, свидетельствует о преимуществах использования материалов при повышенных эксплуатационных нагрузках.

Способность подшипниковых материалов противостоять деформациям при статической нагрузке важна для машин и оборудования, где недопустимы остаточные деформации – рис. 2.

Экспериментально установлены зоны упругих и пластических деформаций материалов; определены расчетный модуль упругости при сжатии $E = 3,375$ ГПа и допустимая статическая удельная нагрузка $[p_{cm}] = 135-145$ МПа. Допустимая удельная нагрузка для возвратно-вращательного движения при низких скоростях скольжения (до 0,1 м/с)

и температурах в зоне трения до $40-50$ °С достигала $[p_a] = 100$ МПа.



Рис. 2. Зависимость удельной мощности деформации материала МАС-1 от номинального давления.

Материалы МАС, как и все полимерные материалы, имеют меньшую теплопроводность по сравнению с металлическими, поэтому применяются в виде покрытий толщиной 1-1,5 мм на более твердой подложке или в виде тонкостенных вкладышей с толщиной 2-2,5 мм. [2-4]. Кроме того, допуски назначаются так, чтобы ограничить фрикционное тепловыделение. Коэффициент теплового расширения МАС-1 составил $5-7 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ в диапазоне температур $50-100$ °С.

Армированные эпоксиэфторопластовые материалы (АЭФМ) относятся к слоистым композитам и обладают улучшенными эксплуатационными характеристиками – высокими несущей способностью и долговечностью. Различные конструкции подшипников получали методом многослойной намотки тканей, например, хлопчатобумажных, с одновременной их пропиткой компаундами (МАС-3ХБ), центробежной пропиткой свернутых тканевых заготовок (МАС-4ХБ) или горячим пресованием. Допустимая несущая способность материалов – до 50 МПа при эксплуатации без смазки.

Применение в конструкциях несущих слоев из стеклотканей и углетканей в сочетании с антифрикционными покрытиями (МАС-3ХБ/СТ, МАС-4УГ) еще более улучшило эксплуатационные свойства изделий [8-9].

На основе этих технологий получены конструкции массивных и тонкостенных втулок, вкладышей, пластин, колец и других подшипников, нашедшие применение в судовых палубных механизмах, гидравлических кранах и манипуляторах, транспортерах и подъемниках, направляющих станков и телескопических стрел, гидроцилиндрах и гидромоторах [5-8].

В линейке разработанных материалов присутствуют различные составы и структуры, что обуславливает различие их эксплуатационных характеристик. Используя комбинации составов базовых компаундов, структур подшипников и способов формирования ПКМ возможно создание новых изделий для перспективного применения, что является продуктивной задачей.

[1] Полимеры в узлах трения машин и приборов: справочник / под ред. А. В. Чичинадзе. М.: Машиностроение – 1988.

[2] Иванов В. А., Хосен Ри. Прогрессивные самосмазывающиеся материалы на основе эпоксиэфторопластов для триботехнических систем. Владивосток; Хабаровск: ДВО РАН, – 2000.
[3] Захарычев С. П., Иванов В. А. Основы технологии эпоксиэфторопластов для самосмазывающихся подшипников скольжения. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та – 2012.
[4] Иванов В. А. Комбинированные самосмазывающиеся подшипники на основе армированных эпоксиэфторопластов // Вестник машиностроения. 1987. № 5, 17–20.
[5] Иванов В.А. Системный подход к созданию антифрикционных материалов и узлов трения. / В. А. Иванов. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015.

[6] Иванов В. А., Захарычев С. П., Шамаев А. С. Ремонт узлов трения гидравлических манипуляторов// Ремонт, восстановление, модернизация. 2002, № 2, 42–45.
[7] Гончаров С. В., Тарасенко А. Т., Иванов В. А. Исследование зависимости коэффициента трения от концентрации антифрикционного компонента в рабочем слое подшипника скольжения // Вестник машиностроения. 2009, № 11, 40–46.
[8] Захарычев С. П., Отмахов Д.В. Изготовление армированных антифрикционных эпоксиэфторопластов методом намотки // Вестник машиностроения. 2010, № 6, 41–45.

Трибологическая активность беззольных дитиофосфатов в композиции с детергентами в среде углеводородного масла

¹Золотов В.А., ¹Селезнев М.В., ²Морозов А.В.

¹ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», Москва, Россия;
²Институт проблем механики им А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия.
(25gosniihim@mil.ru)

Приведены результаты исследования противоизносных и антифрикционных свойств аминных солей диалкилдитиофосфорной кислоты с радикалами различного строения в композиции с содержащими твёрдое карбонатируемое ядро в мицеллах щелочными детергентами в среде углеводородного масла.

Ключевые слова: дитиофосфаты, детергенты, противоизносные, антифрикционные свойства.

Введение. Известно, что для придания противоизносных свойств моторных масел в их состав в качестве функциональных присадок вводят цинковые соли диалкилдитиофосфорной кислоты [1,2]. Вместе с тем содержащиеся в этих соединениях атомы фосфора, серы и металла оказывают отрицательное влияние на эффективность систем очистки выхлопных газов, которыми оборудованы современные двигатели внутреннего сгорания, отвечающие требованиям *Euro-4*, *Euro-5*. Негативное действие фосфора на работу каталитических нейтрализаторов связано с их дезактивацией продуктами разложения дитиофосфатов цинка в виде стекловидной массы, образующимися на поверхности нейтрализаторов [3,4].

Основной вклад в содержание сульфатной золы в масле обуславливают входящие в его состав дитиофосфаты цинка в композиции с кальцийсодержащими моющими присадками (детергентами). Повышенное содержание серы в масле и наличие сульфатной золы обуславливает увеличение количества отложений в системе рециркуляции выхлопных газов, приводит к интенсивному закупориванию пор сажевых фильтров и снижению эффективности их действия.

Таким образом, в настоящее время актуальной задачей является исследование трибологических характеристик беззольных азот- и серосодержащих гетероорганических соединений аминов в композиции с содержащими в мицеллах твёрдое карбонатируемое ядро щелочными детергентами в среде углеводородного масла.

Материалы и методы. В качестве компонентов испытуемых композиций использовали маловязкую фракцию поли- α -олефинового масла (РАО-4), аминные соли диалкилдитиофосфорной кислоты (АДФ, ВНИИНП-715) с радикалами различного строения, детергенты разной основности и химической природы (С-150, ССК-400).

Противоизносные свойства оценивали как у исходных («неработавших») образцов, так и у окисленных («работавших») в лабораторных условиях. Окисление испытуемых композиций (25 мг) проводили на установке, состоящей из нагревательного блока и системы подачи воздуха. Условия высокотемпературного окисления: расход воздуха, барботируемого через объём испытуемых композиций, составил 300 мл/мин; температура – 180°C, продолжительность испытаний – до 20 ч с кратностью анализа окисленных образцов через каждые 5 ч. Все испытания проводили с добавлением в образцы композиций промотора окисления – 0,1% нафтената меди (RCOO)₂Cu.

Испытания образцов проводили на трибометре марки UMT-3 («Bruker», США), где использовали пару трения «плоскость пластины – шарик» (оба образца из стали ШХ-15) с возвратно-поступательным движением амплитудой 0,5 мм (длина хода 1 мм) и частотой 50 Гц. Шероховатость поверхности пластины Ra составляла 0,14 мкм. Нагрузка на шарик диаметром 12,7 мм в процессе теста поддерживалась постоянной и составляла 175 Н. Перед началом теста пара трения погружалась в испытуемое масло, залитое в ванну трибометра, и выдерживалась в течение 90 минут при температуре 80°C. Затем, в течение 120

минут осуществлялось испытание образцов при постоянной температуре в ванне. Давление в герцевом контакте ($P_{герц}$) в начале опыта составляло 1500 МПа, размер герцевого контакта ($d_{герц}$) - 0,386 мм, длина хода осциллирующей пластины (S) - 0,95 мм. Дрейф нулевой линии датчика нагрузки за время опыта ΔF_z приняты постоянным. По окончании испытания стальные образцы очищались в ультразвуковой ванне.

Критериями противоизносных и антифрикционных свойств исследуемых композиций служили величины линейного и объёмного износа и коэффициент трения. Коэффициент трения оценивали по данным диаграмм, полученным на трибометре. Объем изношенного материала испытанных образцов оценивали методом фотометрии, используя оптическую систему микротвердомера МПТ-3, и методом профилометрии, используемым для определения износа стальной пластины.

Результаты и их обсуждение. Строение амина в соединениях дитиофосфатов и химическая природа сульфонов кальция оказывает существенное влияние на трибологическую активность композиций. Результаты испытаний показали сравнительную трибологическую эффективность дитиофосфата, содержащего в соединении низкомолекулярный амин.

Эффективность трибологического действия определена величиной объёмного износа шарика и пластины в результате трибоконтакта (табл.). Результаты оценки противоизносных свойств композиции, содержащей аминную соль диалкилдитиофосфорной кислоты (АДТФ), в сравнении с аминной солью диалкилфенилдитиофосфорной кислоты (ВНИИ НП-715) в среде синтетического масла (РАО-4) коррелируются с результатами оценки антиокислительной эффективности этой композиции. Отмечено, что в присутствии аминной соли диалкилдитиофосфорной кислоты в смеси с нефтяным детергентом в среде синтетического масла накопление кислых продуктов протекает быстрее, чем в присутствии аминной соли диалкилфенилдитиофосфорной кислоты, что сказывается на

сравнительно низких трибологических характеристиках композиции.

Противоизносные свойства аминной соли диалкилфенилдитиофосфорной кислоты в композиции со сверхщелочным синтетическим сульфонатом (ССК-400) выражены наиболее ярко, что объясняется эффективным ингибирующим действием и синергизмом действия соединений. Согласно мицеллярной концепции ингибирования, глубокие стадии окисления реализуются преимущественно внутри структур, аналогичных обращённым мицеллам, построенным из полярных окисленных молекул базового масла. Результаты исследования свидетельствуют об образовании предположительно более сплошного сорбционного слоя на сопряжённой поверхности трения за счёт большего количества ароматических колец, что имеет большее сродство к производным диалкилфенилдитиофосфорной кислоты, т.е. ингибитор в системе способен более эффективно участвовать в торможении процессов как окисления, так и изнашивания [5]. Образование упомянутого сорбционного слоя на сопряжённой поверхности трения реализуется за счёт большего количества ПАВ, приходящегося на единицу карбонатного ядра большего размера.

Результаты триботестов, проведенных на трибометре, показали сравнительную антифрикционную эффективность растворов дитиофосфатов с использованием первичных низкомолекулярных аминов в качестве алкильного радикала и корреляции значений коэффициента трения с величиной износа пластины после испытания.

Полученные результаты свидетельствуют, что в отдельных композициях в смеси с синтетическим маслом наблюдается синергизм действия беззольных дитиофосфатов с детергентами различной природы, что способствует повышению эффективности трибологического действия композиций и следует учитывать при разработке пакетов присадок к малозольным моторным маслам.

Таблица. Трибологические характеристики композиций

Трибологические характеристики	Наименование состава исследуемой композиции смазочного масла/Время окисления						
	РАО-4 +0,1% (RCOO) ₂ Cu /20 ч.	РАО-4 + 1% АДТФ /20 ч.	РАО-4 +1% ВНИИ НП-715 /20 ч.	РАО-4 + 1% АДТФ + 7,4%С-150 /20 ч.	РАО-4 +1% ВНИИ НП-715 +7,4%С-150/20 ч	РАО-4 +1% АДТФ +2,4% ССК-400 /20 ч.	РАО-4 +1% ВНИИ НП-715 +2,4% ССК-400/20 ч.
Средний диаметр пятна износа шарика ($d_{ш}$), мм	0,922	0,933	0,993	0,520	0,540	0,508	0,465
Ширина износа пластины (d_3), мм	1,150	1,141	1,236	0,529	0,546	0,429	0,482
Длина износа пластины (d_4), мм	1,794	1,731	1,929	1,579	1,595	1,476	1,524
Контурный износ (W_g), мкм ³	2317	2287	2469	1395	1425	1311	964
Объем износа шарика ($W_{V,шар}$), 10 ³ мкм ³	5330	4460	5959	146	153	149	133
Объем износа пластинки ($W_{V,пластина}$), 10 ³ мкм ³	3164	2895	3471	1940	1938	1744	1303
Коэффициент трения в конце опыта	0,094	0,095	0,092	0,069	0,071	0,072	0,073

[1] Spikes H. The history and mechanisms of ZDDP // Tribology letters. - 2004, (17), № 3, 469-489
 [2] Barnes A.M., Bartle K.D., Thibon V.R.A. A review of zinc dialkyldithiophosphates (ZDDPS): characterization and role in the lubricating oils // Tribology International. – 2001, (34), 389-395
 [3] Kristen U., Muller K., Chasan D., Gandhi H.S., Perry J., Beckwith E.C. Use of a novel non-phosphorus antiwear additive for engine oils // SAE Tech. Pap. Ser. – 1987, № 872080, 10

[4] Чертков Я.Б., Виппер А.Б. // Нефтепереработка и нефтехимия. Научная Дума, Киев, -1993, Вып. 45, 19-25
 [5] Золотов В.А., Бартко Р.В., Марандыкина С.О., Бакунин В.Н. Эффективность антиокислительных свойств беззольных дитиофосфатов в композиции с детергентами различной природы в среде синтетического масла//Нефтепереработка и нефтехимия, - 2016, - № 1, - 48-51.

ЗАТЯЖКА ДИНАМИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ ВИНТОВ

Иванов А.С. (a-s-ivanov@yandex.ru), Муркин С.В.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

Теоретически обоснована необходимость сильной затяжки динамически нагруженного отрывающей силой резьбового соединения.

Ключевые слова: резьбовая часть винта, сопротивление усталости, деформация контактного слоя.

Прочность деталей машин, если они нагружены переменными нормальными напряжениями σ , оценивают, как известно [1], запасом прочности S_σ по отношению к пределу выносливости σ_{-1} материала при знакопеременном симметричном цикле:

$$S_\sigma = \sigma_{-1} / (K_{\sigma D} \sigma_a + \Psi_\sigma \sigma_m) \geq (1,5 \div 2,5), \quad (1)$$

где $K_{\sigma D}$ – коэффициент уменьшения предела выносливости, зависящий от концентрации напряжений, размера опасного сечения, шероховатости поверхности и ее упрочнения; σ_a – амплитуда напряжений; Ψ_σ – коэффициент, характеризующий чувствительность материала к асимметрии цикла; σ_m – среднее напряжение цикла.

Коэффициент Ψ_σ может быть определен по диаграмме предельных напряжений $\sigma_{\max} = f(\sigma_m)$ и $\sigma_{\min} = f(\sigma_m)$:

$$\Psi_\sigma = (2\sigma_{-1} - \sigma_0) / \sigma_0, \quad (2)$$

где σ_{\max} и σ_{\min} – наибольшее и наименьшее напряжения цикла, σ_0 – предел выносливости материала при пульсационном цикле. Эту диаграмму строят по результатам испытаний гладких образцов на их сопротивление усталости при асимметричных циклах. На рис. 1 представлены диаграммы предельных напряжений [2] как для стали, из которой изготавливают винты класса прочности 10.9, так и для самих винтов М10 класса прочности 10.9. Из анализа графиков рисунка следует, что в то время как для гладкого образца $\Psi_\sigma > 0$ (см. график 1), для винтов $\Psi_{\sigma_{\text{в}}} = 0$ (см. график 2). Отметим, что для большинства сталей $\Psi_\sigma = 0,1 \div 0,2$. Таким образом, диаграммы предельных напряжений для винтов затянутых резьбовых соединений, отличающихся высокой концентрацией напряжений, имеют характерную особенность (такую же, что и для сварных соединений), заключающуюся в том, что предельная амплитуда напряжений не зависит от среднего напряжения цикла. Это подтверждает также формула, рекомендуемая ГОСТ 25.501–82 для вычисления коэффициента $\Psi_{\sigma_{\text{в}}}$, характеризующего чувствительность винта к асимметрии цикла:

$$\Psi_{\sigma_{\text{в}}} = \Psi_\sigma / K_{\sigma D}. \quad (3)$$

Из анализа формулы (3) следует, что при больших значениях коэффициента уменьшения предела выносливости (для резьбы винтов $K_{\sigma D} = 4 \div 10$) коэффициент $\Psi_{\sigma_{\text{в}}}$ близок нулю.

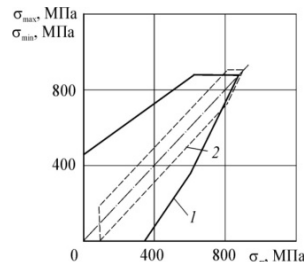


Рис. 1. Диаграммы предельных напряжений для стали, из которой изготавливают винты класса прочности 10.9 (1), и для винтов М10 класса прочности 10.9 (2)

На рис. 2 представлены диаграммы предельных напряжений для резьбовых соединений винтами классов прочности: 6.9; 8.8; 10.9; 12.9 [2]. Согласно этим диаграммам, для резьбовой части винтов в работе [2] рекомендуется принимать σ_{-1} по табл. 1.

Таблица 1. Предел выносливости σ_{-1} , МПа, при знакопеременном симметричном цикле для резьбовой части винтов

Класс прочности	Винты		
	M4÷M8	M10÷M16	M18÷M30
6.9; 8.8	60	50	40
10.9; 12.9	70	60	50

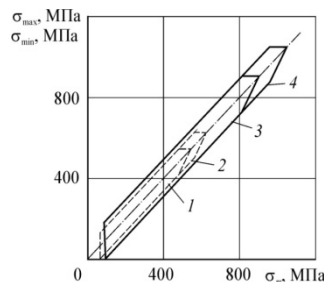


Рис. 2. Диаграммы предельных напряжений для резьбовых соединений винтами классов прочности: 6.9 (1); 8.8 (2); 10.9 (3); 12.9 (4)

В работе И.А. Биргера и Г.Б. Иосилевича [3] для повышения сопротивления усталости винтов рекомендуется затягивать винты до напряжений в них $(0,6 \div 0,8)\sigma_t$, где σ_t – предел текучести материала винта, но использование для расчета нагрузок на винты формул, приведенных в их работе, и диаграмма сил (рис. 3) в резьбовом соединении, построенная на основе применения этих формул, не согласуются с такой рекомендацией: согласно рис. 3, при увеличении силы затяжки винта от $F_{зат2}$ до $F_{зат1}$ и неизменной внешней отрывающей силе F , нагружающей резьбовое соединение, внешняя сила F_B , нагружающая винт, остается неизменной. На рис. 3 обозначены: F – внешняя отрывающая сила, нагружающая резьбовое соединение; $F_{зат1}$, $F_{зат2}$ – силы затяжки винта; F_B – внешняя отрывающая сила, нагружающая винты; Δ_B – удлинение винта; Δ_d – укорочение стягиваемых винтами деталей.

В наших работах [4, 5] показано, что, поскольку на податливость стягиваемых винтами деталей влияет не только их собственная деформация, но и деформация разделяющего их контактного слоя, которая нелинейно связана с нагрузкой (рис. 4), то при неизменной внешней отрывающей силе F с увеличением силы затяжки винтов ($F_{зат1} > F_{зат2}$) уменьшается внешняя нагрузка, приходящаяся на винты ($F_{B1} < F_{B2}$).

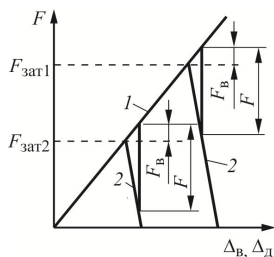


Рис. 3. Диаграмма сил в резьбовом соединении при его нагружении отрывающей силой [1], где $1 - \Delta_B = f(F)$; $2 - \Delta_d = f(F)$

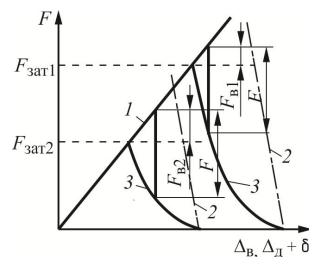


Рис. 4. Уточненная диаграмма сил в резьбовом соединении при его нагружении отрывающей силой, где $1 - \Delta_B = f(F)$; $2 - \Delta_d = f(F)$; $3 - \Delta_d + \delta = f(F)$; δ – сближение в контактом слое (разность ординат кривых 3 и прямых 2).

Из анализа графиков рис. 2 и рис. 4 следует, что сопротивление усталости винтов в их резьбовой части будет повышаться с увеличением их силы затяжки. Таким образом, проведенное исследование позволило теоретически обосновать необходимость применения в динамически нагруженном резьбовом соединении сильной затяжки винтов и расчета резьбовой части винта по формуле (3).

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки по проекту 1403.

- [1] Решетов Д. Н. Детали машин: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение – 1989.
- [2] Niemann G., Winter H., Höhn B.-R. Maschinenelemente. Band1: Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen. – Berlin: Springer. – 2001.
- [3] Биргер И. А., Иосилевич Г. Б. Резьбовые соединения. – М.: Машиностроение. – 1973.
- [4] Иванов А. С., Муркин С. В. Расчет и проектирование резьбовых соединений приводов. – М.: Инновационное машиностроение. – 2015.
- [5] Иванов А. С., Муркин С. В. Расчет резьбовых соединений приводов // Вестник машиностроения. 2016. № 5.

ПРИЛОЖЕНИЯ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ. АТТОСЕКУНДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В МИКРО-НАНО-ПИКО- И ФЕМТОТРИБОЛОГИИ.

Ивасышин Г.С. (genrih.ivasyschin@yandex.ru)

Псковский государственный университет, Псков, Россия.

Обсуждаются возможности получения конкурентоспособных технологий на основе научных открытий (Диплом № 258, Диплом № 277, Диплом № 289, Диплом № 302, Диплом № 392, Диплом № 404, Диплом № 466, Диплом № 468) и квантовой механики.

Ключевые слова: углеродно-азотный цикл, протон – протонный цикл, сверхтекучесть гелия, гелиевое изнашивание, холодный ядерный синтез.

Введение.

«... Одной из самых важных приоритетных научных проблем в настоящее время является проведение фундаментальных исследований в области основ физики аттосекундных процессов, и новейших аттосекундных нанотехнологий., использующих в точечных операциях с материалами аттосе-

кундные импульсы электромагнитной энергии в диапазоне жесткого ультрафиолета и мягкого рентгена. Без решения этой проблемы невозможно выполнение высокоточных неразрушающих монтажных операций в материалах на нижнем предельном масштабном уровне 1 – 10 нм. При этом реализация аттосекундных физических процессов

ведётся не на типичном для фемтосекундной химии уровне валентных связей атомов, а на более глубоком уровне перестройки внутренней электронной структуры атомов и молекул...» [1].

Ю.И.Головин считает, «...желательно найти условия, в которых трение упало бы до нуля и реализовалось «сверхскольжение», аналогичное сверхпроводимости или сверхтекучести. Принципиальных препятствий для этого не существует, и в некотором смысле такие режимы уже найдены...» [2].

Действительно, некоторые из таких режимов уже найдены.

Определённое представление о диапазоне нанотехнологических исследований, в т.ч. фемтосекундных технологий, и масштабах финансирования нанотехнологических программ Японии даёт, в частности, информация, приведённая профессором Токийского Университета Наоя Кобаяси [3].

Цели и задачи.

Обеспечение условий управления трением на основе синтеза гелия в объёмных и поверхностных слоях пар трения, а также на основе квантовой механики.

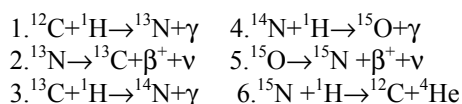
Материалы и методы

На наш взгляд использование пар трения с гелиевым изнашиванием, созданных на основе реализации углеродно-азотного и протон-протонного циклов холодного ядерного синтеза, в результате которых в зоне трения водород превращается в гелий, даст возможность управлять трением (за счёт сверхтекучести гелия) в микро-трибосистемах [4,5].

*Научное открытие (Диплом № 289)[6]
«Закономерность аддитивности диффузионного магнитного последствия в объёмных частях и поверхностных слоях пар трения из ферромагнитных материалов и сплавов»*

«Установлена неизвестная ранее закономерность аддитивности диффузионного магнитного последствия в объёмных частях и поверхностных слоях пар трения из ферромагнитных материалов и сплавов, заключающаяся в том, что в упругой и пластической областях твёрдых тел в зоне их фрикционного контакта происходит суммирование (аддитивность) диффузионных магнитных последствий, сопровождающих упругие и пластические последствия, определяющая поведение внедрённых атомов углерода и азота и обусловленная направленным перемещением дислокаций, несущих внедрённые атомы углерода и азота в зону фрикционного контакта из упругой и пластической областей пары трения и влияющих на структуру и подвижность доменных стенок».

Необходимо отметить, что атомы внедрения углерода С и азота N (углеродно-азотный цикл) ответственные, как бы парадоксально это не звучало, за синтез гелия в зоне трения (Диплом № 289).



Углерод играет роль катализатора процесса слияния протонов.

Протон, сталкиваясь с ядром углерода, превращается в радиоактивный изотоп ${}^{13}\text{N}$. При этой реакции излучается γ -квант (фотон). Изотоп ${}^{13}\text{N}$, претерпевая β -распад с испусканием позитрона и нейтрино, превращается в обычное ядро азота ${}^{14}\text{N}$. При этой реакции так же излучается γ -квант. Далее, ядро азота сталкивается с протоном, после чего образуется радиоактивный изотоп кислорода ${}^{15}\text{O}$ и γ -квант. Затем этот изотоп путём β -распада превращается в изотоп азота ${}^{15}\text{N}$. Наконец, последний, присоединив к себе во время столкновения протон, распадается на обычный углерод и гелий. Вся цепь реакций представляет собой последовательное «утяжеление» ядра углерода путём присоединения протонов с последующими β^+ -распадами. Последним звеном этой цепи является восстановление первоначального ядра углерода и образование нового ядра гелия за счёт четырёх протонов, которые в разное время один за другим присоединились к ${}^{12}\text{C}$ и образующимся из него изотопам.

Выводы.

1. Разработаны оригинальные теоретические (трибофизические) модели механизма ХЯС в кристаллических структурах поверхностных слоёв пар трения из ферромагнитных материалов и сплавов.[4-5]

2. Решена задача - найдены «...условия, в которых трение упало бы до нуля и реализовалось «сверхскольжение», аналогичное сверхпроводимости или сверхтекучести...» - созданы трибофизические модели на основе реализации углеродно-азотного и протон-протонного циклов, в результате которых водород превращается в гелий.

[1] Безносюк С.А., Жуковский М.С., Маслова О.А., Терентьева Ю.В., Максимов Д.Ю. Компьютерное моделирование аттосекундных нанотехнологий на основе НЭМС материалов // Сборник тезисов VII ежегодной конференции Нано технологического общества России. 2 марта 2016. -М.: НОР. – С. 66-69.

[2] Головин Ю.И. Введение в нанотехнику. – М.: Машиностроение, 2007. -496с.

[3] Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию / Н.Кобаяси; пер. с японск.-2-е изд. –М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008.-134с.

[4] Ивасьшин Г.С. Приложения квантовой механики. Научные открытия в области микро-нано-пико- и фемтотрибологии// Нанотехнологии: наука и производство. 2015. №3.-С.15-24.

[5] Ивасьшин Г.С. Приложения квантовой механики. Научные открытия в области микро- и нанотрибологии// Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. №11.-С.45-48.

[6] Научное открытие (Диплом № 289)// Закономерность аддитивности диффузионного магнитного последствия в объёмных частях и поверхностных слоях пар трения из ферромагнитных материалов и сплавов. / Г.С. Ивасьшин. – М.: РАЕН, МААНО-ИИ, 2005.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ УДЕЛЬНОЙ СИЛЫ ТРЕНИЯ

¹Измайлов В.В. (iz2v@tvcom.ru), ²Чаплыгин С.А.

¹Тверской государственной технической университет, Тверь, Россия;

²ООО «Нефтегазгеофизика», Тверь, Россия.

Описана методика и результаты экспериментов по определению параметров удельной силы трения в зависимости от температуры и гидростатического давления при граничной смазке. Получены уравнения регрессии, выражающие температурную зависимость этих параметров в диапазоне 20 – 180 °С.

Ключевые слова: удельная сила трения, температура, гидростатическое давление, граничная смазка.

Введение

Согласно молекулярно-механической теории трения сила трения складывается из двух составляющих, которые и дали имя этой теории. При граничном трении металлических поверхностей основной вклад в общую величину силы трения вносит молекулярная составляющая.

Для удельной силы трения τ широко применяется двучленная формула [1]

$$\tau = \tau_0 + \beta p_r, \quad (1)$$

где p_r – фактическое контактное давление, или, что то же самое, среднее нормальное напряжение в контакте; τ_0 и β – параметры удельной силы трения, рассматриваемые как характерные величины для данной триады – конкретного сочетания контактирующих материалов и различного рода поверхностных слоев (смазочный материал, оксидные пленки и т.д.), находящихся на поверхности трущихся тел и в межконтактном пространстве.

К сожалению, в отличие от коэффициента трения, температурная зависимость параметров удельной силы трения при граничной смазке исследована мало.

Применительно к высокотемпературному трению без смазочного материала этот вопрос изучен Л.Ш. Шустером [2]. Описанные в его работах эксперименты проводились по схеме сферический индентор – плоский образец. Контактные пары образованы твердыми сплавами на основе карбидов вольфрама или титана и высоколегированными коррозионностойкими сталями и сплавами на основе хрома и никеля.

Еще менее изучено влияние гидростатического давления среды на величину удельной силы трения и ее параметры.

Данная работа посвящена экспериментальному определению параметров удельной силы трения τ_0 и β в контакте металлических поверхностей при граничной смазке и оценке влияния температуры и гидростатического давления на эти параметры.

Образцы и методика экспериментов

Определение параметров удельной силы трения в металлическом контакте при граничной смазке проводили с помощью конусного трибометра. Конический образец с углом при вершине 90° вдавливался под нормальной нагрузкой в плоский образец с отверстием (рис. 1). Оси конического образца и отверстия и направление приложенной сжимающей нагрузки совпадают. В результате пластической деформации в плоском образце образуется узкая кольцевая площадка контакта. Затем к коническому образцу прикладывали вращающий момент относительно оси контакта, по величине которого рассчитывали удельную силу трения.

Под микроскопом измеряли ширину проекции кольцевой площадки контакта на плоскость, перпендикулярную нормальной нагрузке (рис. 1). На основании этих измерений рассчитывали площадь контакта, а затем, по известным величинам нормальной силы N и вращающего момента $M_{вр}$, рассчитывали фактическое давление p_r и удельную силу трения τ .

Под микроскопом измеряли ширину проекции кольцевой площадки контакта на плоскость, перпендикулярную нормальной нагрузке (рис. 1). На основании этих измерений рассчитывали площадь контакта, а затем, по известным величинам нормальной силы N и вращающего момента $M_{вр}$, рассчитывали фактическое давление p_r и удельную силу трения τ .

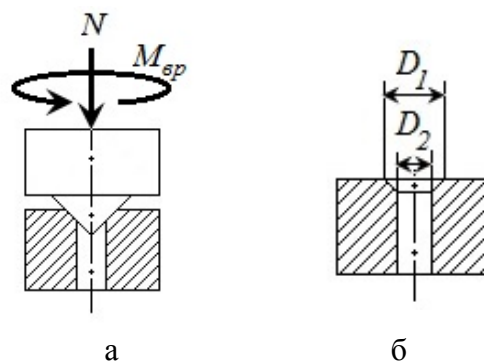


Рис. 1. Схема контакта образцов (а) и схема измерения размеров площадки контакта (б)

Для определения величины удельной силы трения при различных значениях фактического контактного давления использовали метод разгрузки. Первоначально к контакту прикладывали максимальную нормальную нагрузку, достаточную для достижения пластической деформации плоского образца и формирования кольцевой площадки контакта. Затем нормальную нагрузку ступенчато уменьшали до величины, равной примерно половине первоначального значения.

Конический образец изготовлен из стали 40Х13, плоский образец с отверстием – из бронзы БрАЖН10-4-4. Такое сочетание материалов – сталь/бронза – широко используется в узлах тре-

ния. Твердость стального образца 30 HRC, бронзового – 200 HB.

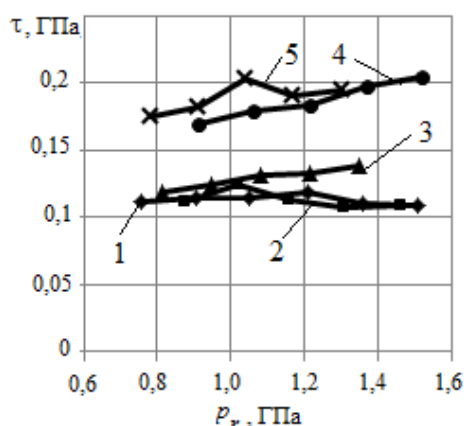


Рис. 2. Зависимость удельной силы трения от фактического контактного давления при различных температурах: 1 – 20 °С; 2 – 50 °С; 3 – 100 °С; 4 – 150 °С; 5 – 180 °С

В качестве смазочного материала использовали синтетическое масло на основе поли- α -олефинов ИПМ-10, разработанное для авиационных газотурбинных двигателей. Однако благодаря своим хорошим эксплуатационным качествам оно достаточно широко используется в других агрегатах.

Результаты и их обсуждение

Зависимости удельной силы трения от фактического контактного давления при различных температурах представлены на рис. 2. Обращает на себя внимание разделение зависимостей $\tau(p_r)$ на две группы – одна для диапазона температур 20–100 °С, другая для диапазона 150–180 °С. В диапазоне до 100 °С удельная сила трения слабо зависит от температуры, затем увеличивается с ростом температуры (рис. 3).

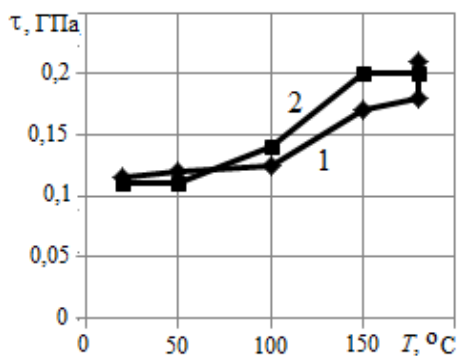


Рис. 3. Зависимость удельной силы трения от температуры: 1 – $p_r = 1$ ГПа; 2 – $p_r = 1,35$ ГПа.

Такую зависимость можно объяснить влиянием температуры на свойства смазочного материала – масла ИПМ-10. При температуре больше 100 °С увеличивается вероятность десорбции верхних

слоев смазочного материала, слабее связанных с металлической поверхностью [3]. Увеличивается также дезориентация молекул смазочного материала на поверхности металла [4].

По экспериментально полученным значениям удельной силы трения при различных значениях фактического контактного давления p_r методом наименьших квадратов получены параметры τ_0 и β линейной зависимости $\tau(p_r)$ (уравнение (1)) для различных температур в диапазоне 20–180 °С. В свою очередь, тем же методом наименьших квадратов по экспериментальным значениям параметров τ_0 и β при различных температурах получены уравнения регрессии $\tau_0(T)$ и $\beta(T)$, приведенные ниже:

$$\tau_0 = 0,1 + 3 \cdot 10^{-4} T, \quad (2)$$

$$\beta = (0,2T - 0,8) \cdot 10^{-3}, \quad (3)$$

где T – температура в °С.

Влияние гидростатического давления масла на параметры удельной силы трения иллюстрируется табл. 1.

Таблица 1. Влияние гидростатического давления на параметры удельной силы трения

Параметры	Давление, МПа	
	0,1	140
τ_0	0,1	0,07
β	0,003	0,09

Примечание. Температура $T = 20$ °С

Выводы

Экспериментально установлено, что при граничном трении величина удельной силы трения τ практически не зависит от температуры в диапазоне 20 – 100 °С, увеличиваясь затем почти в два раза в диапазоне 100 – 180 °С. Параметры удельной силы трения τ_0 и β увеличиваются с ростом температуры в диапазоне $T = 20 - 180$ °С.

Величина удельной силы трения τ возрастает с увеличением гидростатического давления среды. Возрастание гидростатического давления среды приводит к уменьшению параметра τ_0 и увеличению параметра β .

[1] Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. — М.: Машиностроение. — 1977

[2] Шустер Л.Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. — Уфа: Гилем. — 1999

[3] Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. — М.: Физматгиз. — 1963

[4] Матвеевский Р.М. Температурная стойкость граничных смазочных слоев и твердых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов. — М.: Наука. — 1971.

МОДЕЛЬ ПРОТЕКАНИЯ ЧЕРЕЗ ТОРЦОВОЕ УПЛОТНЕНИЕ

Измеров М.А., Тихомиров В.П.

ФГБОУ ВО «БГТУ», Брянск, Россия.
(dm-bgtu@yandex.ru)

Разработана методика оценки герметичности стыка метал-металлического разъемного неподвижного соединения на основе двухуровневой модели контактного взаимодействия инженерных поверхностей, где утечка уплотняемой среды определяется суммой утечек через стык волнистых поверхностей, определяемых параметрами волнистости, и просачиванием через пористую среду, образованную контактом шероховатых поверхностей на контурных площадках контакта

Ключевые слова: герметичность, протекание, фильтрация, пористость, контактное взаимодействие, фрактальная размерность.

Задача уплотнения стыков типа «металл – металл» при соблюдении точного взаимного расположения сопрягаемых деталей является актуальной и решается разными способами. Но расчет утечек при этом не дает надежных результатов, ввиду наличия в них либо коэффициентов, определяемых экспериментально для частных случаев, либо приближенности оценки высоты щели.

Предлагаемая методика предполагает, что при наличии волнистости и шероховатости утечка жидкости через стык определяется выражением

$$Q = \alpha Q_F + (1 - \alpha) Q^*$$

Здесь $\alpha = A_c / A_a$, A_c - контурная площадь, определяемая волнистостью; A_a - номинальная (геометрическая) площадь поверхности уплотняющего кольца, Q^* - утечка через зазор, образованный контактом волнистых поверхностей, Q_F - просачивание через пористый слой, образованный шероховатостью на контурных пятнах контакта.

Рассматривается многоуровневая модель межконтактного пространства, которая отражает волнистость (предфрактал) и шероховатость (фрактальная пористая среда). Подобное строение зазора в плоском стыке приводит к необходимости рассматривать утечки через щель между волнистыми поверхностями и фильтрацию через пористую среду, определяемую шероховатостью.

Щелевая модель протекания. Для осесимметричного кольцевого соединения число волн определяется выражением (рис. 2)

$$n_w = 2\pi r_m / W_{Sm}$$

где r_m - средний радиус ($r_m = (r_1 + r_2) / 2$); W_{Sm} - длина волны.

В качестве модели волнистой поверхности примем набор радиально расположенных волн, имеющих в верхней части цилиндрическую форму. При этом учитывается случайный разброс амплитуд волн. Пренебрегая шероховатостью, рассмотрим модель контактного взаимодействия гладкой поверхности с волнистой (рис. 1). Полагаем, что все вершины волн находятся в упругом контакте с сопряженной поверхностью. Таким образом, утечка в основном проходит в радиальном направлении между вершинами волн.

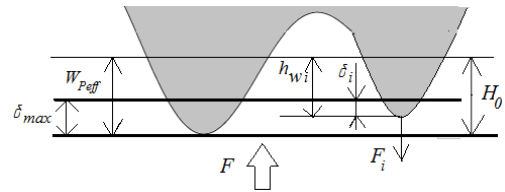


Рис. 1. Контакт гладкой поверхности с волнистой

После приложения сжимающей силы зазор в контакте уменьшится на величину сближения поверхностей δ_{max} . Решая уравнение Рейнольдса с учетом граничных условий, найдем в рамках щелевой модели [1] величину утечки Q для кольцевого зазора с гладкими стенками высотой h :

$$Q^* = \frac{4\pi h^3 \Delta p}{3\eta \ln(r_2 / r_1)}$$

Здесь η - динамическая вязкость; p - давление; h - высота; $h = 0,5(H_0 - \delta_{max})$, H_0 - расстояние между средними линиями профиля волнистости, определим как [2] $H_0 = W_{p1} + W_{p2}$, W_p - высота сглаживания волнистого профиля; индексы 1, 2 относятся к двум сопряженным поверхностям.

Уровень деформации связан с амплитудой волн, имеющей определенное распределение, в следствии чего провести оценку герметичности проектируемого соединения невозможно без создания **имитационной модели контактного взаимодействия поверхностей с учетом волнистости.**

1. Зададим нагрузку F , приходящуюся на n_w волн, и радиус закругления верхней части r_w . Приняв логарифмически нормальный закон распределения вершин волн, смоделируем волну, состоящую из n_w случайных величин (СВ). Определим начальное сближение δ_{max} волн [3], считая, что имеем только одну волну, по формуле

$$\delta = \frac{F}{L} (\lambda_1 + \lambda_2) \left\{ \ln \left[\frac{L^3}{4(\lambda_1 + \lambda_2) F \cdot r_w} \right] + 2,38629 \right\}$$

Здесь L - длина линии контакта ($L = r_2 - r_1$); $\lambda_i = (1 - \mu_i^2) / (\pi E_i)$; μ - коэффициент Пуассона, E - модуль упругости; r_w - радиус волны, F - нагрузка, приходящаяся на волну, которая подвергнута деформации до сближения δ .

При предварительно рассчитанной величине сближения δ_{max} деформация i -ой волны окажется равной

$$\delta_i = h_{wi} - (W_p - \delta_{max})$$

2. Найдем реакцию i -той волны F_i , соответствующую деформации δ_i и сравним сумму реакций ΣF_i , приходящихся на n_w волн, с внешней нагрузкой F . Если $\Sigma F_i > F$, то следует уменьшить сближение $\delta_{max} = \delta_{max} - \Delta$, где $\Delta = \delta_{max}/2$, а если $\Sigma F_i < F$, то следует соответственно увеличить сближение $\delta_{max} = \delta_{max} + \Delta$. Если происходит смена неравенства с большего на меньшее или наоборот, то методом половинного деления уменьшаем $\Delta = \Delta/2$. Расчет следует закончить, если выполняется условие

$$\frac{F - \sum_{i=1}^{n_w} F_i}{F} \leq [\varepsilon]$$

Здесь $[\varepsilon]$ – заданная точность (мы использовали $\varepsilon = 0,01$).

Фильтрационная модель протекания. Эта модель протекания использует представление межконтактного зазора на контурных площадках в виде фрактальной пористой среды [4]. Исследования, проводимые в области фрактальных поверхностей, показали, что микронеровности структуры достаточно точно описываются случайными фрактальными функциями. В этом случае просачивание (перколяция) зависит от структурных особенностей межконтактного зазора: пористости, извилистости микроканалов, состоящих из соединенных между собой пор и других факторов. Запишем известную и широко используемую интегральную функцию распределения числа пор определенных размеров в виде (закон Корчака)

$$N(L > r) = \left(\frac{r_{max}}{r} \right)^{D_f}$$

Здесь r_{max} – максимальный радиус пор; D_f – фрактальная размерность пор ($0 < D_f < 2$).

Продифференцировав уравнение Корчака относительно радиуса пор, получим количество пор, чей радиус находится в диапазоне от r до $r+dr$

$$-dN(r) = D_f r_{max}^{D_f} r^{-(D_f+1)} dr$$

Выражение для утечки через пористую среду имеет вид

$$Q_F = - \int_{r_{min}}^{r_{max}} q^*(r) dN(r)$$

Здесь расход жидкости через прямолинейный цилиндрический канал по Пуазейлю определяется уравнением

$$q^*(r) = - \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{dp}{dL_T}$$

Средний гидравлический радиус равен

$$r = \frac{\lambda^{1-D_f} \delta}{2 A_c^{D_f/(2[1-D_f])}}$$

Здесь δ – масштаб измерения (раствор цирку-

ля при измерении длины кривой); D_f – фрактальная размерность кривой (цепочки пор); A_c – контурная площадь; λ – параметр: $\lambda = \frac{L}{\delta^{1-D_f}}$.

Длина магистрального канала протекания L_T (L_0 – анализируемый участок, см. рис. 2) равна

$$L_T = \lambda \left(\frac{A_c^{1/2}}{L_0} \delta \right)^{1-D_f}$$

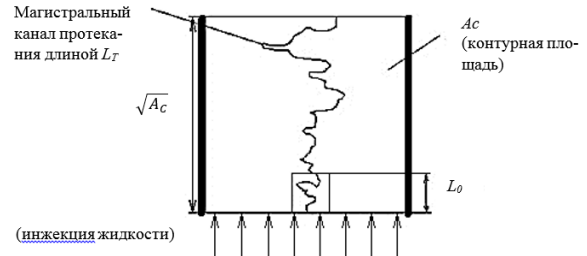


Рис. 2. Протекание через пористую среду

Приняв градиент (перепад) давления $dp = dP/dL_0 = \Delta P/L_0$ и подставив вышеприведенные зависимости, окончательно получим величину утечки через пористый слой

$$Q_F = - \frac{\pi \cdot r_{max}^4}{8\eta(4-D_f)} \frac{\Delta P \cdot D_f}{(D_f-1) \lambda \cdot A_c^{0.5(1-D_f)} \delta^{1-D_f} \cdot L_0^{D_f-1}}$$

Результат. По предложенной методике в среде программирования C++ Builder была разработана программа, позволяющая смоделировать контакт волнистых и шероховатых поверхностей и рассчитать суммарную величину утечки через щель, образованную волнистостью, и пористый слой, образованный шероховатостью сопряженных поверхностей. Полученные данные хорошо согласуются с данными по литературным источникам [5]. Таким образом, представляется возможным смоделировать контакт волнистых и шероховатых поверхностей с определением герметичности соединения металл-металлических поверхностей в зависимости от нагрузки и сближения.

[1] Богомолов, Д.Ю. Математическое моделирование течения жидкости в щелевых каналах с учетом реальной микротопологии поверхности их стенок / Богомолов Д.Ю., Порошин В.В., Радьгин В.Ю., Сыромятникова А.А., Шейпак А.А.-М.: МГИУ, 2010. 162 с.

[2] Майер, Э. Торцовые уплотнения: Пер. с нем. / Э. Майер. – М.: Машиностроение, 1978. – 288 с.

[3] Norden, B.N. On the compression of a cylinder in contact with a plane surfaces / B.N. Norden. -Washington: Institute for Basic Standards National Bureau of Standards, 1973. - 47 pp.

[4] Тихомиров В.П. Герметичность металл-металлических уплотнительных устройств / В.П. Тихомиров, М.А. Измеров - «Вестник» БГТУ: Брянск, 2016. - № 1 (49). - С. 89-99.

[5] Kou, J. Fractal analysis of effective thermal conductivity for three-phase (unsaturated) porous media / J. Kou, Y. Liu, F. Wu, J. Fan, H. Lu, Y. Xu // Journal of applied physics, 2009. – v.106. – 054905. 1–6.

АКТИВНОЕ ГАШЕНИЕ ФРИКЦИОННЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ВОЗМУЩЕНИЯ

Израилович М.Я. (optima44@mail.ru), Эрлих Б.М., Рочагов А.В.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

Рассматривается одномассовая механическая система, содержащая фрикционную характеристику автоколебательного типа и подверженную действию гармонического параметрического возмущения. Для снижения интенсивности результирующих колебаний вводится активное силовое виброгасящее воздействие. Приводится пример снижения интенсивности колебаний.

Ключевые слова: автоколебания, параметрическое возмущение, активное гашение.

Во многих случаях источниками нежелательной активности механизмов и машин различного назначения является наличие нелинейных фрикционных характеристик автоколебательного типа, что способствует возникновению самовозбуждающихся автоколебаний [1]. Однако для ряда классов механизмов, кроме того, возможно и наличие и других источников нежелательных колебаний, которые в некоторых случаях существенно усиливают интенсивность фрикционных колебаний.

В качестве такого источника зачастую может играть роль параметрическое возмущение, в использование только активного источника гашения [2],[3],[4]. Рассматривается одномассовая механическая система, уравнение динамики которой имеет вид:

$$\ddot{x} + \omega_0^2(1 + h \cos 2\omega t)x + f(\dot{x}) = u, \quad (1)$$

где x – координата системы; ω_0 – её собственная частота; h – амплитуда параметрического воздействия; ω – его частота; $f(\dot{x})$ – фрикционная характеристика; u – силовое виброгасящее воздействие, вводимое для снижения результирующей интенсивности установившихся колебаний, на которое налагается ограничение $\int_0^{2\pi/\omega} u^2 dt \leq V$, где V – заданная константа.

Как следует из результатов [2-3], оптимальный закон силового виброгашения определяется по формуле:

$$u^*(x, \dot{x}) = \frac{1}{A^* |D^*|} \sqrt{\frac{\omega V}{\pi}} \left[(\omega_0^2 - \omega^2)x + f_2(A^*) \frac{\dot{x}}{\omega} \right], \quad (2)$$

где A^* – минимальная амплитуда установившихся колебаний, определяемая как минимальный положительный корень уравнения

$$A^2 \left[D(A) - \frac{\omega_0^2 h}{2} \right]^2 = \frac{\omega V}{\pi}; \quad A^2 \left[f_2^2(A) + (\omega_0^2 - \omega^2) \right]^{1/2}.$$

В качестве конкретного примера рассматривается система с простейшей автоколебательной характеристикой [5]:

$$\ddot{x} + \omega_0^2(1 + h \cos 2\omega t)x - \mu \text{sign} \dot{x} = u. \quad (2)$$

При отсутствии виброгасящего воздействия амплитуда колебаний системы (2):

$$A_0 = \frac{2\mu}{\pi k \omega_0}; \quad (3)$$

при действии параметрического возмущения:

$$A_{00} = \frac{4\mu}{\pi \left(2k\omega - \frac{\omega_0^2 h}{2} \right)}; \quad (4)$$

$$\left(\text{при } \frac{\omega_0^2 h}{2} < 2k\omega \right)$$

Из сравнения формул (3) и (4) очевидно амплитуда при действии параметрического возмущения (4) может сильно превосходить амплитуду (3) при отсутствии такого.

При введении силового виброгасящего воздействия оптимальная амплитуда:

$$A^* = \left(2k\omega + \frac{\omega_0^2 h}{2} \right) \left(\frac{4\mu}{\pi} - \sqrt{\frac{\omega V}{\pi}} \right)^{-1}. \quad (5)$$

Значение этой амплитуды (5) существенно ниже A_{00} (4). Кроме того, величина A^* при достаточно большом значении V оказывается также меньше величины A_0 (3).

[1] Крагельский И.В., Гитис Н.В. Фрикционные автоколебания. - М.: Наука, 1987. - 182 с.

[2] Израилович М.Я. Активное виброгашение параметрических колебаний. - М.: URSS, 2011. - 170 с.

[3] Израилович М.Я. Параметрическое управление автоколебаниями. - М.: URSS, 2009. - 160 с.

[4] Израилович М.Я., Эрлих Б.М. Активное гашение периодических колебаний в системах с нелинейным демпфированием. - М.: Издательство «Спутник +», 2015. - 38 с.

[5] Израилович М.Я. Активное гашение колебаний с фрикционной характеристикой автоколебательного типа при действии параметрического возмущения // Трение и смазка в машинах и механизмах. - 2012. - №1. - С. 3-5.

ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ АБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ

Илясов В.В. (viily@mail.ru)

Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону, Россия.

Предложен метод расчета абразивного износа материалов из первых принципов. Физическая модель абразивного износа предполагает квантово-механический расчет электронной структуры, определение парциальных и эффективных зарядов на атомах соединения, типов и количества связей, длины связей, степени перекрытия электронных орбиталей атомов в соединении. Результаты расчетов сопоставляются с экспериментами и другими оценками.

Ключевые слова: абразивный износ, относительная износостойкость, метод расчета, первые принципы.

Мониторинг состояния проблемы оценки износа инструментальных материалов показал, что наиболее характерным является механический износ поверхностей, характеризующийся потерей размеров и массы пар трения, который проявляется при износе прессового и режущего инструмента, насосных штоков, деталей горнодобывающей и землеройной техники и т.д. Наименее изучен абразивный износ поверхностей. В аналитических методах расчёта показателей износостойкости обычно отражены определенные физические модели изнашивания [1]. В докладе рассматривается механический износ поверхностей с потерей размеров и массы эксплуатируемых изделий, в частности, абразивный износ, который проявляется в трибосистемах с равномерной интенсивностью во всем диапазоне температур в зоне контакта. Здесь предложена физическая модель абразивного износа, построенная на основе эмпирической зависимости Хрушова М.М. $I_{rel} = b \cdot H$ [2] и соотношения Гао [3,4] для определения из первых принципов твердости соединения

$$H = \left[\prod_i (H_j^i)^{n^i} \right]^{1/\sum n^i},$$

где H , H_j^i - твердость соединения и твердость i -го типа связи соответственно, n^i - перекрытие зарядов в связи типа Ме-С, определяемое по методу Милликена, аналогично работе [5]. Данная процедура предполагает квантово-механический расчет электронной структуры, определение парциальных и эффективных зарядов на атомах соединения, типов и количества связей, длины связей, степени перекрытия электронных орбиталей атомов в соединении. Аналитическая зависимость, связывающая относительную износостойкость с характеристиками электронной структуры, может быть представлена в следующем виде

$$I_{rel} = b \cdot \left[\prod_i \left(740 p^i \left(\frac{(d^i)^3}{\sum_j [(d^j)^3 N_b^j]} \right)^{-(5/3)} \right)^{n^i} \right]^{1/\sum n^i},$$

где p^i - перекрытие орбиталей i -го типа связи, d^i - длина связи, N_b^j - плотность направленных j -связей, b - размерный коэффициент пропорциональности.

Для тестирования данной методики были выполнены оценки относительной износостойкости кристаллографических объектов, представленные в табл. 1. Анализ данных в табл. 1, позволяет отметить, что величина относительной износостойкости, например, карбида вольфрама (353,52) превышает на 4 % величину относительной износостойкости (339,026), полученную по ранее оценке авторов работы [6]. Причина этого различия, возможно, обусловлена различием длин С-В-связи (см. табл. 1), которые использованы в расчетах. Результаты настоящего расчета износостойкости карбида вольфрама хорошо согласуются с оценкой Хрушова М.М. ($I_{отн} = 330.7$ при твердости 24.696 ГПа [2]) и величина различия составляет 6,5 %.

Следует отметить экстремально высокие значения относительной износостойкости алмаза (1253,38) и кубического нитрида бора (863,71). Заслуживают интерес соединения, для которых получены значения относительной износостойкости выше значений 400. Особенно притягателен нитрид β -Si₃N₄, который является кристаллографическим аналогом нитрида углерода – перспективного материала для покрытий инструментального материала.

Развитый выше подход был использован для оценки относительной износостойкости широкого класса соединений, в частности всех карбонитридных фаз, составляющих основу инструментальных твердых сплавов и не противоречит экспериментальным данным и физическим представлениям.

Таким образом, применение описанной выше аналитической модели взаимосвязи физических свойств с износостойкостью позволяет выполнять оценки характеристик износостойкости для широкого класса инструментальных материалов.

Таблица 1. Параметры расчёта, твёрдость и относительная износостойкость карбида вольфрама, карбидов переходных металлов, алмаза, кубического нитрида бора и корунда

Фаза	Тип связи	Длина связи, Å	Перекрывание по Милли-кену	Число связей	Твёрдость, ГПа	Относительная износостойкость, I_{rel}
WC	C-W	2,197	-	-	26,4 [3], 30,24*[3]	353,52
WC	C-W	2,220	-	-	24,18 [6], 24,69*[2]	339,03 [6], 330,7*[2]
TiC	C-Ti	2,167	0,82	12	25,0 [7]	334,77
VC	C-V	2,082	0,77	12	28,6 [7]	382,98
ZrC	C-Zr	2,356	0,78	12	15,6 [7]	208,90
NbC	C-Nb	2,242	0,76	12	19,5 [7]	261,12
TaC	C-Ta	2,284	0,91	12	21,3 [7]	285,23
алмаз	C-C	1,554	-	-	93,6 [3], 96*±5 [3]	1253,38
c-BN	B-N	1,568	-	-	64,5 [3], 63*±5 [3]	863,71
Al ₂ O ₃	O-Al	1,900	-	-	20,6[3], 20*±2[3]	275,85
AlN	N-Al	1,901	-	-	21,7 [3], 18*[3]	290,58
BP	P-B	1,966	-	-	31,2 [3], 33*±2[3]	417,79
β-Si ₃ N ₄	N-Si	1,734	-	-	30,3 [3], 30*±2 [3]	405,74

* - эксперимент

- [1] Рыжкин А.А., Илясов В.В. О связи между износостойкостью и физическими свойствами инструментальных материалов // Вестник машиностроения. – 2000, № 12, 32-40.
 [2] Хрушов М.М. Закономерности абразивного изнашивания // Износостойкость. - М.: Наука - 1975.
 [3] Gao F.M., He J.L., Wu E.D. Hardness of Covalent Crystals // Phys. Rev. Lett. – 2003(91) 015502.
 [4] Zhang X.H., Luo X.G., Han J.C. Electronic structure, elasticity and hardness of diborides of zirconium and hafnium: First principles calculations // Comput. Mater. Sci. – 2008(44) 411-421.

- [5] Xiao B., Xing J.D., Feng, J. A comparative study of Cr₇C₃, Fe₃C and Fe₂B in cast iron both from ab initio calculations and experiments // J. Phys. D : Appl. Phys. – 2009(42) 115415-115431.
 [6] Илясов В.В., Рыжкин А.А., Илясов А.В. Физическая модель износостойкости металлматричных композиционных материалов // Вестник ДГТУ. – 2008 (8, № 2) 31-36.
 [7] Liu, YangZhen. First principles study the stability and mechanical properties of MC (M = Ti, V, Zr, Nb, Hf and Ta) compounds // J. Alloys Compounds. – 2014(582) 500-504.

РАЗРАБОТКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА КОНСЕРВАЦИОННЫХ, ЗАЩИТНЫХ И ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Казakov А.М., Кузвесова А.А.

ХТЦ УАИ, Уфа, Россия.

Представлены результаты лабораторных и натурных испытаний новых консервационных масел, защитных и полифункциональных материалов различного назначения.

Ключевые слова: консервационное масло, защитные свойства, консервационно-технологическое масло, лабораторные испытания, натурные испытания, производство.

Введение

Одним из наиболее распространенных и эффективных способов используемых в промышленности для временной антикоррозионной защиты металлоизделий является применение консервационных масел и смазок. Поскольку защитные материалы позволяют сохранить первоначальные свойства металлопродукции и существенно уменьшить количество брака от коррозии это приводит к экономии металлов и сплавов, уменьшению добычи природных минералов и сохранению полезных ископаемых для будущих поколений то есть к рациональному использованию природных ресурсов [1].

В настоящее время в технопарке «Хозрасчетный творческий центр уфимского авиационного института» в рамках деятельности «Кластера малотоннажной нефтехимии Республики Башкортостан», который вошел в состав «Нефтехимического инновационного территориального кластера РБ», при поддержке Правительства Республики Башкортостан реализуется проект по разработке и производству современных смазочных материалов используемых для защиты изделий из металлов и

сплавов от атмосферной коррозии.

Консервационные масла

Ассортимент выпускаемых в России консервационных масел не достаточно широк. Предлагаемые на Российском рынке отечественные продукты имеют ряд существенных недостатков. Они либо обладают высокой вязкостью, что при нанесении масла методом приводит к его перерасходу а толстая масляная пленка на поверхности изделий портит их внешний вид и влечет за собой необходимость дополнительной операции расконсервации, либо не обеспечивают достаточно эффективной защиты от коррозии.

Перечень импортных консервационных масел, представленных сегодня на российском рынке, достаточно большой и в основном позволяет потребителям подобрать необходимые по эксплуатационным и защитным свойствам материалы, но они имеют высокую цену. Особенно остро вопрос цены стал актуальным в связи с резким ростом иностранной валюты в 2014-2015 годах.

Консервационное масло «Росойл-700» - это первое масло, разработанное в Технопарке «ХТЦ

УАИ» для защиты черных и цветных металлов и сплавов от атмосферной коррозии. Оно разработано по техническому заданию «Магнитогорского металлургического комбината» и предназначено для защиты от коррозии стального и оцинкованного металлопроката, труб, оборудования, запасных частей и т.п. Масло прошло испытания в ФАУ «25-й ГОСНИИ химмотологии Министерства обороны Российской Федерации» и в ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», где показало очень хорошие результаты и в последствии было включено в ГОСТ 9.014-78.

Консервационное масло "Росойл-700М" разработано по заказу «Первоуральского новотрубного завода» для защиты от коррозии стальных труб на период длительного хранения и транспортирования. Масло обладает высокими тиксотропными и защитными свойствами, особенно при воздействии нейтрального соляного тумана (ГОСТ 9.054 метод 3) — время до появления первых очагов коррозии составляет не менее 200ч. Технология изготовления масла позволяет обеспечивать требуемую вязкость в интервале температур от 30⁰С до 70⁰С.

Консервационное масло "Росойл-703" - это масло с усиленными тиксотропными свойствами препятствующими сползанию или стеканию масла с вертикальной поверхности, в том числе при повышении температуры окружающего воздуха до 50⁰С и выше. Данный материал разработан по заявкам ряда предприятий периодически получающих нареkania от транспортных и складских предприятий по поводу повышенного загрязнения полов транспортных средств или складских помещений и площадок маслами стекшими с изделий законсервированных без упаковки. По сравнению с маслом "Росойл-700" этот продукт имеет более высокую вязкость и увеличенные защитные свойства в атмосфере соляного тумана — не менее 24 часов.

Консервационное масло «Росойл-704» - мало вязкое масло для специальных видов металлопродукции с высокой проникающей способностью и защитными свойствами. Разрабатывалось как аналог зарубежного масла «Wedolit K 719» (Германия). При нанесении на изделия масло не требует подогрева, может наноситься при комнатной температуре, на поверхности изделий образует тонкое светлое покрытие которое соответствует требованиям европейских потребителей, по сравнению с импортным аналогом обладает достаточно высокой температурой вспышки - 130⁰С в открытом тигле и не требует организации специального участка для промасливания изделий.

Полифункциональные смазочные материалы

Решение проблемы возможного совмещения технологических операций при сохранении качества продукции, сокращении количества используемых вспомогательных материалов, практически всегда обеспечивает повышение технико-экономической эффективности производства. Решить эту проблему возможно путем создания по-

лифункциональных смазочных материалов. К одному из видов таких материалов относятся консервационно-технологические смазочные материалы совмещающие в себе триботехнические свойства необходимые для обеспечения операций механической обработки металлов и защитные свойства необходимые для защиты металлоизделий от коррозии во время межоперационного или складского хранения и транспортировки [2-5].

Консервационно - технологическое масло «Росойл-710» - является одним из первых разработанных и производимых в России консервационных масел со штамповочными свойствами. Оно предназначено для использования в качестве смазочного материала на операциях листовой штамповки деталей средней сложности и механической обработки металлов, а также защиты изготовленных деталей от коррозии при хранении и транспортировке. Масло успешно прошло испытания и применяется в условиях пресового производства ОАО «АВТОВАЗ» с 2004 года.

Следует отметить, что эффективность антикоррозионной защиты масла «Росойл-710» как в атмосфере соляного тумана, так и в условиях повышенной относительной влажности и температуры воздуха, в 40-50 раз выше, чем на деталях, обработанных с использованием индустриального масла и технологических смазочных материалов. Не маловажным фактом является то, что масло «Росойл-710» пригодно для использования на машинах электростатического промасливания. Полифункциональный смазочный материал «Росойл-712» - новая разработка сотрудников ХТЦ УАИ. Детали, изготовленные с использованием этого материала также не требуют применения дополнительной операции консервации металлоизделий после механической обработки, так как масло «Росойл-712» способно обеспечить надежную защиту готовой продукции от атмосферной коррозии при длительной до 6 месяцев транспортировке от производителя до покупателя.

Заключение

В Технопарке ХТЦ УАИ постоянно ведется работа по увеличению номенклатуры и модернизации группы материалов с антикоррозионными и защитными свойствами. При этом используются собственные технические решения, защищенные патентами РФ.

Исследования в этом направлении позволили расширить номенклатуру консервационных, защитных и полифункциональных материалов, разработанных и выпускаемых в Технопарке ХТЦ УАИ на Опытном заводе смазок и оборудования (ОЗСО).

[1] Школьников В.М., Шехтер Ю.Н., Михайлова О.Л., Гурьев А.В. Классификация и механизм действия комбинированных ингибиторов коррозии. // Сборник трудов ВНИИ НП. Выпуск 47. Смазочные материалы для защиты от коррозии. - М.: ЦНИИТЭНЕФТЕХИМ, 1985. - С. 3-11.

[2] Савельева Н.В., Шолом В.Ю., Демидова О.В., Казаков А.М. Оптимизация промышленной технологии консервации труб, Кузнечно-штамповочное производство, 2003. №9. С.41-43.

[3] Савельева Н.В. Технологические смазочные материалы нового поколения, Кузнечно-штамповочное производство, 2008.

РАЗРАБОТКА СКЛЕРОМЕТРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ГАЗОПРОМЫСЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

¹Калугин И.А. (Mechanic51@Yandex.ru), ²Сафонов Б.П.

¹ООО «Газпром Добыча Ямбург», ЯНАО, Россия;

²НИ РХТУ им. Д.И. Менделеева, Новомосковск, Россия.

Склерометр был разработан с целью получения дополнительной информации о свойствах поверхностей деталей и возможности исследования повышения долговечности трибосопряжений. Склерометр предназначен для использования в измерительной технике, преимущественно при определении трибологических характеристик материалов методом царапания [5].

Ключевые слова: склерометр, индентор, маятник, тензодатчик, электронный преобразователь.

Задача предлагаемой полезной модели состоит в изменении конструкции предметного столика, которое исключит любое перемещение образца при царапании его индентором, и в изменении конструкции вала, допускающем возможность нескольких измерений на одном испытательном образце, что позволит собрать больший массив данных при склерометрическом исследовании одного образца [1]. Индентор ВК8 является индентором Роквелла, коническая часть которого в отличие от пирамидальных инденторов или инденторов имеющих грани, как инденторы Виккерса или Берковича имеет возможность проводить царапание по нескольким образцам с высокой точностью, исключая отклонения в двух плоскостях и получая результаты царапания в абсолютно одинаковых условиях [2]. Установка индентора Роквелла не требует к себе особо сложных условий при установке в склерометре, так как его коническая часть является к тому же цилиндрической и соответственно не имеет какой стороной индентор размещен к образцу для испытания.

Технический результат предлагаемой полезной модели – расширение функциональных возможностей устройства, позволяющий с большей точностью осуществлять построение необходимых диаграмм и графиков механических свойств образца в отличие от маятниково склерометра [4] и устройства для определения твердости материалов методом царапания [5].

Поставленная задача и технический результат достигаются тем, что склерометр, включающий маятник с индентором, вал маятника, пусковой и стопорный узлы, предметный столик для крепления испытываемого образца и измеритель перемещения образца, согласно полезной модели, имеет продольно-осевое отверстие в вале маятника с возможностью перемещения вдоль оси втулки маятника с заданным шагом, задаваемым микрометрическим винтом, стопорный узел фиксиру-

ет начальное положение маятника под заданными углами, а предметный столик снабжен подпружиненным стопорным шариком, и микрометрическим винтом.

Склерометр (рис. 1) представляет собой устройство маятникового типа.

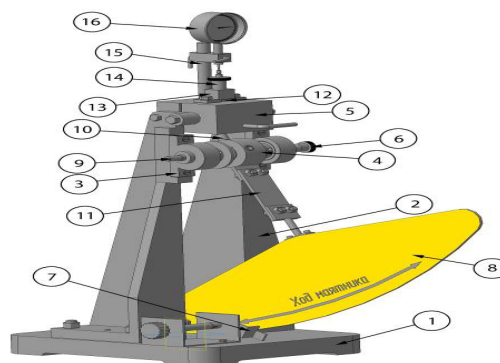


Рис. 1. Склерометр (общий вид).

1-станина, 2-стойка, 3-бугель, 4-втулка маятника, 5-предметный столик, 6-толкатель, 7- пускостопоряющее устройство, 8-маятник, 9-вал, 10-индентор. 11-упругий элемент маятника, 12-образец для испытания, 13-скоба, 14-толкатель образца, 15-стойка индикатора, 16-микрометрический индикатор.

Исполнительным элементом склерометра является индентор – твердосплавный конус от твердомера Роквелла с углом 120° . Царапина (риска) на образце образуется в следствии скользящего движения наконечника индентора, установленного во втулке маятника. Единичное царапание индентором (при склерометрических испытаниях) моделирует скольжение единичной абразивной частицы по поверхности материала (или образца материала по абразивной частице при скольжении по закрепленному абразиву).

Втулка маятника установлена на валу, опирающемся на радиально-упорные подшипники

качения, расположенные в бугелях, установленных на стойках. В вале фрезеруется продольно-осевое отверстие, позволяющее втулке маятника, в которой закреплен индентор, двигаться вдоль оси вала помощью толкателя, что дает возможность делать по несколько царапин на одном образце (рис.2). Образец для испытаний двигается в отверстие предметного столика с помощью закрепленной на столике скобы и толкателя образца с микрометрической резьбой. Величина сдвига образца измеряется с помощью микрометрического индикатора, закрепленного на стойке. Радиальное движение маятника производится с помощью пуско-стопорящего устройства, которое фиксирует маятник на определенном угле относительно испытуемого образца. Маятник оснащён упругим элементом, на котором установлены два тензорезистора, преобразующие механическое воздействие индентора на испытуемый образец в цифровой код, обрабатываемый с помощью ПЭВМ.



Рис. 2. Фото исследуемых рисок на образце стали 09Г2С.

Одним из важных факторов устранения ошибок при измерениях слабых сигналов является выбор диапазона значений измеряемого сигнала. Поскольку для измерения деформации сравниваются два сигнала, важно, чтобы их разность значительно превышала уровень шумов.

На преобразователь кроме полезного сигнала всегда, в той или иной мере, попадает шумовой сигнал. Механические колебания в объеме и на поверхности исследуемых образцов вносит дополнительные искажения в измеряемые параметры. Поэтому для корректного определения этих величин очень важно учитывать их влияние. В данной работе эта проблема была решена за счет использования дифференциальной системы подключения тензодатчиков и использования дифференциальных аналоговых входов преобразователя сигналов.

Функциональная схема прибора, выполнена в виде отдельного автономного преобразователя и связанного с компьютером посредством интерфейса передачи данных USB. В такой конфигурации прибора все узлы обработки сигналов являются универсальными. Коммутатор, усилитель сигналов, АЦП-все это расположено в корпусе преобразователя.

Используемый прибор включает в себя электронный преобразователь и систему сбора данных на базе платы LCAD E-14-140. На ней имеет-

ся 32 несимметричных или 16 дифференциальных аналоговых каналов ввода, программируемый коэффициент усиления 1, 10, 100, 1000 для каждого канала. Для создания программы существует специальная библиотека программных функций, реализующих интерфейс с платой и различные режимы измерения сигналов. Выход усилителя сигналов тензодатчиков подключен к аналоговому входу платы.

Таблица 1. Результаты обчёта осциллограмм царапания образцов (в условных единицах).

№№ п.п	Марка стали	Максимальное значение силы сопротивления	Временной промежуток царапания	Относительное значение силы сопротивления
		h	b	h/h ₀
Абсолютные значения				Относительное значение
1	09Г2С	512	0,21	0,753
2	30Х13	525	0,23	0,772
3	30Х13 (закалка ТВЧ)	680	0,32	1,0

Это дает возможность, условно разделить программу на два логических программных блока: первый производит последовательный опрос аналоговых входов и измерение сигналов; второй производит преобразование и масштабирование полученных данных и вывод их на экран ПК в виде графика зависимости от времени (табл.1).

Все это дает дополнительные возможности для проведения очень точных измерений.

Испытательное устройство (рис.1) относится к измерительной и исследовательской технике и может быть использовано при определении трибологических характеристик материалов, в частности изучения характеристик износостойкости сталей из которых изготовлены быстроизнашиваемые детали насосно-компрессорного оборудования газопромышленного оборудования.

[1] Тененбаум М.М. Склерометры для изучения сопротивления. Склерометрия, с.118 - с.134

[2] Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. В 2-х ч. Часть 2. Механические испытания. Конструкционная прочность. М.: Машиностроение, 1974. – 368с., с.84

[3] Патент 214106. «Склерометр» Сорокин Г.М., Сафонов Б.П., Лысюк А.Я., Евреинов С.И., Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, опубликовано 10.11.1999г.

[4] Патент на полезную модель 122772 «Маятниковый склерометр». Мокрицкий Б.Я., Зайцева Н.А., Огилько С.А., Солин В. И. Российская Федерация, Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, опубликовано 10.12.2012г.

[5] Свидетельство на полезную модель 28550. «Склерометр» Сафонов Б.П., Лысюк А.Я., Воробьев Ф.П., Брагин Л.П., Ишунькин Д.Г. Российская Федерация, Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, опубликовано 27.03.2003г.

СВЯЗЬ КОЭФФИЦИЕНТА СЦЕПЛЕНИЯ С ШЕРОХОВАТОСТЬЮ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПАРЫ КОЛЕСО - РЕЛЬС

Керопян А.М. (am_kerop@mail.ru), Басов Р.К.

Институт «ЭкоТех», НИТУ «МИСиС», Москва, Россия.

Выполнены теоретические и практические исследования условий взаимодействия рабочих поверхностей бандажей карьерных локомотивов с рельсами и определены рациональные значения шероховатостей при профилировании рельсов с целью сокращения продолжительности процесса приработки пары колесо – рельс, что способствует повышению коэффициента сцепления бандажей колес локомотивов с рельсом и увеличивает сроки их эффективной эксплуатации.

Ключевые слова: коэффициент трения, шероховатость поверхности рельсов и бандажей колес локомотивов, комплексный показатель шероховатости, рациональная шероховатость.

В результате экспериментальных исследований, выполненных в реальных эксплуатационных условиях, получены графические зависимости изменения коэффициента сцепления локомотива Ψ_{Π} в момент начала движения от коэффициента трения μ , измеренным по центральной части дорожки катания колеса по рельсу (рис.1) [1].

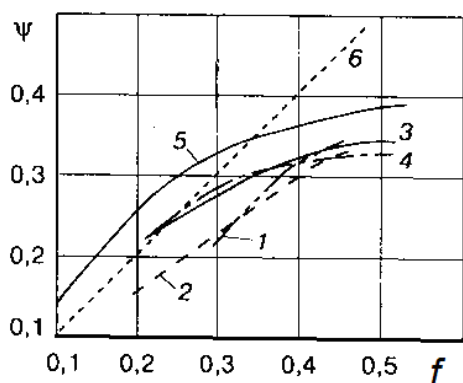


Рис.1. Связь между коэффициентами сцепления колесных пар электровозов с рельсами в момент их трогания и коэффициентом трения f , измеренным по центральной части дорожки катания колеса по рельсу: 1 – для ВЛ18; 2 – для ВЛ23; 3 – для ВЛ60; 4 – для ВЛ60к; 5 – по данным Коллинза и Причарда; 6 – линия прямой пропорциональности между f и Ψ

Анализ полученных экспериментальным путем зависимостей, представленных на рис. 1 показывает, что кривые $\Psi(f)$ для различных локомотивов по форме похожи и изменяются по параболической функции. Аналитическое выражение уравнения регрессии графиков, показанных на рис.1, имеет вид [2]

$$\Psi = af^2 + bf + c, \quad (1)$$

где a, b, c – коэффициенты, разные для различных серий электровозов. Значения коэффициентов регрессии уравнения (1) для электровозов различных серий, определенные путем экспериментальных исследований, приведены в табл. 1 [1].

Для различных серий электровозов рассчитанные таким образом значения коэффициентов трения f находятся в пределах 0,2 – 0,5 [1].

Таблица 1. Коэффициенты регрессии для испытуемых электровозов

Серия электровоза	a	b	c
ВЛ18	-3,70	3,60	-0,53
ВЛ60	-1,48	1,50	-0,04
ВЛ60 ^к			
ВЛ23	-1,67	1,51	-0,02
	-4,57	4,0	-0,489

Уравнение (1) представляет собой параболу, вершина которой определяет значение Ψ_{\max} , соответствующее определенной величине f , которая может быть найдена его дифференцированием и приравнением производной нулю.

$$(\Psi)' = \frac{d\Psi}{df} = 2af + b = 0, \quad \text{тогда}$$

$$f_{\max} = -\frac{b}{2a} \quad (2)$$

Для электровозов исследованных серий максимальные расчетные значения коэффициентов трения, рассчитанные согласно (2), приведены в табл. 2.

Таблица 2. Максимальные значения коэффициентов трения электровозов

Знач.	$f_{\text{расч}}$	$f_{1\max(\text{ВЛ18})}$	$f_{2\max(\text{ВЛ60})}$	$f_{3\max(\text{ВЛ60}^{\text{к}})}$	$f_{4\max(\text{ВЛ23})}$
Коэфф. трения	0,535	0,486	0,507	0,452	0,437
Проц. повыш.	-	9,16	5,23	15,51	18,3
Ср. зн. пов. %	11,96	-	-	-	-

Анализ результатов расчета максимальных значений коэффициентов трения, с учетом результатов исследований [2] показал, что коэффициент трения между бандажом колесной пары и рельсом **зависит от шероховатости взаимодействующих поверхностей**. При профилировании рельсов с обеспечением шероховатости $R_z 40 - 20 \text{ мкм}$ ($\sqrt{4-5}$) расчетный коэффициент трения может быть повышен до 12 % и, следовательно, коэффициент

сцепления пары колесо – рельс также может быть повышен. Для пары колесо – рельс такую шероховатость предлагается считать **рациональной**.

На рис. 2 показана полученная путем теоретических и экспериментальных исследований зависимость коэффициента трения f от комплексного показателя шероховатости поверхности Δ [2].

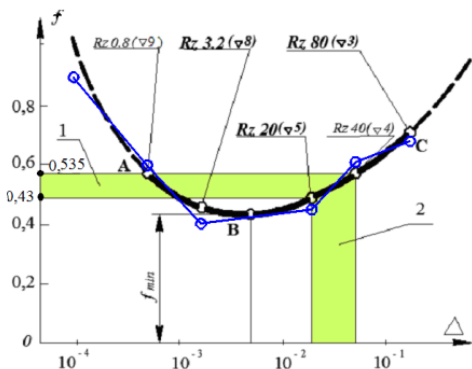


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от комплексного показателя шероховатости.

При профилировании с обеспечением конформного контакта рабочих поверхностей рельсов шероховатостью $R_z 20 - 40$ мкм, продолжительность процесса приработки пары колесо – рельс будет сокращена, что в свою очередь продлит срок эффективной эксплуатации карьерного железнодорожного транспорта [3,4].

Коэффициент сцепления локомотива в момент трогания с места железнодорожного состава, отражает исходное фрикционное состояние бандажей колес локомотива и пути и все их фрикционные особенности, и, очевидно, одним из основных параметров, характеризующих тяговую способность локомотива, т. е. коэффициент сцепления между бандажом и рельсом, является **шероховатость** их контактирующих поверхностей.

Ввиду сложности процессов, формирующих трение, в настоящее время нет пока единого мнения об его природе [5,6,7,8,9]. Наибольшее распространение получила молекулярно-механическая теория И. В. Крагельского.

Согласно этой теории, коэффициент трения твердых тел имеет две составляющие – молекулярную ($f_{\text{мол}}$), определяющуюся молекулярным взаимодействием, и деформационную ($f_{\text{деф}}$), свойства которой действием молекулярных сил ввиду сложности структуры тел пока оценивать не представляется возможным [2], а поэтому определяется с помощью специально поставленных опытов и известных уже представлений о природе вещества:

$$f = f_{\text{мол}} + f_{\text{деф}} \quad (3)$$

В связи с тем, что коэффициент трения во многом зависит от условий эксплуатации, а для карьерных локомотивов не проводились экспериментальные исследования по определению коэффициентов регрессии уравнения зависимости коэффициента сцепления от коэффициента трения, считается целесообразным провести соответствующие исследования, что позволит теоретически **спрогнозировать** ожидаемое значение коэффициента сцепления бандажей карьерных локомотивов с рельсами для реальных условий эксплуатации.

Выводы

1. Анализ результатов расчета максимальных значений коэффициентов трения, с учетом результатов исследований [2] показал, что коэффициент трения между бандажом колесной пары и рельсом **зависит от шероховатости взаимодействующих поверхностей**.

2. Установлено рациональное значение шероховатости при профилировании рельсов в пределах $R_z 40 - 20$ мкм. Это способствует **повышению коэффициента сцепления и сокращению продолжительности процесса приработки пары колесо – рельс**, что в свою очередь продлит срок эффективной эксплуатации карьерного железнодорожного транспорта.

3. Целесообразно провести экспериментальные исследования в условиях карьера тяговых агрегатов и тепловозов для определения коэффициентов в уравнении регрессии зависимости коэффициента сцепления от коэффициента трения.

[1] Лужнов Ю.М. Нанотрибология сцепления колес с рельсами. - М.: Интекст, 2009. - 176с.

[2] Керопян А.М. Развитие теории взаимодействия и обоснование рациональных параметров системы колесо-рельс карьерных локомотивов в режиме тяги.: дисс. докт. тех. наук: 05.05.06: защищена 23.12.2015/ Керопян Амбарцум Мкртичевич.– Екатеринбург, 2015. – 233 с. – Библиогр.: С.208–223.

[3] Керопян А. М., Сизин П. Е., Кряжев Н. М., Басов Р. К. Условия взаимодействия колес карьерных локомотивов с рельсами и определение рациональных геометрических параметров их контактирующих поверхностей // Горная промышленность. 2012. Июль-август. - С. 108 -110.

[4] Керопян А. М. Теоретические исследования условий обеспечения конформного контакта системы колесо – рельс карьерного железнодорожного транспорта // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013. № 2. - С. 11-16.

[5] Дерягин Б.В., Чураев Н.В., Муллер В.М. Поверхностные силы. – М., : Наука. 1987. - 380 с.

[6] Ахматов А. С. Молекулярная физика граничного трения. – М.: Изд-во физ.-мат. литературы, 1963. - 472 с.

[7] Крагельский И.В. Трение и износ. - М.: Машиностроение, 1968. - 480 с.

[8] Ребиндер П.А., Елифанов Г.И. Влияние поверхностно – активной среды на граничное трение и износ. / В сб. «Развитие теории трения и изнашивания». – М.: Изд-во АН СССР, 1957, С. 47-58.

[9] Bowden F.P., Tabor D. The friction and lubrication of solids. Oxford, 1954. p.195.

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПУТЁМ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ С УЛУЧШЕННЫМИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Клишин П.В., ¹Латышев А.П., Моисеев А.А, Юнисов И.К.

ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», Москва, Россия.
(dvigatelzil@yandex.ru)

Доклад посвящён проблеме повышения экологической безопасности современных двигателей внутреннего сгорания путём снижения мощности механических потерь, которая напрямую зависит от сил трения, возникающих в процессе работы. Улучшение технико-экономических показателей двигателей связано с качеством моторного масла, условиями работы, а также с оптимальным выбором противоизносных присадок, оказывающих минимальное влияние на окружающую среду.

Ключевые слова: экологические показатели, двигатели внутреннего сгорания, моторные масла, присадки к моторным маслам, трибологические характеристики, пары трения

Улучшение экологической обстановки, которая сложилась в большинстве городов-промышленных центров Российской Федерации, является одной из наиболее важных и значимых проблем повышения качества жизни населения.

Автотранспортные средства вносят существенный вклад в загрязнение окружающей среды. Жёсткие законодательные требования по снижению уровня выбросов являются определяющими при создании новых моделей современных поршневых двигателей. В последнее время разрабатывались и серийно выпускаются двигатели, отвечающие современным требованиям норм Евро-5, однако, имеется значительный потенциал по дальнейшему повышению их эффективности [1].

В данной работе рассмотрен только один аспект повышения экологических и технико-экономических характеристик двигателей - это применение современных моторных масел с улучшенными трибологическими свойствами.

Решение вопросов улучшения эффективных показателей двигателя являются одним из наиболее перспективных направлений их совершенствования. Повышение эффективной мощности двигателя можно рассматривать в двух направлениях, а именно: повышение индикаторной мощности двигателя, которая характеризуется степенью использования теплоты топлива для получения полезной работы, и повышение механического КПД путём снижения затрат на механические потери. Эти направления в результате приводят к снижению среднеэксплуатационного расхода топлива, улучшению экологических характеристик без снижения технических показателей мощности и крутящего момента. Как известно, затраты на механические потери складываются из трёх факторов:

- потери на трение в сопряжённых рабочих парах и механизмах двигателя;
- мощность, необходимая для обслуживания систем и механизмов двигателя, то есть вспомогательных агрегатов;

- потери мощности на процесс газообмена.

Процесс совершенствования двигателей привёл к их существенным конструктивным изменениям, которые способствовали повышению температурных режимов в системах охлаждения и смазки, выпуска отработавших газов и др. Изменения, связанные с повышением температуры деталей двигателей, меняют подход к качеству моторных масел в части наличия функциональных присадок, повышающих термостабильность масла и позволяющих ему работать на более жёстких температурных режимах длительное время без деструктивных изменений масла и снижения его эксплуатационных характеристик.

Для оценки влияния этих факторов разработаны математические модели, характеризующие зависимость характеристик граничного трения от состояния зоны фрикционного контакта. Для расчета коэффициента граничного трения использовалась его зависимость от числа Зоммерфельда, аппроксимируемая кривой Герси – Штрибека [2]. Показано, что отклонение величины зазора в трущейся паре от оптимального значения ведет к росту граничного трения и, как следствие, к снижению механического КПД двигателя. Это отклонение, с одной стороны, может быть обусловлено износом трущейся пары, а с другой – загрязнением зазора продуктами высокотемпературной деструкции масла. Была также разработана модель коррозионно – фрикционного износа, учитывающая комплексный эффект влияния продуктов деструкции масел на модуль износоустойчивости фрикционного контакта [3]. Данное воздействие обусловлено эффектом Ребиндера – адсорбционным пластифицированием трущихся поверхностей в ходе кислотной коррозии, обусловленной деструкцией масел. Характерной чертой этого эффекта также является существенная зависимость процесса от температуры.

Можно сделать вывод, что ужесточение требований к температурным условиям работы масел

привело к необходимости разработки новых марок масел и присадок. Упомянутая выше модель [2], в частности, показывает, что неправильно подобранные характеристики моторного масла (в первую очередь его вязкостно-температурные характеристики) могут привести к увеличению момента сопротивления прокручиванию коленчатого вала за счет роста граничного трения и, как следствие, снижению механического КПД двигателя.

Для исключения указанных негативных факторов важное значение имеет эффективность применяемых в маслах присадок. Необходимо отметить, что удельные показатели токсичности отработавших газов (массовые выбросы, отнесенные к единице вырабатываемой мощности) также могут ухудшаться за счет продуктов деструкции масел.

Широко применяемые присадки (противоизносные, антизадирные, антиокислительные, моющие, диспергирующие, антикоррозионные, вязкостные, депрессорные, многофункциональные и др.) сами могут являться токсичными веществами. Поэтому к их выбору необходимо относиться с большой ответственностью.

[1] Латышев А.П., Клишин П.В., Морозов Ю.Л., Юнисов И.К. Современные тенденции совершенствования двигателей внутреннего сгорания и их влияние на изменение требований к моторным топливам и маслам // *Технология нефти и газа*. – 2015. – №6. – с. 3-8.

[2] Моисеев А.А., Упрощенная математическая модель двигателя внутреннего сгорания, *H&ES Research*, №1, 2014, с 20.

[3] Моисеев А.А. Критериальная модель коррозионно - фрикционного износа, *Вестник КГТУ*, №6, 2015, с 16

ПЛАСТИЧЕСКАЯ СМАЗКА НА ОСНОВЕ РАПСОВОГО МАСЛА И ПЧЕЛИНОГО ВОСКА

Ковалёва И.Н. (innakov@tut.by), Григорьев А.Я.

Институт механики металлополимерных систем им.В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель, Беларусь.

Представлены результаты испытаний пластической смазки на основе рапсового масла с пчелиным воском. Показано, что использование исследованного консистентного смазочного материала эффективно лишь в легко нагруженных парах трения.

Ключевые слова: смазочный материал, рапсовое масло, триботехнические исследования.

Введение. В узлах трения машин и механизмов пищевой промышленности предпочтительным является использование смазочных материалов на основе растительного сырья [1]. При малых нагрузках их свойства могут быть соизмеримыми или даже лучшими чем у минеральных масел, но использование в составе таких смазок традиционных присадок невозможно. В этой связи поиск органолептически и биологически нейтральных модификаторов смазок на основе растительного масла является актуальной задачей.

Цель работы – определить триботехнические характеристик смазочного материала на основе рапсового масла и пчелиного воска

Результаты исследований. Смазочный материал готовился на основе рапсового рафинированного и дезодорированного пищевого масла (ГОСТ-Р 53457-2009), представляющего собой смесь олеиновой (50-60% об.), линолевой (15-25% об.), линоленовой (10-15% об.) и ряд других жирных кислот с общим содержанием 5-10% об.

В качестве загустителя использовался экстракционный пчелиный воск (ГОСТ-Р 52098-2003). Для приготовления смазки воск растворялся в бензине (НЕФРАС, ГОСТ 8505-80) в соотношении 1:5 по весу. Раствор постепенно добавлялся в нагретое до 60-65°C рапсовое масло до концентрации воска 10% мас. при постоянном перемешивании до полного испарения растворителя.

В ходе триботехнических испытаний сравнивались коэффициенты трения и износ пар трения сталь (ШХ15) по бронзе (М1Е), истираемых в чистом рапсовом масле и его смеси с пчелиным воском. Испытания проводились на возвратно-поступательном трибometре МТУ-2К7 [2] по схеме сфера ($d=4,7$ мм)/плоскость ($Ra 0,72$; рис.1 б) при скорости 2,5 мм/с и длине хода 10 мм.

На рис. 1 представлены полученные экспериментальные данные.

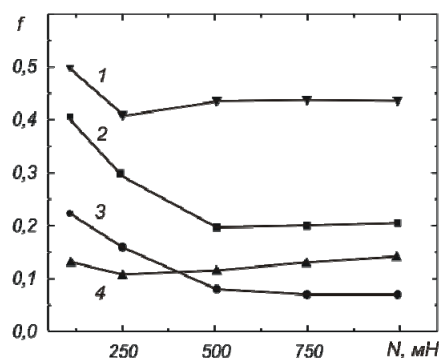


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от нагрузки:

1 – трение без смазки; 2 – смазка индустриальным маслом И20А; 3 – смазка рапсовым маслом; 4 – смазка рапсовым маслом с пчелиным воском.

Как можно видеть, и чистое и модифицированное воском рапсовое масло характеризуются существенно меньшими значениями коэффициентов трения по сравнению с контрольным экспе-

риментом, проведенным при трении исследуемой пары как без смазочного материала, так и со смазкой индустриальным маслом И-20А.

Смазка с пчелиным воском показала несколько худшие результаты по сравнению с трением в среде чистого рапсового масла. С увеличением нагрузки коэффициент трения смазки с пчелиным воском возрастает. Причиной такого поведения может являться способность воска при повышении температуры реагировать с солями жесткости воды и оксидами металлов [3].

Заключение Использование консистентного смазочного материала на основе рапсового масла и пчелиного воска эффективно лишь в легко нагруженных парах трения.

КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИСАДКИ ФОСФОРОМОЛИБДАТА КОБАЛЬТА С ПОВЕРХНОСТЬЮ МЕТАЛЛА

¹Колесников В.И., ²Мигаль Ю.Ф. (ymigal@mail.ru), ¹Савенкова М.А., ¹Колесников И.В.

¹Ростовский государственный университет путей сообщения, Ростов-на-Дону, Россия;

²Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия.

Фосфоромолибдат кобальта (II), введенный в смазочное масло, позволяет эффективно формировать защитные слои антифрикционных пленок вторичных структур, повышать стабильность смазочной пленки и ее триботехнические характеристики. Квантово-химические расчеты показали, что смазочное действие фосфоромолибдата кобальта (II) обусловлено изменением структуры молекул этого соединения при сближении с металлической поверхностью.

Ключевые слова: неорганические присадки, смазочные материалы, износостойкость.

Традиционно в качестве присадок к смазочным материалам (СМ) используют органические соединения, которые в процессе трения могут разлагаться, инициируя деструктивные процессы в нефтяной масляной основе. Опыт показывает, что более работоспособными являются неорганические соединения, обладающие высокой термо- и химической стабильностью. К таким соединениям относятся полимерные гетерофосфаты, которые устойчивы в широком температурном диапазоне и совместимы с дисперсионной средой пластичных смазочных материалов [1,2].

В данной работе в качестве присадок рассматриваются фосфоромолибдаты, характерными особенностями которых являются лабильность анионной структуры, способность находиться в зависимости от условий в кристаллическом или аморфном состояниях. Эти и другие особенности позволяют целенаправленно изменять свойства данных соединений и оптимизировать их для применения в СМ.

Проведенные нами ранее исследования показали, что фосфоромолибдаты щелочных металлов и никеля улучшают триботехнические характеристики СМ, пролонгированно сохраняют их физико-химические и эксплуатационные свойства, защищают металлические поверхности от износа.

Работа выполнена при финансовой поддержке БРФФИ и ГКНТ Беларуси (номер проекта Т15ЛИТ-027).

[1] Крагельский И.В., Михин Н.М. Узлы трения машиностроения. – М.:Машиностроение. – 1984

[2] Григорьев А.Я., Гуцев Д.М., Зозуля А.П. и др. Возвратно-поступательный миллитрибометр МТУ-2К7 // Трение и износ. – 2014 (35), № 6, 664-669

[3] Блинов К.Ф. Воск пчелиный // Ботанико-фармакогностический словарь: Справ. пособие / Под ред. К. Ф. Блиновой, Г. П. Яковлева. — М.: Высш. шк. - 1990

Квантово-химический анализ [2] позволил определить энергию взаимодействия молекул этих соединений с поверхностью железа и установить, что при адсорбции таких присадок возникает достаточно прочная ковалентная связь между молекулами присадок и металлической поверхностью. Естественно ожидать, что другие соединения из группы фосфоромолибдатов также могут оказаться эффективными присадками к СМ.

Целью данной работы является исследование свойств новой многофункциональной пластичной смазки, в которой в качестве присадки используется *фосфоромолибдат кобальта*.

Проведенные нами расчеты показали возможность существования в свободном виде кольцевых тетраметафосфатов состава $2\text{Co}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$. В расчетах использовался пакет программ ADF, основанный на приближении DFT. На рис. 1 представлена структура соединения $2\text{Co}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$. Это циклическое соединение с точечной симметрией C_4 . Его молекула состоит из связанных между собой четырех атомных тетраэдров PO_4 , четырех атомных тетраэдров MoO_4 и двух мостиковых атомов Co.

При сближении с поверхностью железа молекула приобретает заряд $q=2e$ и затем перестраивается. В соответствии с энергетической диаграммой

этапы в изменении структуры молекулы можно представить следующим образом.

1) получение заряда $2e$ от поверхности:
 $2\text{Co}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3 + 2e \rightarrow [2\text{Co}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3]^{2-}$;

2) распад на две одинаковые линейные цепочки $\text{Co}(\text{PO}_3)_2 \cdot 2\text{MoO}_3$ (каждая с заряженным радикалом PO_3^- на одном из концов):
 $[2\text{Co}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3]^{2-} \rightarrow 2[\text{Co}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3]^-$;

3) захват линейными цепочками двух атомов кислорода из распавшейся молекулы кислорода:
 $\text{O}_2 \rightarrow 2\text{O}$, и переход цепочек в новую форму
 $2[\text{Co}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3]^- + 2\text{O} + 2e \rightarrow 2[\text{Co}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3 \cdot \text{O}]^{2-}$.

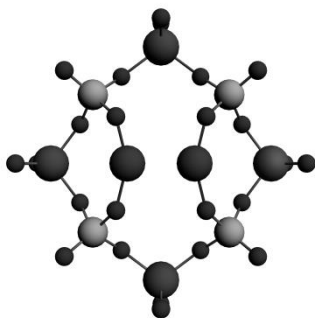


Рис. 1. Структура соединения $2\text{Co}(\text{PO}_3)_2 \cdot 4\text{MoO}_3$

Эти процессы могут протекать как последовательно, так и параллельно. При этом происходит понижение энергии системы на 22 эВ. Часть выделяющейся энергии идет на распад молекулы кислорода. С использованием приближений, принятых в данной работе, энергия, необходимая для распада молекулы O_2 , равна 5,2 эВ. Таким обра-

зом, общее выделение энергии в расчете на одну исходную молекулу составляет ~ 17 эВ.

В результате этих процессов у поверхности железа вместо исходной циклической молекулы образуются две радикальные цепочки, которые затем адсорбируются на поверхности железа. На рис. 2 показана модель, которая использовалась для расчетов. Поверхность железа имитируется бесконечной трехслойной пластиной, состоящей из атомов Fe. Рассматривается грань (001) объемно-центрированной решетки, характерной для железа при низких и средних температурах. Адсорбированная цепочка моделируется концевой группой MoO_4 или PO_4 . Атомы O, ближайšie к поверхности, в обоих случаях находятся над ребрами ячеек.

Из рис. 2 видно, что расположение атомов железа в верхнем слое немного изменяется вследствие возникновения ковалентной связи между адсорбатом и адсорбентом. Для оценки прочности связи цепочек с поверхностью оценивалась энергия, необходимая для распада системы. Рассматривались два варианта распада: 1) на исходные фрагменты (цепочки + поверхность), с энергией распада E_1 и 2) с вырыванием из пленки части атомов Fe, ближайших к адсорбату, с энергией распада E_2 . Энергия, необходимая для распада, вычислялась по формуле:

$$E_{\text{ad}} = E_{\text{tot}} - E_{\text{Fe}} - E_{\text{PW}},$$

где E_{tot} – энергия адсорбционного комплекса, включающего слои железа и концевые группы адсорбированных молекул, E_{Fe} – энергия трех слоев железа, E_{PW} – совокупная энергия концевых групп молекул.

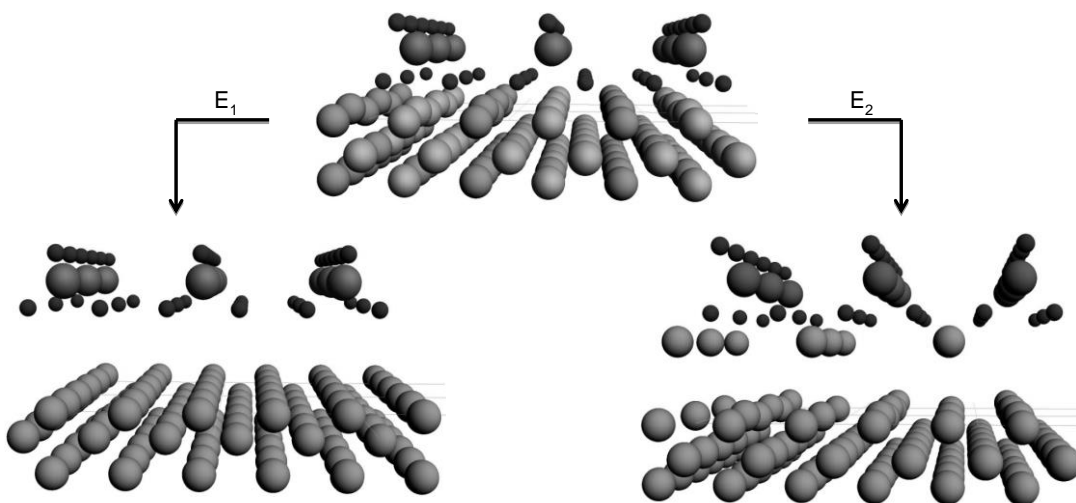


Рис. 2. Два варианта распада адсорбционного комплекса, состоящего из концевых групп адсорбированных молекул и трех слоев поверхности металла. Во втором варианте кроме адсорбированных молекул отрывается также часть атомов металла.

В табл. 1 представлены значения энергии E_1 и E_2 (в расчете на ячейку), необходимые для распада адсорбционных комплексов на отдельные фрагменты.

Таблица 1. Энергии, необходимые для распада адсорбционных комплексов на отдельные фрагменты.

Энергия, эВ	Адсорбированная группа	
	MoO ₄	PO ₄
E_1	6.4	7.0
E_2	3.0	4.0

Из этих данных следует, что при интенсивном силовом воздействии более вероятно разрушение комплексов с вырыванием атомов Fe.

Триботехнические испытания на износостойкость стальных образцов в вазелиновом масле с 3% присадкой фосфомолибдата кобальта показали уменьшение пятна износа в 1,5 раза.

Исследование выполнено в рамках реализации Государственного задания на 2016 г. № 007-01114-16 ПР (проект 0256-2015-0074) и при поддержке РФФИ (грант 16-08-00264-а).

[1] Колесников В. И., Савенкова М. А., Булгаревич С. Б., Челохьян А. В., Булавина Е. А., Бойко М. В. Исследование фрикционных характеристик пластичных железнодорожных смазок с неорганическими полимерами в качестве присадок // Трение и износ. – 2008 (29), №3, 261-267

[2] Колесников В. И., Мигаль Ю. Ф., Савенкова М. А., Мижирицкая С. Н. Адсорбция гетерополифосфатов щелочных металлов на поверхности железа // Трение и износ. – 2011 (30), №6, 556-563

О РОЛИ ЗЕРНОГРАНИЧНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ И ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ

Колубаев А.В. (kav@ispms.tsc.ru), Сизова О.В., Заикина А.А., Иванов К.В., Филиппов А.В., Колубаев Е.А., Псахье С.Г.

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия;

Проведён сравнительный металлографический анализ формирования микроструктуры металла при трении скольжения и сварке трением с перемешиванием. На примере сварного соединения алюминиевого сплава, полученного методом сварки трением с перемешиванием, показано, что микроструктура шва имеет все признаки деформированного слоя металла, образованного в результате трения скольжения.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием, трение скольжения, микроструктура, размер зерна, фрагментация, рекристаллизация.

Среди современных интенсивно развивающихся технологий, направленных на разработку эффективных методов соединения отдельных деталей между собой, наиболее перспективной считается сварка трением с перемешиванием (СТП).

При сварке трением с перемешиванием фрикционный нагрев пластифицирует металл в зоне вращения инструмента, вызывая сложные структурные превращения. Несмотря на кажущуюся простоту процесса СТП, многие его аспекты остаются невыясненными. В ряде публикаций, посвященных анализу процесса формирования микроструктуры при СТП, сравнивают этот процесс с металлообработкой, этапами которой являются – предварительный нагрев, начальная деформация, экструзия, ковка и охлаждение [1]. Хотя при этом и были выявлены общие черты формирования структуры сварного шва и структур металлов после механической обработки, но приведенные результаты не смогли объяснить уникальность образующихся микроструктур и текстур при СТП.

Ранее было показано [2], что в процессе сварки трением с перемешиванием имеет место эволюция исходной структуры, заключающаяся в стадийном переходе от крупнозернистой структуры к мелкозернистой, с постепенным увеличением угла разориентировки границ зерен/субзерен и превра-

щением их в ядре сварного шва в рекристаллизованные зерна. Такой сценарий развития микроструктуры в прилегающих к инструменту областях металла тесно связан с высокой температурой при больших пластических деформациях и может быть рассмотрен на основе представлений о ротационных процессах, имеющих место при трении скольжения [3]. Этому способствует наличие большеугловых границ фрагментов, структура которых при больших пластических деформациях по представлениям Ке [4] становится подобной жидкости, т.е. аморфной.

В данной работе проведены сравнительные исследования особенностей формирования структуры ядра сварного шва, полученного сваркой трением с перемешиванием пластин алюминиево-магниевого сплава, и структур, образующихся при трении скольжения.

Материалом для исследования служил промышленный алюминиево-магниевый сплав марки АМг5М в виде пластин толщиной 5,0 и 8,0 мм. Сварка трением с перемешиванием проводилась на предприятии «Сеспель». Металлографические шлифы были приготовлены методом последовательного шлифования, полирования с использованием алмазных и оксидных суспензий и последующего электролитического полирования. Ме-

таллографические исследования проводили с использованием оптических микроскопов Neophot-32 и LEXT-OLS4000. Исследования тонких фольг, полученных из металла вблизи корня сварного шва, проводили на просвечивающем электронном микроскопе JEM2100 при ускоряющем напряжении 200 кВ. Изучали дислокационную структуру и оценивали состояние границ зерен и размер зерна. Триботехнические испытания проводили на образцах, размером $3 \times 3 \times 8$ мм³, вырезанных из сплава АМг5М толщиной 5,0 мм электроискровым способом, на трибометре TRIBOtester (Франция). Режим испытаний: нагрузка - 18Н, путь трения составил 1080 метров. Образец прижимался к контртелу из быстрорежущей стали, совершая движение по окружности с линейной скоростью 0,1 м/с при комнатной температуре.

Для выявления общих закономерностей формирования зеренной структуры были проведены прямые структурные исследования и сравнительный анализ размеров зерна металла исходных пластин, в зоне ядра сварного соединения и в поверхностном слое после испытаний на трение скольжения. Полученные результаты металлографического структурного анализа показали, что при сварке пластин алюминиевого сплава разной толщины в ядре сварного шва формируется ультрамелкозернистая структура с размером зерен $5,3 \pm 1,6$ мкм. Границы зерен в разной степени декорированы выделениями твердых частиц. По сравнению с исходной структурой сплава средний размер зерна уменьшился в 4 – 5 раз.

Для определения угла разориентировки зерен в этой зоне сварного шва применили метод EBSD анализа, позволяющий определить углы ориентации с точностью $\sim 2^\circ$. По данным EBSD анализа средний размер зерна в этой зоне сварного шва составил 4,7 мкм (рис. 1), что хорошо согласуется с результатами оптической металлографии. Из обратной полюсной фигуры было установлено, что большинство границ зерен являются большеугловыми, что характерно для рекристаллизованных структур. В результате статистического анализа EBSD карт было показано, что доля границ с малыми углами разориентировки (малоугловые границы) составила примерно 15% от общего числа границ, что позволяет заключить, что данная структура сформирована главным образом равноосными зернами с большеугловыми границами.

Исследование методом просвечивающей электронной микроскопии фольги, полученной в области ядра шва, подтвердило результаты EBSD анализа о формировании рекристаллизованной структуры. Размер фрагментов, выделяющихся при наблюдении в темном поле, хорошо коррелирует с размером зерна, определенного методами оптической металлографии и EBSD анализа. Дислокационные скопления внутри зерен не наблюдаются, отдельные дислокации располагаются вблизи границ и на дисперсных частицах, размером 50-500 нм, расположенных в теле зерна.

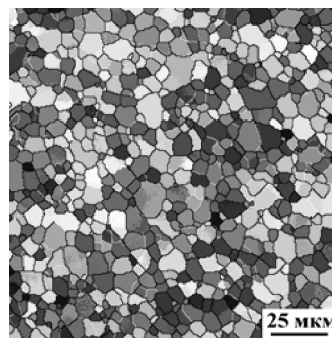


Рис. 1. Обратная полюсная фигура металла в ядре сварного соединения.

Результаты испытаний на трение скольжения показали, что процесс трения происходил в режиме адгезионного взаимодействия со средним коэффициентом трения 0,3-0,4. После 3 часов испытаний у образцов сформировался сильно деформированный поверхностный слой толщиной $\sim 30 - 40$ мкм. Механизм образования таких поверхностных слоев при трении рассмотрен в работе [3] и объясняется формированием в них полос локализованного сдвига с нанокристаллической структурой вследствие высокой степени деформации материала. Подобные следы скольжения имеют место в сварном шве материала при СТП при формировании т.н. «луковичной структуры» [5]

При исследовании тонкой структуры деформированного при трении поверхностного слоя методом EBSD-анализа была выявлена неоднородная по глубине микроструктура сплава (рис. 2).

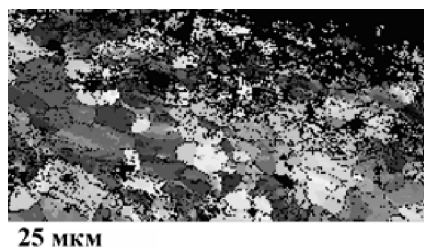


Рис. 2. EBSD – карта деформированного слоя.

Видно, что вблизи поверхности трения наблюдается слой глубиной до 15 мкм, в котором данные EBSD-анализа получить не удастся. Обычно это свидетельствует либо об очень мелкой зеренной структуре, либо об уменьшении упорядоченности по сравнению с кристаллом [6]. Можно предположить, что подобное мелкое зерно является результатом незавершенной динамической рекристаллизации, имевшей место вследствие кратковременного нагрева и деформирования металла в поверхностном слое при трении

Приведенные выше результаты исследования ясно показывают действие одного и того же механизма формирования структуры материала в процессах сварки трением с перемешиванием и трения скольжения. На макроуровне – это образование слоистой структуры деформированного слоя, толщина которого зависит от величины приложенного напряжения и температуры в зоне воздействия инструмента или контртела. На микро-

уровне - формирование высокодисперсных структур, predeterminedенных ротационным характером пластического деформирования исходного металла.

Работа выполнена по Программе фундаментальных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы. Структурные исследования проведены на оборудовании центра «Нанотех» в ИФПМ СО РАН.

- [1] Mishra R. S. and Ma Z. Y. Friction Stir Welding and Processing // Material Science and Engineering: R. – 2005,(50), Issue 1–2, 1–78
[2] Zhang H., Wang M., Zhou W., Zhang X., Zhu Z., Yu T., Yang G.. Microstructure–property characteristics of a novel non-weld-

thinning friction stir welding process of aluminum alloys // Materials & Design. – 2015, (86), № 5, December 2015, 379–387

[3] Tarasov S.Yu., Kolubaev A.V. Generation of Shear Bands in Subsurface Layers of Metals in Sliding // Physics of the Solid State. – 2008, (50), No. 5, 844–847.

[4] Ke T.S. Grain Boundary Model and the Mechanism of Viscous Intercrystalline // Journal of Applied Physics - 1949, (20) No 3, 274–280

[5] Kumar N., Mishra R.S., Huskamp G.S., Sankatan S.S.. Microstructure and mechanical behavior of friction stir processed ultrafine grained Al-Mg-Sc alloys // Material Science and Engineering: A. – 2011, (528) Issue 18, 5883–5887

[6] Mott N. F., Slip at Grain Boundaries and Grain Growth of Metals // Proc. Phys. Soc. (London). – 1948, (60) No 4, 391–394.

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ

^{1,2}Колубаев Е.А. (eaak@ispms.ru), ^{1,2}Рубцов В.Е., ¹Фортуна С.В., ¹Елисеев А.А.,
¹Калашникова Т.А., ^{1,2}Колубаев А.В.

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия.

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия.

В данной работе исследуется влияние ультразвукового воздействия на эволюцию структурно-фазового состояния алюминиевого сплава Д16 в процессе сварки трением с перемешиванием. Исследование проводилось методами растровой электронной микроскопии. Проанализированы такие характеристики частиц вторичных фаз, как объемная доля и средний размер. Сделан вывод, что приложение ультразвука способствует росту частиц и увеличению их объемной доли.

Ключевые слова: сварка трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием, вторичные фазы, алюминиевый сплав.

Введение

Сварка трением с перемешиванием (СТП) – метод получения неразъемных соединений в твердой фазе. Метод основан на фрикционном нагреве материала заготовки до пластичного состояния и последующем механическом перемешивании под давлением [1]. Данный способ позволяет получать неразъемные соединения из дисперсно упрочняемых алюминиевых сплавов, не свариваемых традиционными методами сварки [2], в связи с чем СТП становится всё более востребованной в промышленности. У метода есть свои недостатки: специфически дефекты и разупрочнение материала шва вследствие изменения структурно-фазового состояния [3,4]. Одним из возможных путей устранения недостатков метода является модификация путём приложения ультразвукового воздействия к заготовке в процессе СТП [5]. Новый метод сварки трением с перемешиванием с ультразвуковым воздействием (СТП-УЗ) также становится популярным, но требует тщательных научных изысканий, особенно на предмет эволюции структурно-фазового состояния.

Материалы и методы

При проведении исследований использованы образцы СТП и СТП-УЗ соединений из листового

проката сплавов Д16, толщиной 10мм, изготовленные на лабораторном стенде для экспериментальных исследований технологических режимов сварки трением с перемешиванием и ультразвуковым воздействием.

Для проведения исследований структурных характеристик использовались методы растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Подготовка образцов для РЭМ исследований проводилась с помощью шлифовально-полировальной машины Saphir 320. Исследования проводились на поперечных полированных шлифах. РЭМ исследования проводились при помощи растрового электронного микроскопа Microtrac Semtrac при ускоряющем напряжении 20 кВ и увеличениях 50 – 1000 крат в режимах дифракции обратно отраженных электронов (EBSD) и дифракции вторичных электронов (SEM). При проведении РЭМ исследований определялся элементный состав интересующих областей объектов исследования методом рентгено-флуоресцентного спектрального микроанализа.

Результаты и обсуждение

СТП и СТП-УЗ соединения можно разделить на зоны перемешивания (ЗП), термомеханического влияния (ЗТМВ) и термического влияния (ЗТВ),

каждая из которых обладает своей структурой. В ходе РЭМ исследования образцов СТП и СТП-УЗ соединений в этих зонах были обнаружены некогерентные частицы вторичных фаз различных форм, размеров и химических составов. Визуально характер распределения частиц вторичных фаз выглядел схоже в случае СТП и СТП-УЗ соединений в аналогичных зонах, однако количественная оценка таких характеристик, как объемная доля частиц вторичных фаз и их средний размер, позволяет обнаружить закономерность и оценить влияние ультразвукового воздействия на изменение структурно-фазового состояния в неразъемных соединениях.

Процесс сварки трением с перемешиванием приводит к существенному уменьшению среднего размера частиц вторичных фаз в зоне перемешивания соединений обоих типов по сравнению с исходным материалом, при этом объемная доля частиц вторичных фаз в зоне перемешивания СТП соединения остается неизменной относительно основного металла. Наложение ультразвукового воздействия приводит к увеличению объемной доли в зоне перемешивания СТП-УЗ соединения. Подобная трансформация характеристик распределения вторичных фаз возможна только в случае частичного или полного растворения частиц вторичных фаз в процессе сварки трением с перемешиванием с последующим выпадением (третичным) избыточных фаз после процесса СТП в результате распада (старения) пересыщенного твердого раствора. Очевидно, что в зонах термомеханического воздействия и термического влияния соединений обоих типов условия для растворения вторичных фаз достигаются только для самых мелких частиц по причине отсутствия непосредственного воздействия от рабочего инструмента и интенсивного отвода тепла в основной металл и удерживающие устройства рабочего стола станда. Таким образом, в зонах термического влияния и термомеханического воздействия СТП соединения за счет растворения мелких частиц вторичных фаз и последующего третичного выпадения из пересыщенного твердого раствора еще более мелких частиц, уменьшается объемная доля при одновременном незначительном уменьшении среднего размера частиц избыточных фаз. Иной отклик материала наблюдается в зонах термического влияния и термомеханического воздействия на наложение ультразвукового воздействия на процесс сварки трением с перемешиванием. Так, снижение объемной доли более чем в 1,6 раза при одновременном незначительном увеличении среднего размера частиц вторичных фаз в зоне термического влияния свидетельствует о том, что произошло полное растворение только мелких вторичных частиц в твердом

растворе, а последующее старение пересыщенного твердого раствора с выпадением мелкодисперсных вторичных частиц не реализовалось. В зоне же термомеханического воздействия наблюдается существенный прирост как объемной доли, так и среднего размера избыточных вторичных фаз. Очевидно, что ультразвуковое воздействие интенсифицировало не только растворение мелких вторичных частиц с последующим выпадением избыточных фаз из пересыщенного твердого раствора, но и рост вновь выпавших частиц вторичных фаз.

Наглядной иллюстрацией и подтверждением факта фазовых превращений с растворением частиц вторичных фаз в структурных зонах влияния сварки трением с перемешиванием являются результаты элементного микроанализа. Анализируемые частицы имели сложную структуру, а отдельные её составляющие были обогащены различными легирующими элементами. Твердый раствор в непосредственной близости от анализируемой частицы локально обеднен по всем легирующим и примесным элементам, а твердый раствор вдали от каких-либо выделений находился в пересыщенном состоянии.

Выводы

Модификация метода СТП путем приложения ультразвукового воздействия к заготовке влияет на изменение структурно-фазового состояния дисперсно упрочняемого сплава Д16, что не может не отразиться на его прочности. В данной работе установлено, что в СТП-УЗ соединениях значение объемной доли некогерентных частиц вторичных фаз, как правило, выше, чем в СТП соединении, что справедливо для всех структурных зон. Изменение же среднего размера частиц вторичных фаз пренебрежимо мало, за исключением зоны термомеханического влияния, в которой ультразвуковое воздействие способствует росту частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (идентификатор проекта RFMEF157814X0045).

- [1] Mishra R.S., De P.S., Kumar N. Friction stir welding and Processing. Springer International Publishing Switzerland: Material Science Engineering, 2014, – 338 p
- [2] L.F. Mondolfo, Aluminum alloys: structure and properties, Butterworth, London-Boston, 1976.
- [3] E.Bousquet, A. Poulon-Quintin, M. Puiggali, O. Devos, M. Touzet, Relationship between microstructure, microhardness and corrosion sensitivity of an AA 2024-T3 friction stir welded joint // Corros. Sci. – 2011 (53), 3026-3034.
- [4] A. A. Eliseev, T. A. Kalashnikova, S. Yu. Tarasov, V. E. Rubtsov, S. V. Fortuna, E. A. Kolubaev Microstructure of Fixed Butt Joints Formed by Friction Stir Welding on 2024T3 Aluminum Alloy // Key Engineering Materials. – 2016, vol. 683, 203 – 208.
- [5] S. Amini, M. R. Amiri, Study of ultrasonic vibrations effect on friction stir welding // Int J Adv Manuf Technol. 2014 (73), 127-135.

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОТИВОИЗНОСНЫХ СВОЙСТВ РЕАКТИВНЫХ ТОПЛИВ В УСЛОВИЯХ КОМБИНИРОВАННОГО ТРЕНИЯ В ПАРЕ «ШАР-ЦИЛИНДР»

Кондратенко В.В. (vvk2516@yandex.ru), Сузиков В.В.,
Никитин И.М., Прокопцова М.Д.

ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России», Москва, Россия.

Представлена принципиальная схема лабораторной установки для оценки противоизносных свойств реактивных топлив, в котором реализуется режим комбинированного трения в паре «шар-цилиндр», смазываемой испытуемым топливом. Лабораторная установка позволит проводить испытания в широком диапазоне изменения режимных параметров, что повысит достоверность получаемой оценки противоизносных свойств реактивных топлив.

Ключевые слова: реактивное топливо, смазывающая способность, противоизносная присадка.

Противоизносные свойства реактивных топлив являются одним из основных факторов, определяющих эксплуатационную надежность топливных насосов авиационных газотурбинных двигателей (ГТД).

Топлива для реактивных двигателей, вырабатываемые с использованием различных процессов нефтепереработки, могут существенно различаться по уровню противоизносных свойств. Низкий уровень противоизносных свойств топлив приводит к уменьшению ресурса агрегатов топливных систем ГТД. Наиболее высоким уровнем противоизносных свойств обладают топлива на основе прямогонных керосиновых фракций, в то время как керосиновые фракции, получаемые с использованием гидрогенизационных процессов нефтепереработки, характеризуются неудовлетворительными противоизносными свойствами [1].

Косвенно о противоизносных свойствах реактивного топлива можно судить по его вязкости и

кислотности. Однако более достоверны стендовые и лабораторные методы оценки смазывающей способности топлива, моделирующие трибологические процессы в парах трения насосов.

Одним из таких методов является метод оценки противоизносных свойств реактивных топлив на установке ПСТ-2, который применяется при квалификационных испытаниях с целью допуска новых и модернизированных образцов топлив для реактивных двигателей в авиационной технике. Опыт применения установки ПСТ-2 выявил ряд его конструктивных недостатков. На основе их анализа была разработана новая лабораторная установка ПСТ-3, в которой реализован режим трения качения с проскальзыванием пары трения «шар-цилиндр». Принципиальная схема новой лабораторной установки для оценки противоизносных свойств топлив для реактивных двигателей представлена на рисунке 1.

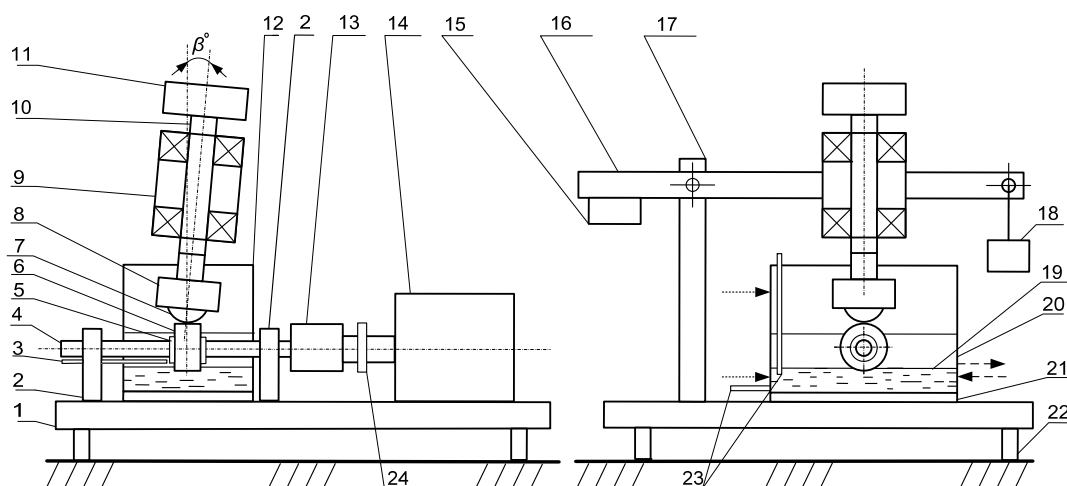


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторной установки для оценки противоизносных свойств топлив для реактивных двигателей:

- 1 – платформа; 2 – опоры; 3 – микрометр; 4 – вал; 5 – узел крепления кольца к валу; 6 – цилиндр;
- 7 – шар; 8 – оправка; 9 – корпус подшипников; 10 – вал оправки; 11 – система торможения оправки;
- 12 – крышка топливного резервуара; 13 – соединительная муфта; 14 – электродвигатель; 15 – противовес; 16 – коромысло; 17 – стойка;
- 18 – груз; 19 – топливо; 20 – топливный резервуар; 21 – подставка; 22 – регулируемые опоры платформы; 23 – терморпары;
- 24 – измеритель крутящего момента.

Сущность метода заключается в оценке влияния топлива на износ сферического образца при его качении с проскальзыванием по цилиндрическому образцу.

При испытании к цилиндру 6, погруженному в испытываемое топливо 19 с заданной температурой и относительной влажностью и вращающемуся вокруг горизонтальной оси, прижимается с постоянным усилием шар 7, закрепленный в оправке 8, свободно вращающейся вокруг своей оси. Оси вращения оправки с шаром 7 и цилиндром 6 лежат в одной вертикальной плоскости, причем ось вращения оправки 8 в этой плоскости имеет отклонение от вертикали на угол β . Благодаря этому создается крутящий момент, приводящий во вращение оправку и обеспечивающий качение шара по наружной поверхности цилиндра 6. Оправка 8 периодически притормаживается с заданным тормозным моментом, благодаря чему между шаром 7 и цилиндром 6 создается режим трения качения с проскальзыванием. Оценочным показателем противоизносных свойств испытываемого топлива явля-

ется площадь пятна износа шара и изменение частоты вращения оправки с шаром при трении качения и качения с проскальзыванием.

Таким образом, конструкция установки позволяет приблизить условия испытания (контактное напряжение, скорость качения, коэффициент проскальзывания, температура испытываемого топлива) к условиям работы плунжерных топливных насосов авиационных двигателей, в которых на переходных режимах работы двигателя перемещение плунжеров по наклонной шайбе сопровождается проскальзыванием [1,2].

Новая лабораторная установка позволит проводить испытания в широком диапазоне изменения режимных параметров, что повысит достоверность получаемой оценки противоизносных свойств реактивных топлив.

[1] Трение и изнашивание металлов в углеводородных жидкостях /Под. ред. Аксенов А.Ф.. - М.: «Машиностроение», 1977. - 8 с.

[2] Диагностика авиационных и гидравлических агрегатов /Под. ред. Лозовский В.Н.. - М.: Транспорт, 1979.- 60с.

ОЦЕНКА МЕХАНИЗМОВ ИЗНАШИВАНИЯ ЭЛАСТОМЕРНОГО УПЛОТНИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ГЕРМЕТИЗАТОРА КОЛТЮБИНГОВОЙ УСТАНОВКИ

¹Копченков В.Г. (kopchenkov2@rambler.ru), ¹Мацко А.В.

¹Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия.

Выполнены экспериментальные исследования поверхности трения уплотнительных элементов колтюбинговых установок. Для исследований применялись оптический и атомно-силовой микроскопы. В результате анализа изображений поверхностей безмуфтовых длинномерных труб была определена среднестатистическая шероховатость и ее вид. Приведены топографии поверхностей изношенных уплотнительных элементов. Установлено наличие нескольких механизмов изнашивания, встречающихся на поверхности трения уплотнителя. Это абразивный, усталостный и фрикционный.

Ключевые слова: колтюбинговые технологии, безмуфтовая длинномерная труба, герметизатор устья скважины, уплотнительный элемент, износ резин, трение, вид изнашивания, механизм истирания.

Введение. Среди современных проблем добывающих предприятий нефтегазового комплекса России можно выделить геологические, технологические и экономические [1]. К наиболее значимым проблемам технологического характера можно отнести высокую степень интенсивности изнашивания оборудования, в частности, уплотнительного элемента герметизатора устья скважины колтюбинговой установки, который обеспечивает необходимую герметичность межтрубного пространства в ходе возвратно-поступательного движения безмуфтовой длинномерной трубы (БДТ).

В процессе эксплуатации резиновый уплотнитель подвергается воздействию большого числа факторов, приводящих к быстрой потере им работоспособности, что может повлечь за собой нарушение технологического процесса и экономиче-

ские издержки. Важно определить механизм изнашивания, потому что в зависимости от механизма изнашивания физико-механические свойства резин различным образом влияют на износостойкость.

Материалы и методы. Определение механизма изнашивания выполнялось через фиксацию топографии поверхности трения. Следует отметить, что подобные исследования поверхности трения уплотнителей колтюбинговых установок в нашей стране не проводились.

Для изучения образцов БДТ и нескольких изношенных уплотнительных элементов использовался оптический микроскоп IM7200 и электронный атомно-силовой микроскоп «ЛАЙФ». Проведены исследования участка БДТ, эксплуатируемой в течение года и выполняющей технологические

операции по интенсификации призабойной зоны пласта глинокислотными растворами.

Результаты и их обсуждение Шероховатость трубы в результате эксплуатации в агрессивных жидкостях изменяется. Исследования значительного количества образцов труб дали среднестатистическую эксплуатационную шероховатость $R_z=101$ мкм, т.е труба имеет сравнительно окатанную поверхность.

Анализ изношенных образцов уплотнителя показал, что изнашивание идет с образованием продольных полос совпадающих с направлением движения трубы, каверн различной глубины и размеров, трещин перпендикулярных направлению действия силы трения, а так же специфического гребенчатого микрорельефа.

На основе анализа изношенных поверхностей уплотнителя выделены три вида изнашивания: усталостный, абразивный и фрикционный.

Пока еще недостаточно решенным вопросом является выбор критерия перехода от преобладающего влияния одного вида износа к другому.

Усталостный износ реализуется когда единственный акт касания с достаточно окатанными неровностями поверхности трубы не может вызвать мгновенного разрушения, так как концентрация напряжений относительно невелика, и усилия, характерные для однократного разрушения, не достигаются [2].

Абразивный износ, в определенной степени, встречается на всех образцах. В роли абразивных частиц здесь выступают песчинки поднятые с забоя на трубе, в особенности во время ликвидации песчаных пробок. Износ характерен высокими уровнями интенсивности изнашивания и отсутствием инкубационного периода [3].

Фрикционный вид изнашивания имеет несколько подвидов в соответствии с механизмом изнашивания. Можно выделить износ по механизму образования скаток и задиры [4].

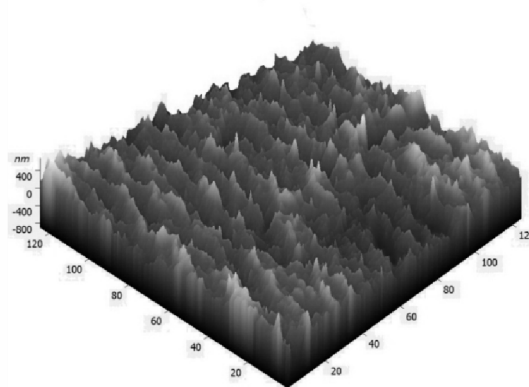


Рис. Фрикционный вид изнашивания на поверхности уплотнителя.

Выводы. На образцах одновременно реализуется сразу несколько видов изнашивания. Усталостный и абразивный износ имеют место, и следы их участия в разрушении поверхности трения уплотнителя прослеживаются локально.

В большей степени изнашивание реализуется по фрикционному виду. Так как задиры механизм близок к механизму изнашивания посредством образования скаток, выделить его как основной сложно. Можно предполагать, что при образовании гребенчатой структуры реализуются сразу два этих механизма.

[1]. И.В. Калашникова, А.А. Воприкова. Состояние и проблемы развития нефтегазового комплекса России. //Ученые заметки ТОГУ.– 2015(6), №2,152-156.

[2]. А.И. Лукомская, В.Ф. Евстратов Основы прогнозирования механического поведения каучуков и резин. –М., «Химия», 1975.

[3]. Г.И., Бродский, В.Ф. Евстратов Истирание резин.– М., «Химия», 1975.

[4]. Копченков, В. Г. Исследование закономерностей разрушения резин при ударе под углом к поверхности // Вестник машиностроения. – 2004. №11. 38-40.

ВЗАИМОСВЯЗЬ КИНЕТИКИ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛА И ГРАНИЧНОГО СМАЗОЧНОГО СЛОЯ С ИЗНАШИВАНИЕМ

¹Короткевич С.В. (korotstv@tut.by), ²Пинчук В.Г., ²Ковалёв Е.А., ¹Бобович С.О.

¹РУП Гомельэнерго, Гомель, Беларусь;

²Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь.

Установлена взаимосвязь кинетики упрочнения и разрушения поверхностного слоя металлов и физико-химических процессов, протекающих в граничном смазочном слое (ГСС). Определена роль дислокационных полей подповерхностного слоя металла на качество связи ГСС с поверхностью. Показано влияние нанометровой толщины ГСС на интенсивность изнашивания сопряжённых поверхностей при граничном трении.

Ключевые слова: граничный смазочный слой, хемосорбция, плотность дислокаций, изнашивание.

Цель – влияние дислокаций на микроструктуру, качество связи ГСС с поверхностью металла и изнашиванием.

Материалы и методы. Испытания на трение пары Ni–Mo проводили на машине типа АЕ-5 с прецизионной установкой плоскости контактиро-

вания при удельной нагрузке 168 кПа и линейной скорости 0,4 м/с. В качестве смазочной среды использовали ЦИАТИМ-201. Дислокационную структуру изучали комплексно: с привлечением методов ферромагнитного резонанса (ФМР), применимость которого для этих целей общепринята [1], и трансмиссионной электронной микроскопии. Спектр ФМР регистрировали по методике, описанной в работе [1]. Зависимость ширины линии ферромагнитного резонанса (ΔH) от времени (t) строили по точкам с интервалом 0,48 кс. Электронно-микроскопические исследования проводили с помощью микроскопа ЭВМ-100 АК и Hitachi - 800 методом тонких фольг на просвет. Кинетику формирования и разрушения граничного смазочного слоя исследовали с использованием метода электрофизического зондирования (МЭЗ). Исследование кинетики изнашивания никеля осуществляли методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) с использованием спектрометра ЭПР SE/X-2543 фирмы RadioPAN. Методом Фурье-спектроскопии изучены процессы окисления смазки, образования свободных радикалов и наличия частиц износа металла.

Результаты и их обсуждение. Роль смазочной среды ЦИАТИМ-201 сводится к пластификации поверхностного слоя или ослаблению связей атомов на гранях кристаллической решётки, что способствует облегчённому выходу винтовых дислокаций на поверхность. Выход дислокаций на поверхность обуславливает формирование прочно связанного с ней хемосорбированного смазочного слоя. Имеет место переход от физической адсорбции к хемосорбции.

На рис.1 приведена экспериментально установленная

зависимость изменения контактного сопротивления (R_c), кривая 2 и плотности дислокаций ρ , кривая 3 от времени трения t . Упрочнение поверхности при трении обуславливает увеличение плотности дислокаций и порождает новые ступеньки скола. Выход винтовых дислокаций на поверхность в виде ступенек скола с расположенным над ними хемосорбированным смазочным слоем обуславливает подъём никелевого зонда или увеличение расстояния между сопряжёнными телами, что приводит к увеличению контактного сопротивления до верхнего регистрируемого электрической схемой уровня ≈ 5 МОм (рис. 1).

Возрастание контактного сопротивления (R_c) связано с увеличением плотности дислокаций и аккумулярованием упругой энергии в подповерхностном слое никеля [2], и увеличением химического потенциала на поверхности. Это обуславливает формирование прочно связанного с поверхностью хемосорбированного смазочного слоя толщиной $\approx 2,1$ нм, который эффективно разделяет сопряжённые поверхности. Это приводит к снижению изнашивания. Послойное удаление подложки диспергированного слоя металла вместе с расположенным на нём хемосорбированным слоем приводит к снижению контактного сопротивления до

уровня характерного для начального уровня (рис. 1). Интенсивность изнашивания увеличивается на три-четыре порядка. Количественное содержание радикалов, металлсодержащих и кислородсодержащих соединений в ИК-спектрах проб смазочного материала, взятых с увеличением времени трения, определяли отношением площадей соответствующих пиков поглощения, выраженных в относительных процентах (%), к площади пика базовой полосы (в области 1460 см^{-1}) для метиленовой группы (CH_2) исходной смазки (ЦИАТИМ-201). Результаты Фурье-спектроскопии приведены на рис. 2.

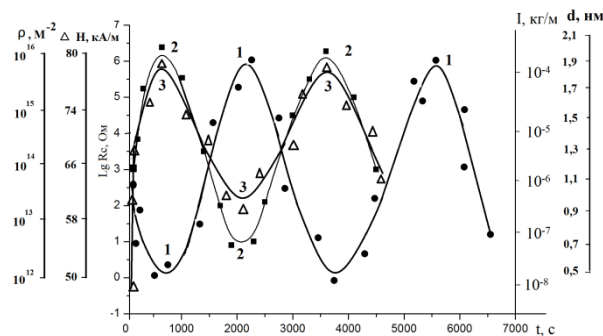


Рис. 1. Зависимость интенсивности изнашивания I (кривая 1) и контактного сопротивления R_c (кр-я 2) и плотности дислокаций ρ (кр-я 3) от времени трения t , с.

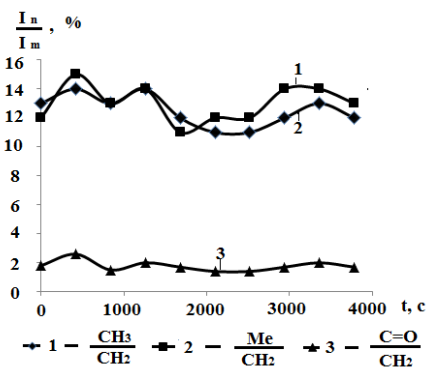


Рис. 2. Отношение интенсивностей ИК спектров поглощения молекулярных групп I_n/I_m (1 – CH_3/CH_2 , 2 – Me/CH_2 , 3 – $\text{C=O}/\text{CH}_2$), содержащихся в смазке ЦИАТИМ-201, с течением времени (t) трения.

Осцилляционный характер изменения отношения интенсивностей ИК спектров (рис. 2) качественно согласуется с наблюдаемыми зависимостями контактного сопротивления и ранее полученными зависимостями плотности дислокации от времени фрикционного испытания (рис. 1).

Выводы. Полученные экспериментальные данные полностью подтверждают локальный во времени послойный характер разрушения поверхности металлов. Выход дислокаций на поверхность определяет переход от физической адсорбции к хемосорбции и определяет качество связи молекул ГСС с поверхностью металла и, как следствие, триботехнические свойства смазочного слоя. Разрушение ГСС толщиной ≈ 2 нм обуславливает увеличение интенсивности изнашивания на три-четыре порядка.

[1] Пинчук, В.Г. Кинетика упрочнения и разрушения поверхности металлов при трении / В.Г. Пинчук, С.В. Короткевич // LAP Lambert Academic Publishing. – Saarbrücken : LAP, 2014. – 180 с.
 [2] Пинчук, В.Г. Кинетика микроструктуры и селективный

механизм разрушения поверхностного слоя металла при и трении / В.Г. Пинчук, И.А. Буяновский, С.В. Короткевич // Материаловедение. – 2015. – № 3. – С. 36-43.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СМАЗОЧНО - ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ НА ПРОЦЕССЫ ЛЕЗВИЙНОЙ И АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Коршунов А.А.

ХТЦ УАИ, Уфа, Россия.

Представлены результаты лабораторных исследований по оценке работоспособности различных масляных и водосмешиваемых смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) при лезвийной и абразивной обработке заготовок из различных материалов.

Ключевые слова: абразивная обработка, смазочно-охлаждающая жидкость, СОЖ, трение, шлифование.

Введение

В настоящее время на рынке смазочных материалов (СМ) представлен большой ассортимент различных смазочных материалов: масла, водосмешиваемые СОЖ различной природы: на основе минерального масла, полусинтетические с содержанием минерального масла и синтетические. У каждой из этих групп СОЖ существуют свои достоинства и недостатки. Масла и СОЖ на основе минеральных масел работают эффективнее на тяжело-нагруженных операциях лезвийной обработки, однако за счет большого содержания масла быстро приводят абразивный инструмент в нерабочее состояние путем образования на его поверхности засаленного слоя.

Целью данной работы является качественная и количественная оценка работоспособности различных масляных, водосмешиваемых (водорастворимых) СОЖ при лезвийной и абразивной обработке различных материалов.

Методики исследований

Исследования влияния состава СОЖ на эффективность абразивной обработки производились на триботехнической установке [1], принцип работы описан далее.

Образец закрепляют в приспособлении и шлифуют абразивным инструментом с подачей СОЖ в зону контакта, при помощи рычага в зоне обработки создается потребная нагрузка. Вращение с электродвигателя передается при помощи ременной передачи. Схема установки представлена на рисунке 1.

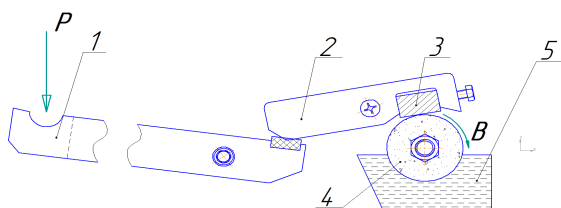


Рисунок 1. Устройство для оценки эффективности смазочно-охлаждающих жидкостей при шлифовании на базе триботехнической установки.

Оценку смазочных материалов при нарезании внутренней резьбы производили в сравнении величины крутящего момента при формообразовании профиля внутренней резьбы в заготовке (гайке) с помощью вращающегося, с заданной скоростью режущего метчика.

Испытание проводили с помощью специальной установки (рисунок 2) включающей в себя приспособление (1), в которое помещается заготовка гайки (5). С целью возможности передачи, контроля и регистрации сил, возникающих при резьбонарезании, приспособление (1) оснащено рычагом (2) и датчиком силы (3). В качестве резьбообразующего инструмента (4) использовали режущий метчик М16×1,5мм из стали ЭК-80М12. Заготовки гаек из стали 20Г2Р. Исследования СОЖ проводили в диапазоне скоростей от 710 до 1000 об/мин (от 35,7 до 50,2 м/мин).

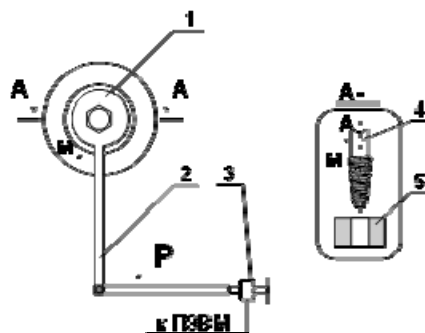


Рисунок 2. Схема испытаний процесса нарезания внутренней резьбы. 1 – приспособление, 2 – рычаг, 3 – датчик, 4 – инструмент, 5 – заготовка

В качестве абразивного инструмента взят белый корунд марки 25А ПП, образцы выполнены в виде прямоугольников квадратного сечения со стороной 9 мм и длиной 20 мм. Скорость обработки составляет 35 м/мин, нагрузка в узле трения 19,4 кгс. Время проведения испытаний 60 секунд.

Износ инструмента оценивали в процентах по уменьшению геометрической площади. Съём ме-

талла определяли весовым методом. Засаливание контактной поверхности инструмента определяли в процентах визуально путем наложения миллиметровой сетки.

Производились измерения шероховатости поверхности образцов Ra, Rz, Rmax, после проведения испытаний, на профилометре TR 220.

В качестве смазочных материалов применялись:

- жидкость РЖ-8, которая принадлежит к классу индустриальных масел.;

- смазка технологическая «Росойл-ХОН», которая представляет собой композицию минеральных и технических растительных масел легированную активными противозадирными и антиокислительными присадками, и применяется для алмазного и абразивного хонингования стали и чугуна;

- СОЖ «Росойл-910». Данная СОЖ предназначена для применения в виде эмульсии при лезвийной и абразивной обработке сталей и сплавов. «Росойл-910» представляет собой полусинтетическую смазочно-охлаждающую жидкость с добавлением ингибиторов коррозии и функциональных присадок;

- СОЖ «Росойл-920», которая представляет собой композицию поверхностно-активных веществ, антикоррозионных и функциональных присадок, и предназначена для применения в виде водных растворов на операциях лезвийной и абразивной обработки углеродистых и легированных сталей, чугуна и цветных металлов.

- масляная СОЖ «Росойл-102» предназначенная для нарезания наружной и внутренней резьбы.

Результаты исследований

Анализ полученных результатов лабораторных исследований показал, что для обработки низкоуглеродистой стали 5сп наиболее подходящим СМ является СОЖ «Росойл-910», которая одновременно обеспечивает достаточный съем металла, шероховатость поверхности и работоспособность инструмента. СОЖ «Росойл-910» в концентрации 30% позволяет снизить шероховатость поверхности Ra в 4,85 раза по сравнению со СМ «РЖ-8»; отсутствует износ инструмента (в рамках текущих исследований), у СМ «РЖ-8» он составил 18%; однако, уменьшен съем металла в 3,3 раза.

Результаты подтверждаются лабораторными и опытно-промышленными испытаниями [2,3].

Результаты лабораторных исследований показали, что для обработки Серого чугуна СЧ18 наиболее подходящим СМ является СОЖ «Росойл-910», которая одновременно обеспечивает достаточный съем металла, шероховатость поверхности и работоспособность инструмента. СОЖ «Росойл-910» в конц. 30% по сравнению со СМ «Росойл-ХОН» (который является наиболее близким по работоспособности СМ) обеспечивает аналогичный съем металла, позволяет снизить ше-

роховатость поверхности Ra на 12% и уменьшить в 10 раз засаливание поверхности инструмента.

Результаты лабораторных исследований показали, что для обработки природного камня «Красная яшма» наиболее подходящим СМ является СОЖ «Росойл-910», которая одновременно обеспечивает достаточный съем металла, шероховатость поверхности и работоспособность инструмента. СОЖ «Росойл-910» в конц. 30% по сравнению со СМ «Росойл-ХОН» (который является наиболее близким по работоспособности СМ) обеспечивает меньший съем металла на 26%, позволяет снизить шероховатость поверхности Ra на 6,4% и уменьшить в 6 раз засаливание поверхности инструмента.

Выводы

1. В результате проведенных лабораторных исследований установлено, что выбор физико-химических свойств СОЖ при абразивной обработке по критериям съема металла, шероховатости поверхности, засаливания инструмента, зависит от вида обрабатываемого материала.

2. При обработке низкоуглеродистой стали 5СП абразивным инструментом из белого корунда марки 25А ПП в среде смазочного материала «РЖ-8» происходит критический износ инструмента, который составил 18% за 60 сек. Износ инструмента происходил путем выкрашивания зерен сопровождаемый резким ростом температуры. Результат данного аномального износа, обусловленный комплексным химическим взаимодействием материалов заготовки, инструмента (связка, абразивный материал) и компонентов СОЖ, требует дополнительных исследований.

3. Наличие в составе СОЖ минерального масла позволяет снизить шероховатость обработанной поверхности, однако увеличивает степень засаливания инструмента при абразивной обработке.

4. На операции нарезания внутренней резьбы в гайках из стали 20Г2Р наиболее эффективной масляная СОЖ «Росойл-102», обладающая высокими триботехническими характеристиками по сравнению с водосмешиваемыми СОЖ.

[1] А.А. Коршунов, А.Н. Абрамов, к.т.н.; Д.Г. Тюленев Метод оценки эффективности СОЖ для операций абразивной обработки // «Трение и смазка в машинах и механизмах» №5, 2014 г.

[2] А.С. Трофимов, О.Л. Крамер, В.Ю. Шолом, д.т.н.; Д.Г. Тюленев, С.Ф. Беляев, С.А. Данилов Применение водорастворимых СОЖ при операциях абразивной обработки в замен масляных и керасиномасленных смесей // «Трение и смазка в машинах и механизмах» №12, 2008 г.

[3] А.А. Коршунов, Н.В. Савельева к.т.н., Д.Г. Тюленев, Ф.Н. Фазлиахметов, В.Ю. Шолом д.т.н. Смазочные материалы для хонингования – опыт создания и использования // «Трение и смазка в машинах и механизмах» №5, 2014 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПИГМЕНТОВ РАЗЛИЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМОЧЕВИННЫХ СМАЗОК

¹Кошелёв В.Н., ¹Тонконогов Б.П., ¹Килякова А.Ю., ¹Алексанян К.Г.,
²Мовсумзаде Э.М., ¹Алексанян Д.Р., ¹Гличева К.Р.

¹Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М.Губкина. Москва, Российская федерация;

²Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Российская федерация.

В статье описана возможность улучшения трибологических свойств полимочевинных смазок за счет введения в состав загустителя пигментов различного строения. Описаны синтезированные пигменты, имеющие разную структуру и относящиеся к разным классам соединений. Проведен анализ эксплуатационных свойств полимочевинных смазок полученных с использованием пигментов.

Ключевые слова: полимочевина, полимочевинные загустители, пигменты.

Мировое производство и потребление пластичных смазок на протяжении последних лет в России составляет около 1 млн. т в год, т.е. приблизительно 3% от общего потребления смазочных материалов.

Особое внимание во многих странах уделяется разработке, производству и потреблению высокотемпературных, а также биоразлагаемых смазок. В поиске материалов, отвечающих современным требованиям, было замечено, что полиуретаны (полимочевины) – высокомолекулярные соединения, содержащие в структуре уретановые группы, отличаются высокой термической и химической устойчивостью, механической стабильностью и хорошей загущающей способностью по отношению к дисперсионным средам различной природы. Однако, они обладают недостаточно высокими смазочными свойствами.

В нашей работе для улучшения трибологических свойств в смазку были добавлены пигменты. Так как пигменты водонерастворимые органические вещества, то их небольшое количество позволяет: во-первых улучшить трибологическое свойство смазки, а во вторых сделать из смазки колористическую метку.

Для получения смазок в смеси с пигментами нами была проведена реакция diazotирования 2,6-диамино-4-нитротолуола, полученного на основе модифицированного тринитротолуола (ТНТ). Использование конкретного диамина представляет определенный практический интерес, так как он является продуктом химической трансформации 2,4,6-тринитротолуола (ТНТ, ТОЛ, тротил), а задача поиска путей использования демилитаризованного тротила или продуктов его химических превращений признано в РФ народно-хозяйственной проблемой.

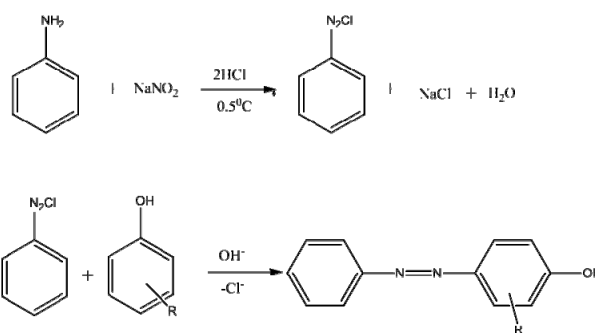


Таблица. Результаты испытаний.

Показатель	Без пигмента	Красная	Синяя	Коричневая	Желтая
Коллоидная стабильность, %мас.	3,80	0,82	2,15	1,50	0,37
Пенетрация, мм ⁻¹	205	162	198	196	196
Температура каплепадения, °С	220	214	220	220	220
Диаметр пятна износа, мм	0,70	0,68	0,71	0,7	1,00
Критическая нагрузка, кгс	75	84	84	80	80
Нагрузка сваривания, кгс	141	188	531	141	335
Испаряемость при 150°С за 1ч, % мас.	2,0	1,4	1,3	1,9	1,5
Предел прочности при 20°С, Па	280	280	240	240	280
Себестоимость за 1 кг, руб.	350	358	358	360	365

В результате проведенных исследований было выявлено следующие закономерности. Добавка пигмента в процессе варки смазки на этапе фор-

мирования загустителя ведет к улучшению диаметра пятна износа, коллоидной стабильности и температуры каплепадения.

[1] И.Г.Фукс, В.Г. Спиркин, Т.Н. Шабалина // Основы химмотологии. 2004

[2] Б.И. Степанов // Ведение в химию и технологию органических красителей. 1984

РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ, ИСПЫТАНИЙ И ВНЕДРЕНИЙ КАНАТНЫХ СМАЗОК

Крамер О.Л., Трофимов А.С., Никольская В.В.

ХТЦ УАИ, Уфа, Россия.

Приведены результаты разработки, испытаний и внедрений канатных смазок общего и специального назначения. Описан способ оценки противоизносных свойств канатных смазочных материалов. Представлены канатные смазки производства ХТЦ УАИ.

Ключевые слова: канатная смазка, стальные канаты, износостойкость, Росойл-К, Росойл-Торсиол-35, Росойл-Торсиол-55.

1. Высокоэффективная канатная смазка для тяжелых и агрессивных условий эксплуатации

Канатная смазка предназначена для защиты каната от коррозии, для обеспечения длительной сохранности органического сердечника в канате, уменьшения трения и износа внутренних и наружных проволок при работе каната на блоках, а также для предохранения проволок от образования в них местных охрупченных участков вследствие трения и ударов, испытываемых канатом в процессе работы.

Канатная смазка является одним из элементов конструкции каната, от которой напрямую зависит ресурс его эксплуатации.

До последнего времени в России производились только канатные смазки общего назначения, такие как Торсиол-35, Канатная 39У. Разработанные во второй половине прошлого столетия, они давно уже морально устарели и не удовлетворяют в полной мере требованиям производителей и потребителей канатов.

Канатные смазки зарубежного производства (Elaskon, Nyrosten), в отличие от отечественных, обладают значительно более высокими защитной способностью, адгезией к металлу, смазывающими свойствами, способностью восстанавливать свою структуру после выхода из зоны контакта трущихся деталей. Этим во многом объясняется высокий объем импорта канатных смазок в 2000-е годы. Однако, канатные смазки зарубежного производства имеют и свои недостатки, а именно – недостаточную для российского климата морозостойкость и очень высокую по сравнению с отечественными цену.

Таким образом, с целью улучшения качества и продления срока службы канатов, разработка отечественных канатных смазок, обладающих всеми преимуществами зарубежных аналогов и лишенных при этом их недостатков, является актуальной задачей.

Такая смазка под названием Росойл-К была разработана в НИИ ТиС УГАТУ совместно со специалистами ХТЦ УАИ, которая по морозостой-

кости, защитной способности и трибологическим характеристикам превосходит импортные аналоги.

Для оценки работы канатных смазок в условиях близких к реальным, разработан способ оценки противоизносных свойств канатных смазочных материалов и устройство для его реализации (рисунок 1).

Способ заключается в следующем: проволочные образцы, представляющие собой отрезки проволоки равной длины, обезжириваются и взвешиваются. Результаты замеров заносятся в бланк испытаний.

Проволочные образцы неподвижно фиксируются на раме, скручиваются относительно друг друга на 360° и нагружаются, при одинаковой скорости, заданным весом.

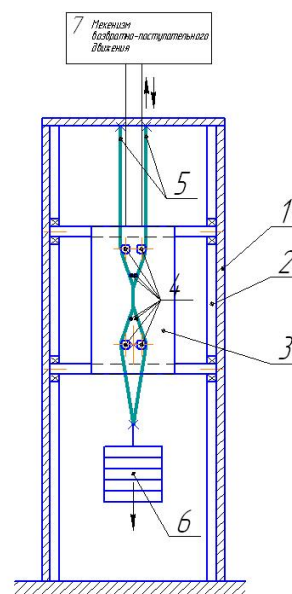


Рисунок 1. Схема лабораторного стенда для оценки износоустойчивости канатной проволоки и смазочных материалов:

1- опорная рама; 2- направляющие; 3- каретка; 4- ролики направляющие; 5- проволочный образец; 6- груз; 7- механизм возврата-поступательного движения.

В зону контакта проволочных нитей наносится смазочный материал, затем запускается меха-

низм, задающий каретке возвратно-поступательное движение. В процессе циклического перемещения каретки, узел трения совершает продольное перемещение, за счет чего происходит износ образцов, а при достижении критического значения толщины, происходит разрушение – разрыв проволоки. Образцы обезжириваются, взвешиваются, и определяется суммарный износ.

Лабораторный стенд, изображенный на рисунке 1, представляет собой опорную раму 1, с вертикальными направляющими 2, по которым совершает возвратно поступательное движение каретка 3, с установленными на ней направляющими роликами 4, которые обеспечивают продольное перемещение места скручивания нитей – узла трения. Проволочные образцы 5 неподвижно фиксируются на раме, скручиваются относительно друг друга и последовательно нагружаются заданным весом 6. Приложение нагрузки осуществляется путем увеличения веса, действующего на свободный конец проволочных нитей. Направляющие ролики и натяжение нитей, препятствуют их самораскручиванию. В зону контакта нитей наносится смазочный материал, затем запускается механизм возвратно-поступательного движения 7.

Результаты испытаний показали что новый смазочный материал позволяет снизить износ канатной проволоки в условиях, моделирующих условия эксплуатации каната, и повышает количество рабочих циклов до разрыва проволоки.

Таким образом, разработанная смазка не только не уступает, а по некоторым показателям и превосходит импортные продукты, в частности, обладает лучшими противозносными, антикоррозионными и низкотемпературными свойствами. При этом смазка производится из высококачественного российского сырья и значительно ниже по цене.

Опытные партии разработанной смазки успешно прошли опытно-промышленные испытания на БМК и ММК-Метиз. Было отмечено, что смазка Росойл-К отвечает всем требованиям металлургических комбинатов, по технологическим параметрам аналогична импортной смазке Эла-

скон, и может быть рекомендована для изготовления канатов, эксплуатирующихся в агрессивных и тяжелых условиях. В настоящее время Росойл-К серийно поставляется на ОАО БМК.

2. Современная канатная смазка общего назначения

Опираясь на опыт использования канатных смазок зарубежных производителей, металлургические комбинаты разработали новые требования к смазкам общего назначения. В НИИ ТИС УГАТУ совместно со специалистами ХТЦ УАИ разработана смазка Росойл-Торсиол-35 полностью удовлетворяющая этим требованиям. Смазка обладает высокой адгезией, защитной способностью, водостойкостью.

В настоящее время Росойл-Торсиол-35 серийно поставляется на ОАО БМК.

3. Низкотемпературная канатная смазка

По-прежнему широко востребованной остается защитная антифрикционная смазка Торсиол-55 по ГОСТ 20458, предназначенная для эксплуатации в интервале температур от -50°C до $+50^{\circ}\text{C}$. Однако, не все металлургические комбинаты могут проверить низкотемпературные свойства при минус 50°C , а полагаются на честность производителей смазок. Между тем, проведенные в лаборатории НИИ ТИС УГАТУ испытания нескольких образцов Торсиола-55 различных российских производителей показали их несоответствие требованиям ГОСТ по данному показателю. В связи с этим, по запросу БМК, была поставлена задача разработать смазочную композицию, которая бы гарантированно обеспечивала соответствие ГОСТ 20458 по низкотемпературным свойствам. И эта задача была успешно решена. Росойл-Торсиол-55 серийно поставляется на ОАО БМК.

Таким образом, специалистами ХТЦ УАИ разработаны и внедрены в производство высококачественные канатные смазки, обеспечивающие основные потребности российских производителей и потребителей канатов. Производство разработанных канатных смазок освоено на «Опытном заводе смазок и оборудования» г.Уфа.

НОВЫЕ ПОЛИМЕРЫ И ТРИБОЛГИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ИХ ОСНОВЕ

¹Краснов А.П., ²Буяев Д.И., ¹Наумкин А.В., ¹Горошков М.В.

¹Институт элементоорганических соединений РАН им. А.Н. Несмеянова, Москва, Россия;

²ООО «ОВИТЭК» г. Мытищи, Московская область, Россия.

Рассмотрены представители нового поколения антифрикционных органоластов, бинарных композиционных материалов, работоспособных при 25-40 МПа. Исследованы новые аморфные ароматические поликетоны, имеющие коэффициент трения 0.2-0.3, применяемые в качестве связующих. Начаты активные исследования полимерных щеток, предназначенных для узлов трения микроэлектромеханических систем, в которых достигнуты коэффициенты трения – около 0.001.

Ключевые слова: антифрикционные органоласты, полиарамидные волокна, полиоксадиазольные волокна, аморфные ароматические полиэфиркетоны, полимерные щетки, трибохимия композиционных материалов.

В последние годы появился ряд новых полимеров и трибологических материалов на их основе, которые способны удовлетворять крайне разнообразные требования современной промышленности от тяжелого машиностроения до микроэлектромеханических систем. Эти материалы объединяет способность работы в условиях сухого трения. При разработке новых термостойких органо-пластов исходят из теоретических подходов, основанных на двухфакторной природе силы трения. Решались вопросы влияния на трение межмолекулярного взаимодействия, строения макромолекулярной цепи, прочности межмолекулярных связей и связей в звене макромолекулы. Изучались проблемы трибохимической деструкции и ее развитие в зависимости от продолжительности трения, а также ряд других факторов, влияющих на работоспособность новых полимеров.

Антифрикционные износостойкие органо-пласты. После появления сверхпрочных полиарамидных волокон Кевлар были сделаны многочисленные, но неудачные попытки разработать на их основе антифрикционные материалы сухого трения подобно многочисленным материалам на основе алифатических полиамидов. Для разработки промышленно ценных органо-пластов были проанализированы новые полимерные ароматические полиарамиды в виде волокон, и оказалось, что на их трибологические свойства сильно влияет как структура, так и соотношение аморфной и кристаллической фаз макромолекулы, приводя к образованию поверхности дискретного типа. Обращает на себя внимание, что лучшее антифрикционное полиоксадиазольное волокно «Арселон» и лучшее полиарамидное волокно «Русар НТ» имеют частично кристаллическую структуру (Арселон – 74%; Русар НТ – 51%). Особенностью разработанных на основе волокон Русар и Арселон органо-пластов является двухкомпонентный состав волокна и связующего (ФФ-полимера) без каких-либо добавок.

При малых значениях коэффициента взаимного перекрытия антифрикционные органо-пласты устойчиво работают при давлении до 40 МПа, скорости до 0.5 м/с с коэффициентом трения $f \sim 0.2-0.3$. Материалы этого типа используются в тяжело нагруженных узлах трения: железнодорожном и городском транспорте, в насосах для перекачки агрессивных жидкостей, в тяжелых бульдозерах и других машинах и механизмах.

Поликетоны. Когда речь идет о поликетонах, обычно подразумеваются иностранные разработки полиэфиркетонов (РЕК) и полиэфирэфиркетонах (РЕЕК). Однако, при характеристике этих

полимеров приводятся сведения о том, что несмотря на высокую термостойкость, их антифрикционные свойства не удовлетворяют требованиям промышленности. Недостаток имеющихся РЕЕК, приводящий к ухудшению антифрикционности состоит в низком показателе температуры стеклования ($\sim 150^\circ\text{C}$), несмотря на высокие значения термо- и теплостойкости. Причина в том, что высокие показатели теплостойкости достигнуты не за счет жесткости цепи, а за счет частичной кристалличности (около 30%). Поэтому, как правило, в рецептурах используемых поликетонов содержатся самосмазывающиеся добавки: графит, MoS_2 , политетрафторэтилен.

В ИНЭОС РАН разработана группа аморфных поликетонов, так называемых кардовых сополимеров, имеющих, наряду с высокими показателями тепло- и термостойкости пониженный коэффициент трения (до 0.2-0.3). Они используются в качестве связующего композиционных материалов на основе термостойких армирующих полимерных и неорганических нитей.

Полимерные щетки. Это направление является примером выполнения химиками «заказа» трибологов, занимающихся проблемами микроэлектромеханических систем. С каждым годом резко возрастает количество статей, посвященных трению этих материалов. Фактически, полимерные щетки – это комбинированный полимерный материал.

В «конструкции» полимерной щетки можно различать две части: основу и закрепленные на ее поверхности полимерные ветви. Они представляют гибкие алифатические молекулы типа полипропиленгликоля, полидиметилсилоксана, блоксополимеров, соединений, содержащих группы CF_x . Исследование трения этих материалов, как правило, проводится с использованием атомно-силовых микроскопов, в которых для измерения латеральных сил в качестве контртела применяются полимерные шарики (полистирол, полиэтилен).

Подобные материалы используются при перемещении контртела на микро- и нанометровые расстояния. Измерение силы трения производится по сопротивлению находящегося на поверхности равномерного «частокола» полимерных молекул, высотой около 100 нм. В статьях, посвященных измерению коэффициента трения, констатируются очень низкие значения коэффициента трения до 0.001.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 15-13-00061).

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ МЫЛЬНЫХ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК НА ФОРМИРОВАНИЕ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ В ЗОНЕ ТРЕНИЯ

Крахмалев С.И., Платонова Р.Г.

ОАО Всероссийский научно-исследовательский институт по переработке нефти, Москва, Россия.

Проведено исследование влияния дисперсной фазы мыльных пластичных смазок на формирование смазочного слоя на различных установках. Различное влияние загустителей разного состава на характеристики смазочного слоя свидетельствуют о частичном сохранении влияния структурированной дисперсной фазы пластичной смазки и ее участии в формировании смазочного слоя.

Ключевые слова: пластичные смазки, дисперсная фаза, смазочный слой, загустители.

Исследованиями на машине трения МТ-77 было показано, что интенсивность износа деталей в паре трения плоскость – плоскость зависит от состава дисперсной фазы, а на продолжительность эффективного действия пластичной смазки влияют взаимное расположение трущихся металлов и соотношение ее показателей предела прочности и эффективной вязкости.

Результаты испытаний на четырехшариковом приборе КТ-2 смазок различного состава, проведенные совместно с Р.М. Матвеевским и И.А. Буяновским, послужили толчком к началу исследований с целью уточнения роли дисперсной фазы пластичных смазок, в зоне трения подшипников качения и скольжения. При нагревании узла трения была выявлена корреляция между температурой фазового перехода мыльной дисперсной фазы и изменением коэффициента трения. Как правило, температура изменения коэффициента трения хорошо коррелирует с температурой первого фазового превращения мыла.

На стенде вал-втулка Волгоградского политехнического университета в режиме вращения и качания вала было показано, что формирование установившегося смазочного слоя является функцией объемно-механических свойств пластичной смазки, состава дисперсной фазы, и условий работы узла трения. От состава и свойств пластичной системы зависит соотношение зон формирования совершенного и несовершенного режимов смазывания, для каждого состава смазки устанавливается «своя» толщина смазочного слоя и «свое» соотношение совершенного и несовершенного режимов смазки. Величина пути несовершенного трения в значительной мере определяется составом загустителя.

При малой скорости относительного движения сопряженных деталей и в режиме трения качения, и в режиме трения скольжения, смазочный слой формируется элементами более или менее разрушенной пластичной структуры смазки. Но даже при большой частоте вращения, частично проявляется влияние структурообразующих свойств дисперсной фазы на соотношение совершенного и несовершенного режимов смазывания. Состав дисперсной фазы оказывает влияние на формирование, толщину и границы существования сплошного смазочного слоя.

На установке Тбилисского ГУ в паре трения «шар-диск» и машине трения ИМАШ РАН в паре трения ролик по ролику различные мыльные загустители с одинаковой дисперсионной средой образуют пары жидкость – загуститель, которые создают смазочный слой различной толщины. Мыльные загустители в разной степени оказывают влияние на увеличение толщины смазочного слоя по сравнению с исходной дисперсионной средой.

В условиях трения качения и качения с проскальзыванием в паре трения ролик по ролику на машине трения ИМАШ АН РФ было установлено, что состав дисперсной фазы всецело определяет механизм формирования смазочного слоя. При одинаковой дисперсионной среде смазки в зависимости от состава дисперсной фазы изменяются начальная и конечная скорости образования сплошного смазочного слоя. Количество загустителя оказывает влияние на толщину смазочного слоя, но дополнительное введение наполнителя (даже в количестве, равноценном содержанию загустителя) в отдельных случаях, практически, не оказывает влияния на толщину смазочного слоя.

НЕКОТОРЫЕ ТРИБОХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ ГЛИЦЕРИНА

Кужаров А.А. (akuzharov@gmail.com), Лукьянов Б.С.

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия;
НИИ Физической и органической химии ЮФУ, Ростов-на-Дону, Россия.

В представленной работе приведены некоторые аспекты трения в жидкой смазочной среде. Установлено, что повышение триботехнических характеристик смазочных материалов связано с формированием на поверхности сложных плёнок переноса: сервовитной

и сёрфинг-плёнки. С помощью ИК и хромато-масс-спектроскопий определено, что их формирование связано с большим количеством химических реакций, происходящих в смазочной среде, в процессе трения. Предложены химические реакции и схема трибопревращений смазки (глицерина).

Ключевые слова: сервовитная плёнка, сёрфинг-плёнка, трибохимия, трибохимические превращения, ИК спектроскопия, хромато-масс-спектрометрия

Трибохимия является неотъемлемой частью трибологии, т.к. процесс трения, а в жидкой смазочной среде особенно, невозможен без протекания большого количества химических реакций. Эти реакции приводят к образованию в смазке большого количества соединений, которые в дальнейшем могут взаимодействовать и друг с другом. Кроме этого, все эти соединения реагируют, взаимодействуют и адсорбируются поверхностью трения, что приводит к формированию на ней сложных металлических и металлоорганических плёнок: сервовитной и сёрфинг-плёнки. Именно наличие таких плёнок и приводит к повышению триботехнических характеристик смазочной среды, что проявляется в снижении трения и износа.

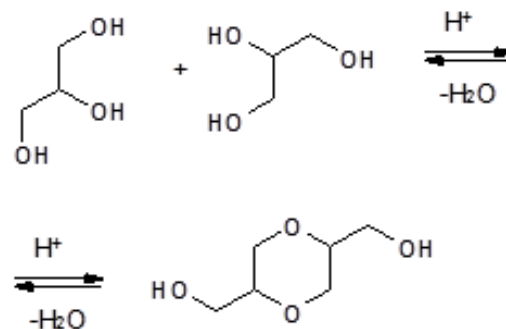
Идентификация трибохимических реакций сопряжена с рядом трудностей, в первую очередь технических, т.к. трибохимические превращения смазочной среды происходят не во всём объёме смазки, а в зоне контакта, трущихся поверхностей, который, зачастую бывает микроскопическим. Это приводит к тому, что количество продуктов таких трибохимических реакций крайне мало и, зачастую, недостаточно для идентификации. Однако, использование современного аналитического оборудования и методов исследования (ИК и хромато-масс-спектроскопий) позволяет идентифицировать даже такие незначительные количества вещества.

На основании исследования глицерина, классической и во многом модельной смазочной среды, при трении в паре сталь-медный сплав были выявлены целые группы веществ, многообразие которых свидетельствует о большом количестве реакций трибопревращений смазочной среды, происходящих при фрикционном взаимодействии.

В первую очередь это трибохимические реакции окисления глицерина. Дальнейшее окисление продуктов приводит к образованию целого

ряда новых соединений и связано с удлинением углеводородной цепи и дальнейшими превращениями уже полученных продуктов. Учитывая всё многообразие получающихся карбоновых кислот (одно- и многоосновные, предельные и непредельные), спиртов (одно- и многоатомные, предельные и непредельные, первичные, вторичные, третичные и даже полиспирты), альдегидов, кетон и других соединений, все они могут взаимодействовать с образованием простых и сложных эфиров, о чём и свидетельствуют результаты хромато-масс-спектроскопий.

Идентификация непредельных органических соединений предполагает возможность протекания не только трибоокислительных, но и трибополимеризационных процессов, например, в продуктах трибохимических реакций присутствуют п-диоксан-2,5-диметанол:



Таким образом, само функционирование трибосистемы инициирует большое число химических реакций, приводящих к образованию большого спектра органических соединений, которые в дальнейшем и принимают непосредственное участие в образовании соединений с металлами трибосопряжения, и формированию сложной металлоорганической сёрфинг-плёнки на поверхности трения.

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОКЛАСТЕРОВ МЕДИ

Кужаров А.А. (akuzharov@gmail.com), Милов А.А., Герасина Ю.С.

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Россия;
Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону, Россия.

В работе проведены теоретические, физико-химические и триботехнические исследования нанокластеров меди. Квантово-химические расчеты процесса формирования нанокластеров меди показали, что размер и форма напрямую связаны с механизмами роста таких наночастиц. Выполнен синтез нанокластеров меди триботехнического назначения.

ния. Методами динамического рассеяния света и атомно-силовой микроскопии определены размеры наночастиц, которые составляют от нескольких десятков до сотен нанометров. Изучена триботехническая эффективность нанопорошков меди в составе смазочной композиции.

Ключевые слова: нанокластеры меди, квантово-химические расчёты, механизм роста, трибология, синтез нанокластеров

Развитие трибологии связано с необходимостью управления процессами трения и износа различными методами. К одним из возможных механизмов управления этими процессами можно отнести улучшение полезных свойств смазочных материалов за счет введения в состав смазочной композиции наноразмерных кластеров металлов, обладающих определенным набором триботехнических свойств. В научной литературе имеется большое количество материалов по изучению влияния добавок из чистых металлов (Cu, Ag, Pb, Sn, Zn), а также иных химических соединений (CuO, MoS₂, CuSO₄, ZnAl₂O₄, Al₂O₃, TiO₂). Особое место среди металлоплакирующих компонентов занимают частицы меди, т.к. это наиболее часто используемый металлоплакирующий компонент в трибологии.

В большинстве случаев добавки меди к смазкам носит несколько стохастический характер, связанный с тем, что добавляемые частицы очень разнообразны по размерам и добавляемым количествам. Для существенного триботехнического эффекта важно найти «золотую середину» сочетания размеров частиц металлов и их концентраций, т.к. зачастую результаты экспериментов не всегда однозначны и положительны с точки зрения антифрикционных характеристик смазочных сред.

Размеры добавляемых частиц, крайне важны, особенно, если они находятся в наноразмерном диапазоне, т.к. новые свойства, характерные для наночастиц, могут оказывать положительное воздействие и на триботехнические свойства. И тут важным является механизм формирования таких наночастиц или нанокластеров, т.к. он напрямую связан с их итоговыми размерами.

В работе предпринята попытка изучения процесса образования нанокластеров меди и выявления их триботехнических характеристик в составе смазочных композиций.

Механизм формирования нанокластеров меди был рассмотрен с помощью квантово-химических расчетов. Процесс роста кластера рассматривался при максимальном сохранении симметрии в последовательности Cu₁→Cu₁₃→Cu₃₃→Cu₄₅. Исследуемые структуры представляли собой минимумы на соответствующих поверхностях потенциальной энергии.

Расчёты показали, что Кластер Cu₁₃ представляет собой икосаэдрическую структуру с радиусом онзагеровской сферы – 5,11 Å.

Присоединение одного атома меди к этой структуре сначала приводит к изомеру Cu₁₄ с искаженным икосаэдрическим каркасом, который затем трансформируется в два незавершенных

икосаэдрических фрагмента. В связи с этим можно утверждать, что с большой долей вероятности при постепенном росте кластера меди образуются не сферические, а протяженные структуры.

При переходе Cu₁₃→Cu₃₃ внутренний слой унаследован от структуры кластера Cu₁₃, а второй представляет собой пентагональную пирамиду с вершиной-одного из атомов меди первого слоя.

При переходе Cu₃₃→Cu₄₅ каждый фрагмент кластера Cu₃₃, соответствующий пентагональной пирамиде, достраивается до бипирамиды.

Рост наночастиц связан с послойным ростом кластеров меди и их дальнейшей стабилизацией. Это гарантирует образование наночастиц с широким распределением по размерам от 0,5 нм с практически любым распределением по размерам и с различными симметриями.

Используя результаты квантово-химических расчетов, был выполнен синтез нанокластеров меди триботехнического назначения.

Получение наночастиц меди проводили по совмещенной звуко-электрохимической технологии с использованием стабилизатора – желатина. Варьируя технологические параметры синтеза (плотность тока, концентрация стабилизатора) были получены нанопорошки с различными размерами структурных элементов.

Методом динамического рассеяния света определено, что размеры медных частиц находятся в диапазоне от нескольких десятков до сотен нанометров в зависимости от условий проведения синтеза.

Методом атомно-силовой микроскопии в полуконтактном режиме установлено, что наночастицы меди представляют собой эллипсоиды с размерами частиц менее 100 нм, что подтверждает результаты квантово-химических расчетов и динамического рассеяния света.

Триботехнические характеристики нанокластеров меди в составе смазочной композиции оценивали по ГОСТ 9094-75 на ЧШМ. Основой смазочного материала являлся глицерин. Концентрация присадки – 2,5, 5 и 10% по массе. Из результатов трибоиспытаний следует, что введение нанопорошков положительно влияет на триботехнические возможности глицерина. Так, максимальное снижение износа на 33% было достигнуто для композиций с наночастицами меди размерами 70 нм. Это свидетельствует о том, что в составе смазочного материала присадка содержится в достаточном количестве, чтобы обеспечить насыщение трущихся поверхностей наночастицами меди, и позволяет сформировать защитные пленки на поверхности фрикционного контакта.

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ

^{1,2}Кузнецов В.П. (wpkuzn@mail.ru), ¹Скоробогатов А.С., ²Червач Ю.Б.

¹Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия;

²Томский политехнический университет, Томск, Россия.

Рассмотрены вопросы управления комплексом параметров трибомеханической системы скользящего индентора при реализации финишной технологии наноструктурирующего выглаживания термоупрочненных сталей инструментом без теплоотвода и с теплоотводящей системой

Ключевые слова: наноструктурирующее выглаживание, коэффициент трения, линейная скорость, контактная температура, теплоотвод, нанокристаллит.

Наноструктурирующее выглаживание (Nanostructuring burnishing – NSB) – финишная технология сглаживания микронеровностей и формирования нанокристаллической структуры в поверхностном слое материала интенсивной пластической деформацией при обработке высокоресурсных деталей на станках [1-2].

Интенсивная пластическая деформация создается сжатием и простыми сдвигами мезообъемов материала путем управления многократным фрикционным нагружением поверхностного слоя скользящим индентором инструмента сферической или цилиндрической формы.

Реализуется ряд кинематических схем движения детали и инструмента, обеспечивающих развитие последовательных во времени и перпендикулярных по направлению воздействий контактных сил F_z и F_y , на сжатые мезообъемы и их поворотов от силы трения. На рис. 1 приведены кинематическая и силовая схемы наноструктурирующего выглаживания при обработке детали типа «диск».

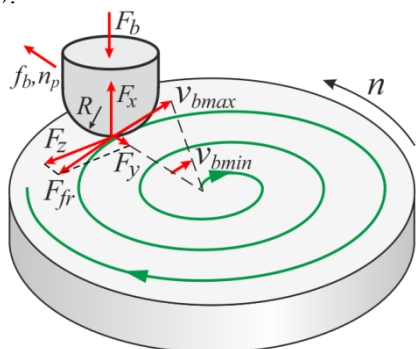


Рис. 1. Кинематическая и силовая схемы наноструктурирующего выглаживания

Ключевым вопросом измельчения исходных зерен обрабатываемого материала до нанокристаллитов является управление взаимосвязанными параметрами трибомеханической системы процесса:

1) Контактным давлением, отношением контактных сил F_z и F_y и коэффициентом трения индентора:

$$\mu = \sqrt{F_y^2 + F_z^2} / F_x. \quad (1)$$

2) Количеством простых сдвигов мезообъемов материала N_c при перемещении индентора на

длину пятна контакта l_c в направлении подачи f_b и накопленными пластическими деформациями ε_z и ε_y , создаваемыми силами F_z и F_y .

3) Линейной скоростью индентора v_b и контактной температурой T_1 .

В работе [2] установлено, что для развития интенсивной пластической деформации и формирования нанокристаллитов в поверхностном слое термоупрочненных до α -мартенсита сталей контактное давление и сила трения, соответственно, должны быть в пределах $P_c=3...5$ ГПа и $F_{\mu}=25...70$ Н.

Количество простых сдвигов материала мезообъема N_c за один n_c или n_p рабочих ходов инструмента можно определить следующим образом:

$$n_c = \frac{l_c}{f_b} = \frac{2\sqrt{R^2 - (R - h_{in})^2}}{f_b}, \quad (2)$$

где h_{in} – глубина внедрения, индентора.

$$N_c = \sum_{i=1}^{n_p} n_{ci}. \quad (3)$$

Количество простых сдвигов N_c определяет степень накопленных деформаций ε_z и ε_y .

Высокий уровень фрикционной нагрузки и ухудшение теплопроводности наноструктурированного слоя сталей создают при линейной скорости $v_b \geq 15$ м/мин практически адиабатические условия в контактной зоне (число Пекле $Pe > 10$) и ограничивают производительность обработки.

Проблема повышения скорости v_b и производительности процесса решена за счет создания теплоотводящей системы инструмента и метода расчета коэффициента разветвления тепла на основе термических сопротивлений [3].

Коэффициент разветвления тепла в инструмент может быть определен по формуле:

$$\eta_{in} = \frac{(T_1 - T_2) / R_{in}}{(T_1 - T_2) / R_{in} + (T_1 - T_0) / R_w}, \quad (4)$$

где R_{in} и R_w – обобщенные объемные и контактные термические сопротивления тепловым потокам в индентор и обрабатываемый материал; T_0 , T_2 – температуры обрабатываемого материала и жидкости, охлаждающей индентор инструмента, соот-

ветственно [3].

Определено, что при выглаживании закаленных сталей без отвода тепла коэффициент разветвления $\eta_{in} \leq 45...50\%$. Обеспечение температуры $T_2 = -1...+2\text{ }^\circ\text{C}$ повышает η_{in} до $65...75\%$ и не позволяет контактной температуре T_1 преодолеть величину $440\text{ }^\circ\text{C}$ при повышении v_b до 50 м/мин .

Отвод тепла от индентора поставил вопросы к анализу изменения параметров трибомеханической системы и оценке эффективности наноструктурирования при повышении линейной скорости обработки до трех и более раз.

Для сравнительной оценки влияния линейной скорости v_b на отношение контактных сил F_z/F_y , коэффициент трения и шероховатость поверхности выполнено наноструктурирующее выглаживание закаленной и низкоуглеродистой цементованной стали 20X (HRC55) инструментом с индентором ПСТМ DBN на динамометре KISTLER-9276B без отвода тепла и с теплоотводящей системой ($F_b=220\text{ Н}$; $f_b=0,025\text{ мм/об}$; $v_b=6...80\text{ м/мин}$). Шероховатость обработанной поверхности определялась на 3D-профилометре WYKO NT1100. Результаты исследований приведены на рис. 2 (а,б).

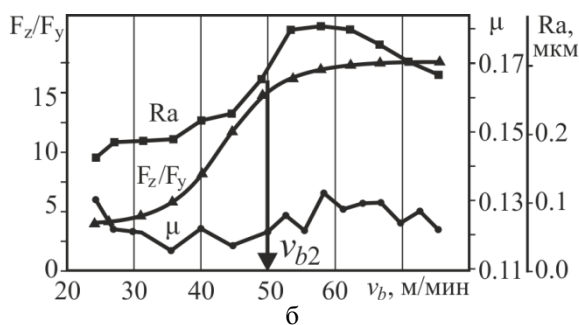
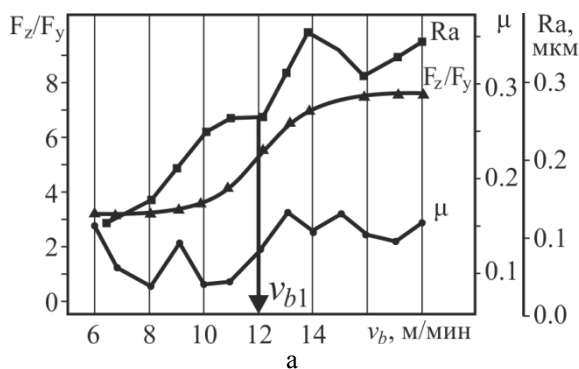


Рис. 2. Шероховатость поверхности, соотношение контактных сил и коэффициент трения при обработке инструментом: а – без теплоотвода; б – с теплоотводящей системой

Обсуждение и выводы

При обработке без теплоотвода наноструктура с размерами зерен $10...70\text{ нм}$ формируется на скорости $8,5...11\text{ м/мин}$ (рис. 3,а). В этом диапазоне скоростей стабильно обеспечивается коэффи-

циент трения $\mu=0,9...0,12$ и отношение $F_z/F_y \approx 3,5...5,5$. Повышение скорости выше $v_{b1}=11\text{ м/мин}$ ухудшает диспергирование структуры и размер зерен при скорости 14 м/мин увеличивается до $80...450\text{ нм}$ (рис. 3,б).

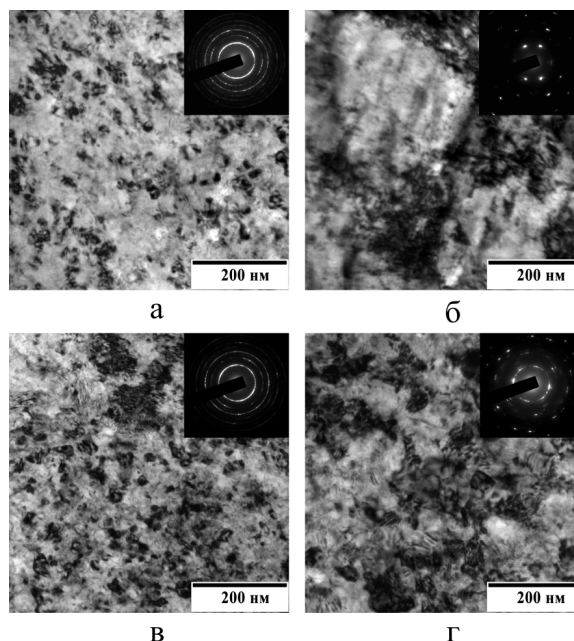


Рис. 3. Просвечивающая электронная микроскопия фольг поверхностного слоя после наноструктурирующего выглаживания: а и б – без теплоотвода на скоростях $8,5\text{ м/мин}$ и 14 м/мин ; в и г – с теплоотводящей системой на скоростях 35 м/мин и 75 м/мин

Обеспечение коэффициента разветвления тепла $\eta_{in}=65...75\%$ позволяет формировать наноструктуру с размерами зерен $5...70\text{ нм}$ на скоростях $25...45\text{ м/мин}$ (рис. 3,в). При $v_{b2} \geq 50\text{ м/мин}$ формируется неоднородная структура с зернами размером $25...165\text{ нм}$.

Отвод тепла поддерживает $\mu=0,12...0,13$ в диапазоне скоростей $20...75\text{ м/мин}$, а наилучшая наноструктура формируется при $F_z/F_y \approx 4...10$.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-08-01511 А и субсидии на реализацию комплексного проекта 2015-218-06-055

[1] Кузнецов В.П. Теоретическое обоснование и реализация наноструктурирующего выглаживания при обработке прецизионных деталей из конструкционных сталей: Дисс. док. техн. наук. – Курган, 2013. – 341 с.

[2] Kuznetsov V.P., Smolin I.Yu., Dmitriev A.I., Tarasov S.Yu., Gorgots V.G.. Toward control of subsurface strain accumulation in nanostructuring burnishing on thermostrengthened steel // Surface and Coatings Technology. – 285 (2016) 171-178.

[3] Kuznetsov V.P., Skorobogatov A.S., Gorgots V.G., Yurovskikh A.S. Analysis of speed increase perspectives of nanostructuring burnishing with heat removal from the tool // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 124 (2016) 012127

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛАСТОМЕРОВ НА ПОВЕРХНОСТЯХ, ПОКРЫТЫХ СЛОЕМ ЛЬДА, ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ТЯГОВО-СЦЕПНЫХ СВОЙСТВ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

¹Купреянов А.А. (vlankup@ya.ru), ²Румянцев Е.О.

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;

²ФГУП НАМИ, Москва, Россия.

Рассмотрена связь трибологических характеристик пары трения «эластомер–опорное основание, покрытое слоем льда» с тягово-сцепными свойствами колеса при различных режимах движения. Рассмотрены различные способы увеличения тягово-сцепных и тормозных сил, реализуемой в контакте силы трения скольжения и улучшения тягово-сцепных свойств автомобиля (эффект DTFP). Приведены результаты эксперимента.

Ключевые слова: колесо, лед, трение скольжения, динамический потенциал шины.

Возможность реализации достаточно больших продольных реакций в контакте автомобильных шин с опорной поверхностью определяют тягово-сцепные и тормозные свойства автомобиля при его движении как по твердым опорным поверхностям, так по грунтам. При движении автомобиля по твердым поверхностям возможность реализации максимальных продольных реакций в свою очередь определяется возможностью реализации сил трения в контакте. При взаимодействии автомобильных колес с грунтом продольные реакции во многом зависят от различных характеристик грунта.

Продольные реакции в контакте шин с опорной поверхностью в свою очередь определяют характеристики опорной проходимости (в частности предельный угол подъема), минимальный тормозной путь и динамику разгона автомобиля. При решении вопроса о возможности реализации максимальных сил трения при движении автомобиля по твердой опорной поверхности необходимо учитывать особенности контактного взаимодействия эластомера (слоя протекторной резины) с твердой опорной поверхностью (сухой, мокрой, загрязненной). С позиции современной трибологии силы трения в контакте зависят от текстуры поверхности, номинального давления, скорости скольжения и температуры. Это подтверждено теоретическими и экспериментальными исследованиями [1, 2].

На рис. 1 показан характерный вид диаграммы $\varphi_x = f(S_x)$. Для получения такой диаграммы используют математические модели различной степени сложности. В математических моделях высокого уровня [3, 4] шину рассматривают как многослойную геометрически нелинейную оболочку, а учет сил трения в контакте сводят к простейшим моделям трения (модели Кулона). При этом в зоне контакта шины с опорной поверхностью существуют зоны сцепления и скольжения. При повышении продольной реакции зона сцепления уменьшается, а зона скольжения увеличивается, постепенно охватывая весь контакт.

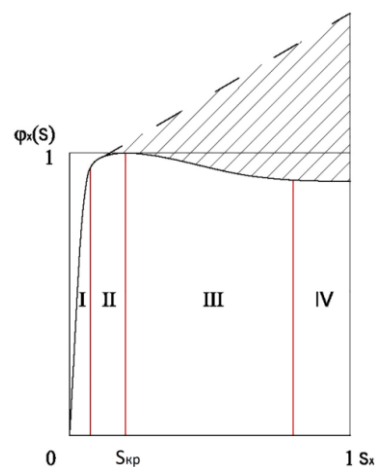


Рис. 1. Диаграмма $\varphi_x(S_x)$.

В зоне $S_x > S_{кр}$, где $S_{кр}$ — точка максимума на диаграмме (см. рис. 1), все точки шины в контакте имеют практически одинаковую скорость скольжения.

Условно можно считать, что на рис. 1 в зоне I присутствует только область сцепления (кроме задней границы), в зоне II зона скольжения постепенно растет, охватывая весь контакт, в зоне III реакция несколько уменьшается, а в зоне IV она стабилизируется.

Влияние нестационарности процессов нагружения крутящим моментом проявляется на различных дорожных поверхностях. Особый интерес представляет взаимодействие автомобильных шин с поверхностями, покрытыми слоем льда. При этом в работе [6] отмечен так называемый эффект DTFP (dynamic tire friction potential), проявляющийся при изменении скорости нагружения ведущего колеса крутящим моментом на ледяной поверхности.

Мнение исследователей о причине возникновения эффекта DTFP [6] сводится к тому, что при «медленном» нагружении контакт, в котором существенную роль играет образуемая водная пленка, активно разрушается, а при «быстром» нагружении процесс разрушения контакта замедляется и контакт «не успевает» разрушиться за время нагружения.

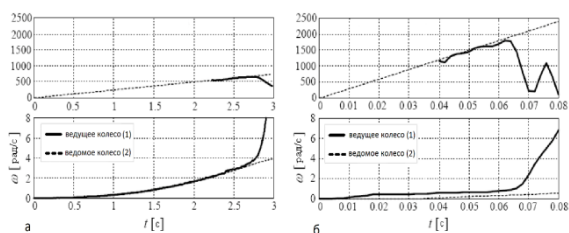


Рис. 2. Влияние скорости нарастания крутящего момента на тяговую силу F и угловые скорости ω ведущих (1) и ведомых (2) колес автомобиля при его трогании на льду:
а – малая скорость нарастания крутящего момента;
б – большая скорость нарастания крутящего момента.

Кроме того, установлено влияние интервала времени, прошедшего после приложения к колесу вертикальной нагрузки до начала возрастания крутящего момента, на максимальную продольную реакцию при взаимодействии автомобильного колеса с поверхностью, покрытой слоем льда. Это явление получило название «эффекта примерзания».

Была проведена серия экспериментов на трибологической установке при разных режимах трогания. Данные были обобщены и сведены в единый график, изображенный на рис. 3.

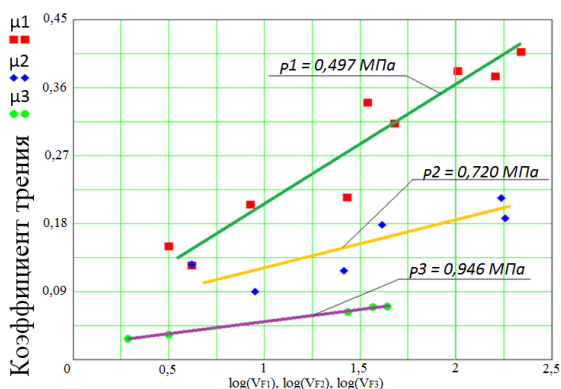


Рис. 3. Зависимости коэффициента трения в контакте пары «эластомер–лед» от скорости нагружения при различных значениях нормальной нагрузки:
1 – $N_1 = 39$ Н; 2 – $N_2 = 56,5$ Н; 3 – $N_3 = 74,3$ Н.

Как видно из рис. 3 для каждого значения нормальной коэффициент трения (сцепления) существенно зависит от скорости нарастания тангенциальной силы в пятне контакта.

Была проведена серия первичных экспериментов на физической модели с электромеханической трансмиссией, позволяющих рассмотреть взаимодействие колеса физической модели с ледяной опорной поверхностью.

Выводы по работе:

1. Экспериментальные исследования пары трения «эластомер–лед» в стационарном режиме показали, что коэффициент трения уменьшается при увеличении номинального давления и скорости скольжения в контакте и увеличивается с увеличением интервала времени от приложения нормальной нагрузки до приложения тангенциальной нагрузки (эффект «примерзания»).

2. Исследования на установке УТУ-3 позволили обобщить ранее известные результаты для широкого диапазона скоростей приложения тангенциальной нагрузки.

3. Определен закон приложения момента, позволяющий улучшить тягово-сцепные свойства колеса и автомобиля.

4. Проведены пробные испытания модели на ледяной опорной поверхности.

5. В экспериментальных исследованиях физической модели при плавном приложении крутящего момента и стационарных режимах установлено, что в зависимости от радиальной жесткости шины и номинального давления максимальный преодолеваемый угол подъема возрастает от $3...6$ до $12...18^\circ$ при переходе от «жестких» колес к «мягким».

[1] Besdo D., Heimann B., Klueppel M. Elastomere friction: theory, experiment and simulation. Berlin, Springer, 2010. 250 p. [2] Persson B.N.J. Theory rubber friction and contact mechanics. Journal of Chemical Physics, 2001, vol. 115, no. 8. URL: http://www.multiscaleconsulting.com/publications/Theory_of_rubber_friction_and_contact_mechanics.pdf (дата обращения 01.10.2014).

[3] Белкин А.Е., Нарская Н.И. Конечно-элементный анализ контакта автомобильной шины на основе оболочечной модели. Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение, 2004, № 3, с. 14–28.

[4] Tanner T.A. Computation methods for frictional contact with applications to the space shuttle orbiter nose-gear tire. Development of frictional contact algorithm. Hampton: NASA Publishing, 1996. 45 p.

[5] Морозов М.В. Методы улучшения тягово-сцепных и тормозных свойств автомобильного колеса с учетом трибологических свойств контакта шины с дорогой. Дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2012. 217 с.

[6] Ivanovic V. Experimental Identification of Dynamic Tire Friction Potential on Ice Surfaces. [Электронный ресурс]. Zagreb, 2005. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/00423114.2010.528778> (дата обращения 01.02.2015).

[7] Кристалный С.Р., Задворнов В.Н., Попов Н.В., Фомичев В.А., Шляхтин А.А. Шинный тестер для исследования характеристик шипованных шин. Вестник МАДИ, 2013, вып. 3 (34), с. 11–18.

[8] Ларин В.В. Физика грунтов и опорная проходимость колесных транспортных средств. Ч. 1. Физика грунтов. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 108 с.

[9] Котиев Г.О., Горелов В.А., Мирошниченко А.В. Синтез системы управления тяговыми электродвигателями для индивидуального привода ведущих колес автомобиля [Электронный ресурс] // Электрон. журн. «Наука и образование: электронное научно-техническое издание». 2011. Выпуск 12, №77-30569/282533 - Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/282533.html>, свободный.

О МЕХАНИЗМЕ ИЗНАШИВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС РЕДУКТОРНЫХ СИСТЕМ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Курапов П.А. (q-paul@bk.ru), Новиков В.С., Эфрос Д.Г., Федош Д.А.

НИИ технологии и организации производства двигателей –
филиал «НИИД» АО НПЦ Газотурбостроения «Салют», Москва, Россия.

На основании расчетной оценки уровня фактических давлений в контакте шероховатых поверхностей и данных экспериментов по износостойкости материалов зубчатых колес уточняется механизм изнашивания таких деталей в условиях полужидкостной смазки.

Ключевые слова: износ, зубчатые колеса, смазочная среда, микровыступы.

Зубчатые колеса газотурбинных двигателей выполняются из высоколегированной мартенситной стали, имеют термообработку и цементацию зубьев, так что твердость рабочей поверхности составляет 59-63 HRC. В редукторе обеспечивается циркуляционное смазывание колес с фильтрацией смазочного масла ИПМ-10. Обычно на рабочей поверхности зубьев по окончании срока эксплуатации износ крайне мал и визуально обнаруживается лишь приработка поверхности, имеющей исходную финишную механообработку (чистовое шлифование, хонингование и др.). Лабораторные исследования материала зубчатых колес (сталь 16ХЗНВФНБ-Ш), проводившиеся на роликовой установке Ш-17 и машинах трения, показывают высокую износостойкость данной стали (интенсивность изнашивания $3 \div 7 \cdot 10^{-11}$). В отработанном смазочном масле наблюдается осадок из мелкодисперсных продуктов износа черного или темно-коричневого цвета, по-видимому, являющихся оксидными и металлоорганическими соединениями, формирующимися в процессе контактных взаимодействий микронеровностей поверхности деталей. Мелкодисперсные частицы не реагировали на магнитное поле, атомно-эмиссионным спектрометром в их составе было обнаружено железо, никель, кремний, являющиеся компонентами исследуемой стали. Несмотря на малый уровень износа при относительном скольжении поверхностей зубьев в зонах контакта действуют высокие фактические давления, которые могут влиять на зарождение питтинговых повреждений. В этой связи представляет интерес выполнение расчетной оценки величин фактических контактных давлений (P_r), возникающих при контакте неровностей, когда смазочная пленка не обеспечивает полного разъединения деталей (режим полужидкостной смазки, характерный для тяжелонагруженных зубчатых передач).

В предыдущих исследованиях [1] была принята попытка оценки фактических контактных давлений для модели контакта вершин микровыступов методами теории упругости. В настоящее время разработана методика расчета таких давлений, учитывающая дискретный характер контакта шероховатых тел, возможность как упругого, так и пластического деформирования выступов, а также возможность упрочнения при контактных деформациях, которое наблюдается в опытах с образца-

ми материалов зубчатых колес, а также в практике их использования.

Таблица 1. Расчетные контактные параметры для двух видов обработки поверхности.

Финишная обработка колес	P_r , МПа	N_p/N	N_y/N
шлифование	7278	0,9952	0,0048
хонингование	6851	0,9963	0,0036

В приведенной таблице 1 указаны расчетные значения фактических давлений (P_r) и отношение числа упругих контактов (N_y) к общему числу возникающих фактических контактов неровностей (N), а также аналогичные значения для пластических контактов (N_p/N) на контурной площадке $0,4 \times 20$ мм², при рабочей нагрузке передачи.

Из полученных данных следует, что наибольшая часть вершин микровыступов поверхности колес испытывает дискретные пластические деформации, что подтверждается наличием наклепа на рабочей поверхности зубьев после эксплуатации.

Если учитывать малую длительность фактического контакта (микросекунды) и обильное смазывание высокоэффективным маслом, то становится ясно, что в короткие промежутки времени при локальных пластических деформациях на вершинах выступов обнажаются ювенильные поверхности металла, вступающие в химическое взаимодействие с кислородом воздуха и смазочной средой. При таких взаимодействиях растет поверхностная пленка из реактантов, отделяющаяся при последующих контактных взаимодействиях в виде мелкодисперсной фазы в смазочной среде. Очевидно также, что как поверхностно-активные компоненты масла, так и частицы образующейся дисперсной фазы продуктов износа будут влиять на кинетику контактного выкрашивания в зубчатых колесах, являющегося более опасным видом повреждения пар качения.

Предотвращение контактного выкрашивания и его разновидности – микропиттинга приобретает особое значение для зубчатых колес авиационного моторостроения. Такие повреждения, как показывает анализ предыдущих исследований [2] и, полученных нами, экспериментальных данных [3], зависят от величины фактических контактных давлений на рабочих шероховатых поверхностях

деталей качения. Поэтому, используя методику оценки величины таких давлений, возможно обеспечить более обоснованный выбор наиболее качественной технологии механообработки и оценить ожидаемую работоспособность деталей с учетом изменения исходной микрогеометрии поверхности под влиянием приработочного износа.

Значения фактических контактных давлений, получаемые с использованием расчетно-экспериментальных данных для различных видов обработки поверхности, могут быть использованы также и для оценки задиристости зубчатых ко-

лес, работающих в форсированном режиме при высоких нагрузках.

[1] Курапов П.А., Новиков В.С., Федош Д.А. Оценка качества финишной обработки зубчатых колес на основе модели дискретного контакта шероховатых тел //Трение и смазка в машинах и механизмах - 2014, №1, С. 21-26.

[2] Трубин Г.К. Контактная усталость материалов зубчатых колес / Г.К. Трубин-М.: Машиностроение, 1962 - 430 С.

[3] Курапов П.А. Усталостное разрушение поверхности деталей пар качения в условиях воздействия активной смазочной среды //Трение и износ – 2008, Т. 29, №4, С. 387-390.

ОПИСАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОБЩЕГО СОСТОЯНИЯ МАСЛА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ИЗНОС ТРУЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Лашхи В.Л., Чудиновских А.Л

ЗАО «НАМИ ХИМ», Москва, Россия.

В статье рассмотрено влияние изменения состояния масла на трибологические характеристики. процесс взаимодействия между маслом и поверхностью трения предлагается представить в кинетическом виде, а изменение состояния масла и смазываемых им поверхностей – интерпретировать с использованием основных положений нелинейной химической термодинамики необратимых процессов. В соответствии с теорией старения масел в качестве наиболее информативных показателей, характеризующих изменение потоков и сил, выступает кислотное число масла и его вязкость.

Ключевые слова: состояние масла, кислотное число, энтропия, износ.

Смазочное масло, как известно, используется в практике эксплуатации для снижения трения и износа сопряженных поверхностей. Износ в особенности в условиях граничной смазки при прочих равных условиях зависит от химического состава смазочной среды. Она, в свою очередь, определяет элементарный состав граничных слоев, формируемых на поверхности трения, а также степень и характер модификации последней. Вместе с тем в целом ряде случаев возникает необходимость оценить влияние изменения состояния масла на трибологические характеристики.

Для этого процесс взаимодействия между маслом и поверхностью трения предлагается представить в кинетическом виде, а изменение состояния масла и смазываемых им поверхностей – интерпретировать с использованием основных положений нелинейной химической термодинамики необратимых процессов (необратимой термодинамики). В этом случае главной информативной функцией выступает производство энтропии.

Основная задача неравновесной термодинамики состоит в том, чтобы в конечном итоге связать производство энтропии с различными необратимыми процессами, протекающими в реальных системах (де Гроот). Распространяя последовательно основные положения неравновесной термодинамики на реальные системы и соответствующим образом, адаптируя их, в перспективе можно оперативно и успешно решать любые прак-

тические задачи, сводя к разумному минимуму эксперимент и одновременно в большей степени активизируя различные расчетные схемы.

В своем большинстве сочетание «масло – поверхность трения» и собственно масло как составляющая этого сочетания относятся к открытым системам. Работающее масло по мере наработки переходит из одного состояния в другое и в конечном итоге теряет способность выполнять свои функции, т.е. теряет свою работоспособность.

Переходя из одного состояния в другое, система формирует различные структуры в форме организации отдельных элементов (Кребер) или связи между ними (Эбелинг). При этом образуются пространственные, временные и пространственно-временные структуры (диссипативные структуры), возникающие в нелинейной области вдали от термодинамического равновесия.

Образованием указанных структур широко оперируют в рамках нелинейной термодинамики или теории Онсагера как новым состоянием вещества, порожденным потоком свободной энергии. Указанное состояние приводит к новым типам организации материи за точкой неустойчивости (точкой бифуркации). В переложении этого на трибологию нормальное трение представляет собой структурную приспособляемость и его можно рассматривать как борьбу диссипативных структур с равновесными с переходом к новым формам устойчивой структуризации (Бершадский Л.И.).

Этому в значительной степени способствует смазочное масло, которое оказывает большое влияние на формирование граничных смазочных слоев и их химическую модификацию.

В случае протекания в системе по мере наработки необратимых процессов (износ, превращение масла) она в конечном итоге приходит к стационарному состоянию, реализуемому в «текущем равновесии» (Берталанфи). С энергетической точки зрения для стационарного состояния характерен принцип наименьшего рассеяния энергии (Онсагер) или соответствующий порядок стационарности (де Гроот). При этом стационарные концентрации, характеризующие состояние среды, в частности, смазочной эквивалентны, т.е. не зависят от начальных значений (Берталанфи).

С термодинамической точки зрения приближение системы к стационарному состоянию характеризуется изменением энтропии, а собственно указанное состояние минимальным производством энтропии (Гленсдорф и Пригожин).

Степень и скорость приближения системы к указанному состоянию собственно характеризует влияние масла на данный процесс, включая трение и изнашивание. В этом плане представлялось целесообразным выделить наиболее информативный контролируемый показатель состояния масла, аде-

кватно отражающий изменение энтропии как условий функции и эквивалентность. Для этого производство энтропии в рамках неравновесной термодинамики разделим на две составляющие, одну из которых связывают с изменением сил, а другую – потоков (Гленсдорф и Пригожин).

В соответствии с теорией старения масел в качестве наиболее информативных показателей, характеризующих изменение потоков и сил, выступает кислотное число масла и его вязкость. При этом кислотное число масла определяет в конечном итоге развитие процессов, результаты которых отрицательно отражаются, на качестве масла. Так, кислотность масла в качественном плане снижает эффективность действия противоизносных присадок, нарушает защитную способность поверхностных слоев и пр. Кроме того кислотность сказывается и на вязкости масла.

Более детальный анализ показывает, что скорость изменения кислотного числа масла с наработкой симбатна производству энтропии. В практическом плане такая зависимость позволяет по кислотности масла прогнозировать износ трущихся деталей. В частности, по величине кислотного числа моторного масла оказывается возможным прогнозировать величину износа поршневых колец ДВС и его вкладышей.

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ВОЛЬФРАМА

¹Лахоткин Ю.В. (lakhotkin@ipc.rssi.ru), ²Головин Ю.И., ¹Душик В.В., ²Шуклинов А.А., ¹Кузьмин В.П., ¹Рожанский Н.В., ¹Рыбкина Т.В., ¹Шапоренков А.А.

¹Институт физической химии и электрохимии РАН им. А.Н. Фрумкина, Россия;

²Гамбовский государственный университет, Россия.

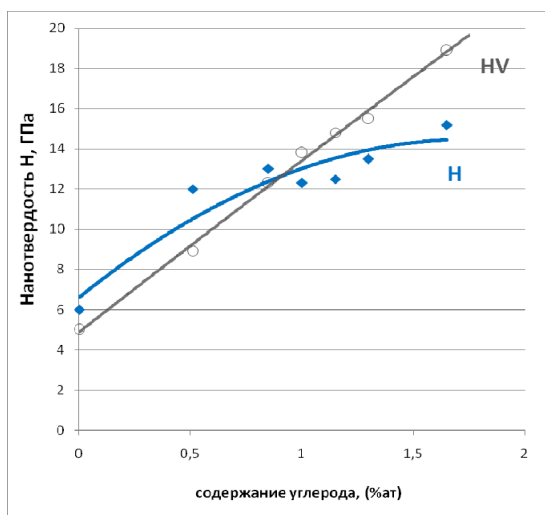
Доклад посвящен изучению наномеханических свойств (H, E, Kc) твердых слоев на основе сплавов вольфрама с углеродом, полученных низкотемпературным совместным химическим осаждением из газовой фазы. Показано, что для всех исследуемых образцов по мере повышения содержания углерода в вольфраме вместе с увеличением микро, и нанотвердости снижается модуль Юнга. Проведены исследования вязкости разрушения материала покрытия и показано, что во всей области составов наблюдается высокая трещиностойкость.

Ключевые слова: CVD, сплавы вольфрама, карбиды, покрытие.

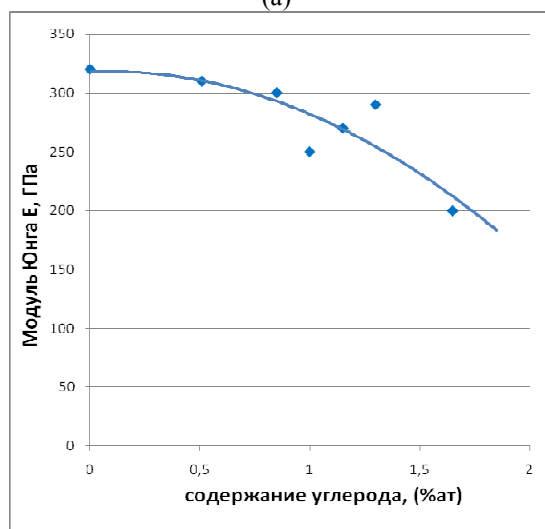
Для создания твердых и сверхтвердых покрытий на изделиях сложной формы широко применяется метод химического газофазного осаждения. Разрабатываемый низкотемпературный (500-550 °С) CVD метод осаждения твердых покрытий из фторосодержащей газовой среды позволяет синтезировать два класса наноструктурных и нанокomпозитных покрытий на основе системы вольфрам-углерод [1]. К ним относятся индивидуальные карбиды вольфрама заданной стехиометрии, их смеси между собой и сплавы вольфрама с карбидом вольфрама [2]. Ранее было показано, что в

системе W₂C - β-WC существуют только два состава, у которых наблюдается высокая трещиностойкость. Карбидные покрытия других составов обладают определенной хрупкостью. Наибольший интерес с точки зрения повышения трещиностойкости представляют покрытия на основе вольфрама, которые обладают регулируемой твердостью (до 20 ГПа) и нанокomпозитной структурой. Доклад посвящен исследованию физико-механических свойств CVD указанных твердых покрытий на основе сплавов вольфрама с углеродом.

В результате экспериментов были изготовлена серия покрытий из сплавов вольфрама с углеродом толщиной 25-30 мкм. Микротвердость слоев варьировалась в интервале 4,5 – 18,5 ГПа. Методом непрерывного наноиндентирования проведен анализ влияния содержания углерода на величину нанотвердости, модуля упругости и коэффициента вязкости разрушения исследуемых образцов. Исследования нанотвердости проводились на Нанотрибоиндентометре TI-950 в диапазоне глубин отпечатка от 30 нм до 2 мкм и диапазоне нагрузки от 100 мкН до 500 мН. С целью определения различия морфологического, структурного и напряженного состояния покрытий на ростовой поверхности и вдоль направления роста было проведено картирование исследованных образцов в латеральном и поперечном направлениях. Анализ полученных данных (по толщине покрытия и значениям глубины отпечатка) позволяет говорить о корректном определении величин H и E покрытия в интервалах глубин отпечатка от 30 нм до 2 мкм для всех составов покрытия.



(а)



(б)

Рис. 1. Зависимость микротвердости, нанотвердости (а) и модуля Юнга (б) слоя твердого вольфрама от концентрации углерода в нём

Анализ влияния масштабного фактора на значения твердости и модуля Юнга показывает, что практически для всех образцов на зависимостях нанотвердости H и модуля Юнга E от глубины отпечатка и величины приложенной нагрузки можно выявить две области: масштабно независимую, при больших значениях глубины отпечатка и нагрузки (на которой величины H и E остаются практически постоянными) и масштабно зависимую, при малых значениях. Установлены границы размерных эффектов в твердости и модуле Юнга для материала покрытий всех исследованных образцов. Проведены исследования нанотвердости и модуля Юнга (H и E) материала покрытия для всех образцов в зависимости от расстояния до границы материал подложки-материал покрытия. Важно то, что для всех исследуемых образцов по мере повышения содержания углерода в вольфраме вместе с увеличением микро, и нанотвердости снижается модуль Юнга (Рис. 1). Это указывает на неординарный характер структуры сплавов, что требует дополнительного исследования.

Из анализа полученных данных можно отметить, что значения величин нанотвердости – H и модуля Юнга – E всех исследуемых образцов остаются постоянными по всей толщине подложки и большей толщине покрытия W . В достаточно узком интервале толщины переходного слоя подложка – покрытие наблюдается переход значений определяемых величин H и E от значений характерных для материала подложки до значений присущих покрытию W и в дальнейшем с увеличением расстояния до границы материал подложки – покрытия W значения H и E остаются практически постоянными. Величина толщины приграничного слоя - ΔL покрытия W , в котором наблюдается переход значений величин H и E от значений характерных для материала подложки до значений присущих покрытию W , зависит от микротвердости твердого слоя.

Проведены исследования вязкости разрушения материала покрытия для всех образцов. Установлено, что на образцах «твердого вольфрама» с микротвердостью до 8,5 ГПа покрытие не разрушается при индентировании во всем исследованном интервале нагрузок, а на образцах с более высокой твердостью наблюдается разрушение материала покрытия в виде кольцевых трещин около отпечатка ($P = 30 \dots 200$ Н). Необходимо отметить, что при нагрузках выше 30 Н происходит деформация подложки вместе с покрытием.

Таким образом, полученные данные и анализ влияния легирования вольфрама углеродом при их совместном осаждении на величину твердости и коэффициента вязкости разрушения исследуемых образцов, подтверждают возможность управления физико-механическими свойствами (H , E , K_{IC}) и получения твердых карбидовольфрамовых покрытий, обладающих необходимыми прочностными и пластическими характеристиками.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 15-08-01386).

[1] Lakhotkin Yu.V., Kuzmin V.P. Tungsten carbide coatings and method for production the same. Patent US 6.800.383 B1. 05.10.2004.
[2] Aleksandrov S., Lakhotkin Yu., Zhuk Yu. Alloyed tungsten produced by chemical vapour deposition Patent WO/2006/040545. 20.04.2006.

УСПЕХИ В СИНТЕЗЕ И ИССЛЕДОВАНИИ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ – ОРИЕНТАНТОВ

¹Левченко В.А. (vladlev@mail.ru), ²Буяновский И.А., ²Большаков А.Н.,
²Зеленская М.Н., ¹Матвеев В.Н.

¹МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;
²ИМАШ РАН, Москва, Россия.

Представлены результаты исследования по разработке и успешному синтезу наноконпозиционных покрытий – ориентантов. Проведенные испытания полученных покрытий показали, что наноконпозиционные покрытия - ориентанты на основе нитрида титана и алумонитрида титана в сочетании с наноструктурированным монокристаллическим углеродом на закаленной стали имеют низкий коэффициент трения, практически не изменяющийся в широком диапазоне нагрузок.

Ключевые слова: нанотехнологии, синтез, наноконпозиционные покрытия-ориентанты, трибология наноконпозиционных материалов, наноструктурированные покрытия, механизм управления, самосборка молекул, молекулярная динамика, ориентация молекул.

Опыт эксплуатации машин и механизмов показал, что в настоящее время более 90% деталей узлов трения выходят из строя не вследствие поломки, а в результате износа или коррозии. Именно поэтому долговечность машин и механизмов в первую очередь определяется износостойкостью их трибологических узлов.

В последнее время в машиностроении все большее применение находят тонкие покрытия, в частности, для работающих с трением прецизионных деталей машин, измерительного, режущего и деформирующего инструментов. Использование покрытий позволяет обеспечить более высокий ресурс и надежность трибосопряжения, а также расширить границы его работоспособности [1-2]. Конструкционные системы с тонкими покрытиями, в которых внешние силовые воздействия воспринимаются и локализируются не только в материале покрытия, но и в материале основы получили название наноконпозитов [3]. К числу перспективных материалов относятся наноконпозиты с углеродными (алмазоподобными) покрытиями, обеспечивающие высокие физико-химические, прочностные и триботехнические свойства. Ранее было установлено [4-5], что тонкие алмазоподобные покрытия из монокристаллического углерода, обладая сильным ориентационным эффектом, повышают смазочную способность масел при граничном трении. В связи с этим актуально представилось нам дальнейшие исследования фрикционных характеристик наноконпозитов, для поверхностных слоев которых могут быть использованы тонкие наноструктурированные покрытия из монокристаллического углерода. На рис.1 показаны возможные варианты наноконпозиционных покрытий с монокристаллическим углеродом.

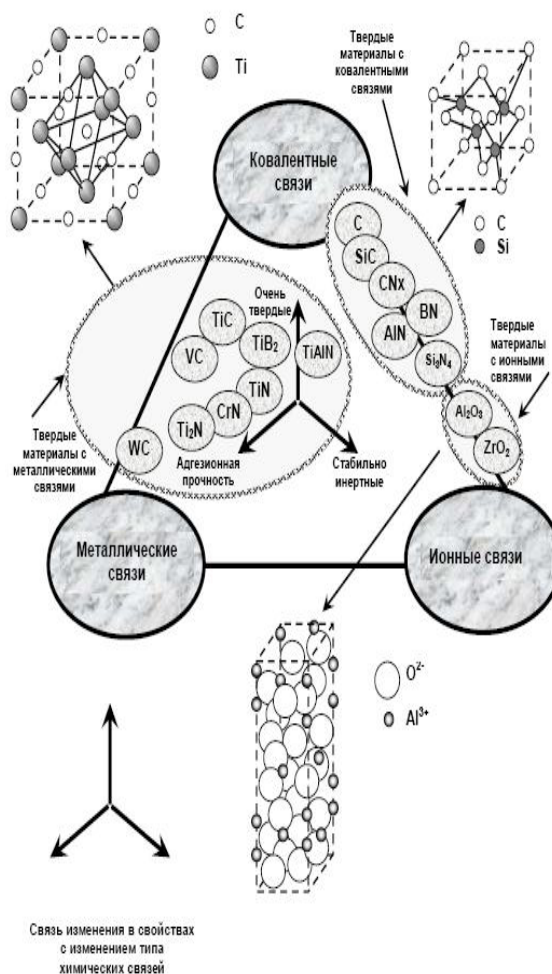


Рис.1 Возможные варианты наноконпозиционных покрытий с монокристаллическим углеродом.

В настоящей работе рассматривается развитие уникального метода синтеза композиционных покрытий на основе наноструктурированных нитрида титана, алюмонитрида титана и алмазоподобного углерода с монокристаллической структурой. Для увеличения скорости осаждения алюмонитридных и нитрид титановых наноструктурированных покрытий использовался PVD метод осаждения, который претерпел некоторые технологические изменения. В результате, на основе специально сконструированных источников синтеза, были получены и исследованы физико-химические и трибологические свойства композиционных наноструктурированных покрытий-ориентантов на основе нитрида титана, алюмонитрида титана и алмазоподобного углерода с монокристаллической структурой. Полученные покрытия имели хорошую адгезию к поверхности модельных образцов.

Для трибологических исследований применялись композиционные покрытия-ориентанты толщиной 1 и 3 мкм. Такой диапазон толщин был выбран исходя из опыта применения твердых композиционных покрытий в современной технике. Атомная структура композиционных покрытий-ориентантов исследовалась в просвечивающем электронном микроскопе JEM 100С в режиме микродифракции. Состав композиционных покрытий-ориентантов контролировался с помощью установки RIBER. Твердость покрытий измерялась методом наноиндентирования с использованием прибора UMIS 2000. Трибологические испытания проводили в двух смазочных средах – нормальном тетрадекане и полиальфаолефиновом масле ПАОМ-4. Испытания в н-тетрадекане проводили на вибрационном трибометре UMT-3MT производства компании CETR при схеме трения «осцилляция шарика по плоскости» (амплитуда - 1 мм, диаметр шарика - 12,7 мм, температура 30°C, нагрузки N на шарик и частоты осцилляций варьировались в диапазоне от 2 до 51 Н и от 1 до 25 Гц, соответственно). Микрометрия и профилометрия пятен износа проводились с помощью инструментального микроскопа ММИ-2, стилусного профиломера TR-200 компании TimeGroupInc; при этом в соответствии с инструкцией производителя трибометра оценивались значения средних диаметров пятен износа шариков (D_M), объемы износов пластин и шариков ($W_{V,i}$), конечные давления в контакте (p_G). Топография поверхности пластин на площадке 5x5 мкм как внутри, так и снаружи пятен износа исследовалась с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) Nanosurf-B.

Оценку влияния структуры и состава каждого исследуемого композиционного покрытия-ориентанта на антифрикционные и противоизносные свойства масла ПАОМ-4 проводили на установке возвратно-поступательного движения ВП-1 по схеме трения неподвижный ролик диаметром 8

мм — возвратно-поступательно перемещающаяся пластина при частоте осцилляций 1 Гц в интервале нагрузок 12,5—50 Н на узел трения и длине хода 30 мм. Продолжительность испытаний при каждой нагрузке составляла 60 минут. Испытания проводили в масляной ванне при комнатной температуре. В процессе испытаний периодически (каждые 10 минут) оценивали коэффициент трения; средний износ пластины измеряли после окончания 60-минутных испытаний при помощи профилографа-профилометра завода “Калибр” модели 201. Топографию изношенной поверхности оценивали на атомно-силовом микроскопе MFP-3D Stand Alone (MFP-3D-SA).

При проведенных трибологических испытаниях композиционных покрытий-ориентантов на основе наноструктурированных нитрида титана, алюмонитрида титана и алмазоподобного углерода с монокристаллической структурой выявлен эффект снижения коэффициента трения с увеличением нагрузки, что говорит о хорошем экранирующем и антифрикционном действии композиционных покрытий-ориентантов. Довольно высокие давления, развиваемые в контакте пары трения, не привели к появлению дефектов покрытия, что говорит о его высокой несущей способности и износостойкости. Проведенные эксперименты показали, что композиционные покрытия-ориентанты на основе наноструктурированных нитрида титана, алюмонитрида титана и алмазоподобного углерода с монокристаллической структурой на закаленной стали имеют низкий коэффициент трения, практически не изменяющийся в широком диапазоне нагрузок. Полученные покрытия сохраняют антифрикционный эффект даже в жестких условиях сухого трения.

[1] Буяновский И.А., Левченко В.А. и др. Современная трибология: Итоги и перспективы. /Отв. Ред. К.В. Фролов, - М.: Изд-во ЛКИ, 2008, с. 476

[2] Дроздов Ю.Н., Буяновский И.А., Левченко В.А., Большаков А.Н., Сипатров А.Г., Зеленская М.Н., Барто Р.В., Матвеенко В.Н. Алмазоподобные покрытия-ориентанты как резерв повышения смазочных свойств масел. Вестник научно-технического развития, 2014, том 86, № 10, с. 23-34

[3] Levchenko Vladimir A., Buyanovskii Ilia A., Matveenko Vladimir N. Multipurpose Nanocomposite Coatings with Set off Tribological Properties. In: Proceeding of the Spring World Congress on Engineering and Technology (SCET 2015), 2015, China, p. 21-26

[4] Vladimir Levchenko, Ilia Buyanovsky, Andrej Bolshakov, Vladimir Matveenko. Green Tribology: Influence of New DLC Coatings-Orientants and Amorphous on Antifriction Properties of Lubricants. Journal of Electrical Engineering, David Publishing Company, USA, 2014, Vol. 2, № 1, p. 39-48

[5] Levchenko V., Buyanovsky I., Zakharov K., Bol'shakov A., Matveenko V. New generation carbon coatings with monocrystalline structure as the promising new method of oil lubricity increasing. In: Proceedings of Malaysian International Tribology Conference 2015, Malaysian Tribology Society (MYTRIBOS) Kuala Lumpur, MALAYSIA, p. 7-8

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КОНТРЕЛА ИЗ СТАЛИ 65Г РАБОТАЮЩЕГО В ПАРЕ С МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИМ ФРИКЦИОННЫМ МАТЕРИАЛОМ МК-5

Лешок А.В., Ильющенко А.Ф., Роговой А.Н.

Государственное научное учреждение Институт порошковой металлургии, Минск, Беларусь.

Создание новых составов металлокерамических материалов на основе меди работающих в условиях смазки предполагает знание особенностей его работы в нормальных условиях, а также при нарушении условий эксплуатации. Исключение из состава материала компонента или его замена, является важной задачей, если учесть, что компонент относится к классу опасных веществ, которым в составе металлокерамического фрикционного материала на основе меди МК-5 является свинец.

Ключевые слова: фрикционный диск, диск стальной, фрикционный материал, трение, износ, коэффициент трения.

Введение. Большинство современных транспортных средств комплектуются узлами трения использующими фрикционные материалы.

Спеченные порошковые фрикционные материалы эксплуатируются при тяжелых условиях, температурах до 950 °С, скоростях скольжения до 80 м/с и давлениях до 5 МПа. Данная группа материалов характеризуется высокой износоустойчивостью и теплостойкостью, механической прочностью.

Каждому составу спеченного порошкового фрикционного материала присущи свои условия эксплуатации (давление, скорость скольжения, работа буксования), при этом обеспечиваются заданные триботехнические свойства материала (коэффициент трения, интенсивность износа). Допустимая рабочая температура фрикционного материала лимитируется его химическим составом. Для наиболее распространенного фрикционного материала на основе меди МК-5 она составляет 200–300 °С при скорости скольжения 10±1 м/с и удельном давлении 4±0,2 МПа.

В процессе эксплуатации фрикционного узла возможно возникновение экстремального режима эксплуатации (недостаточное сжатие пакета дисков при высокой окружной скорости скольжения, так называемый режим «буксования») приводящего к повышению температуры в зоне трения и переносу фрикционного материала. Следствием такого эффекта является потеря работоспособности фрикционного узла, сопряженная с безопасностью и высокими материальными затратами. Следует отметить, что в большинстве случаев металлокерамический материал МК-5 эксплуатируется в условиях смазки. Ее наличие способствует снижению силы трения в 2-10 раз, а интенсивности изнашивания – до двух порядков [1-2].

Цель работы - исследование поверхности диска стального работающего в паре с металлокерамическим фрикционным материалом МК-5 в гидромеханической коробке передач при наличии смазки в случае нарушения условий эксплуатации и наличии следов переноса металлокерамического фрикционного материала.

Результаты эксперимента и их обсуждение.

Используемая в качестве материала диска сталь 65Г относится к классу рессорно-пружинных сталей, а по структурному классу - перлитная. Она отличается повышенным пределом выносливости, упругости, релаксационной стойкости при достаточной пластичности и вязкости. Данные свойства стали достигаются повышенным содержанием углерода, введением марганца, а так же термообработкой структуры на мартенсит отпуска (твердость HRC 28-38). Следует отметить, что мартенсит превосходит промежуточные структуры по сопротивляемости изнашиванию.

Анализируя поверхность диска стального вышедшего из строя в процессе эксплуатации при наработке 145 моточасов можно выделить следующие области: 1-область зуба; 2-область по наружному диаметру; 3-центральная область; 4-область по внутреннему диаметру (рис. 1).



Рис. 1. Области диска стального работающего в условиях граничной смазки в паре с металлокерамическим материалом МК-5.

На поверхности области 1 видны риски от механической обработки (шлифование до требуемой толщины и шероховатости), при этом обнаружено наличие оксида железа, фтора, натрия, серы и кальция, которые присутствуют в составе трансмиссионного масла типа А. Данная область диска стального не участвует в процессе трения, не содержит продуктов переноса фрикционного материала, изменений поверхностного слоя возникаю-

щих в процессе трения, и может являться показателем начального состояния поверхности.

Области 2 и 4 имеют визуальное сходство, явно выраженную шлифованную поверхность с металлическим блеском, без визуально заметных следов переноса фрикционного материала. На поверхностях присутствует явно выраженные следы трения в радиальном направлении высотой 0,8—1,2 мкм. Исследование морфологии поверхности показало наличие локальных участков с микросхватыванием и переносом металлокерамического фрикционного материала МК-5 размером до 10 мкм.

Данный эффект переноса материала характерен для адгезионного износа [4], при котором в результате микропластической деформации формируются ювенильные поверхности, при этом поврежденная кристаллическая решётка легко вступает во взаимодействие с находящейся с ней в контакте решёткой другого тела. В результате взаимодействия формируются адгезионные связи, приводящие к глубинному вырыванию материала с поверхности менее прочного.

Наличие цветов побежалости в области 3 свидетельствуют о возможном температурном перегреве при отсутствии достаточного количества смазки. В данной области установлено максимальное количество мест сваривания.

Область 3 характеризуется наличием следов переноса фрикционного материала, равномерно расположенного на поверхности. Размер участков переноса до 10 мкм вытянутых в направлении трения. Содержание меди доходит до 27%, а содержание олова до 2,8%.

Так же было проведено аналогичное исследование диска имеющего наработку 7000 моточасов и способного к дальнейшей эксплуатации. Микроскопическое исследование поверхности трения показало отсутствие переноса фрикционного материала на диск, при этом микрорентгеноспектральный анализ указал на наличие перенесенного слоя оловянистой бронзы толщиной до 1 мкм.

Таким образом, нарушение условий эксплуатации узла трения приводит к переносу металлокерамического фрикционного материала на диск, в частности к переносу олова и меди. Наибольшее количество элементов присутствует в центральной области контртела. Находящийся в структуре металлокерамического фрикционного материала

свинец, использующийся в качестве антифрикционной добавки при нарушении режимов эксплуатации не обеспечивает функции смазки.

Результаты микроскопического анализа области стального диска под перенесенным слоем фрикционного материала прилегающем к фрикционному слою, микроструктура представляет собой мелкоиглочный мартенсит, микротвёрдостью 60—50 HRC, при ширине слоя до 1 мм и глубине до 100 мкм. По периферии пятна микротвёрдость уменьшается до 40—30 HRC, при глубине слоя до 100 мкм, микроструктура тростосорбит. В объёме материала микротвёрдость составляла 32—26 HRC, микроструктура — сорбит. Формирование структуры закалки говорит о повышении температуры на локальном участке до 780—800 °С (температура нагрева стали 65Г под закалку). Согласно диаграмме состояния медь-олово (7—9%) формирование жидкой фазы возможно при температурах 850—870 °С.

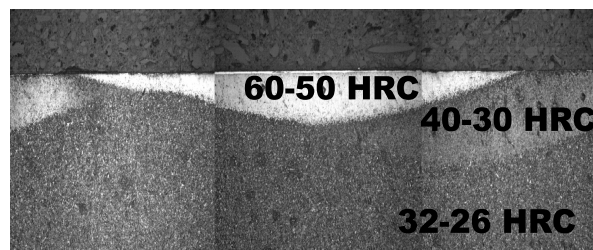


Рис. 2. Распределение микротвёрдости в пятне контакта (×50).

Таким образом обнаружено, что при нарушении условий эксплуатации узла трения в поверхностном слое диска стального происходит образование трех областей с различной травимостью и различной твердостью, что обусловлено, по нашему мнению, структурными, а возможно, и фазовыми превращениями вследствие пластической деформацией и локального повышения температуры.

[1] Ильющенко А. Ф., Лешок А. В., Шаповалова О. А. Исследование триботехнических свойств фрикционного материала МК-5 эксплуатируемого в ГМП БелАЗ полученного по технологии свободно насыпанного слоя // Трение и износ. — 2012 (33), № 5, 500—507.

[2] Шаповалова О. А., Лешок А. В. Анализ отказов фрикционов ГМП и пути их снижения // Механика машин, механизмов и материалов. — 2011, № 3(16), 67—73.

[3] Костецкий, Б.И. Сопротивление изнашиванию деталей машин / Б.И. Костецкий. — М., 1959. — 478 с.

[4] Гаркунов Д.Н. Триботехника. М.: КноРус, 2011.

УСТРОЙСТВО И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТРИБОМЕТРА ТЛПТ-01

¹Лисицын Р.Ю., ²Новиков В.В. (novikov-ww@mail.ru), ²Бурченков К.С.,
²Афанасьева О.В., ^{1,2}Сырбу С.А.

¹Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Иваново, Россия;

²Ивановский государственный университет, Иваново, Россия.

Разработано устройство для изучения процессов граничного трения смазочных материалов в условиях возвратно-поступательного движения с контролируемой температу-

рой смазочной среды. Показаны его функциональные возможности.

Ключевые слова: сила трения, трибометрия, трибометр, граничная смазка, смазочные материалы

Надежное тестирование смазочных свойств масел, трибоактивных присадок является одной из актуальных задач, стоящей машиностроению. В настоящее время существуют большое число испытательных установок, обеспечивающих различные схемы трения [1]. Однако большинство из них не предполагает испытания с нагревом зоны трения. А если нагрев и предусмотрен, но в приборе не предполагается стабилизация температуры зоны трения. Таким образом, создание трибометра, позволяющего надежно изучать зависимость трибологических свойств смазочных материалов от температуры, является актуальным.

Для решения поставленной задачи нами была сконструирована экспериментальная установка по исследованию трения – трибометр с рабочим названием ТЛПТ-01 (трибометр лабораторный поступательный термостабилизированный). Конструкция трибометра (рис. 1) защищена патентом на полезную модель RUS 138016 05.02.2014 [2].

Трибометр ТЛПТ-01 предназначен для испытания материалов на трение при поступательном относительном перемещении образцов, а именно, для воспроизведения явления трения скольжения между материалами образца и контролобразца в среде жидкого, твердого и пластичного смазочного материала. Трибометр ТЛПТ-01 может применяться в лабораториях научно-исследовательских организаций в нормальных условиях окружающей среды для определения силы трения при поступательном относительном перемещении образцов из однородных или разнородных материалов на различных режимах эксперимента.

В состав трибометра ТЛПТ-01 входят следующие составные части: установка испытательная; блок управления приводом и записи силы трения на базе ПК и блок управления нагревом.

Модуль возвратно-поступательного движения стола собран на базе координатного стола SKD-200 с диапазоном рабочего хода 200 мм и нагрузочной способностью до 300 кг. Движение винта осуществляется шаговым двигателем FL57STH56-2804A, обеспечивающим максимальный момент 12.6 кгс-см и угловой шаг – 0,9° и дробление основного углового шага до 0,009°. Для ограничения хода стола и аварийной остановки установлены концевые выключатели.

Блок управления шаговым двигателем SMSD-4.2 позволяет программно управлять перемещением координатного стола по заданной программе с ПК. Это обеспечивает широкий диапазон скоростей поступательного перемещения стола 0...200 мм/мин, и путей трения – 0...100 мм.

Управление приводом можно осуществлять в ручном режиме или с помощью контроллера. Ручной режим служит для предварительной регулировки прибора. Переключение режимов осуществляется тумблером на блоке управления. Рабочим режимом испытаний является управление подачей с контроллера. Программирование контроллера осуществляется с ПК. В программе можно задавать скорость и ускорения подачи, режим паузы, направление движения, длину пути, смену направления движения и т.п. характеристики привода.

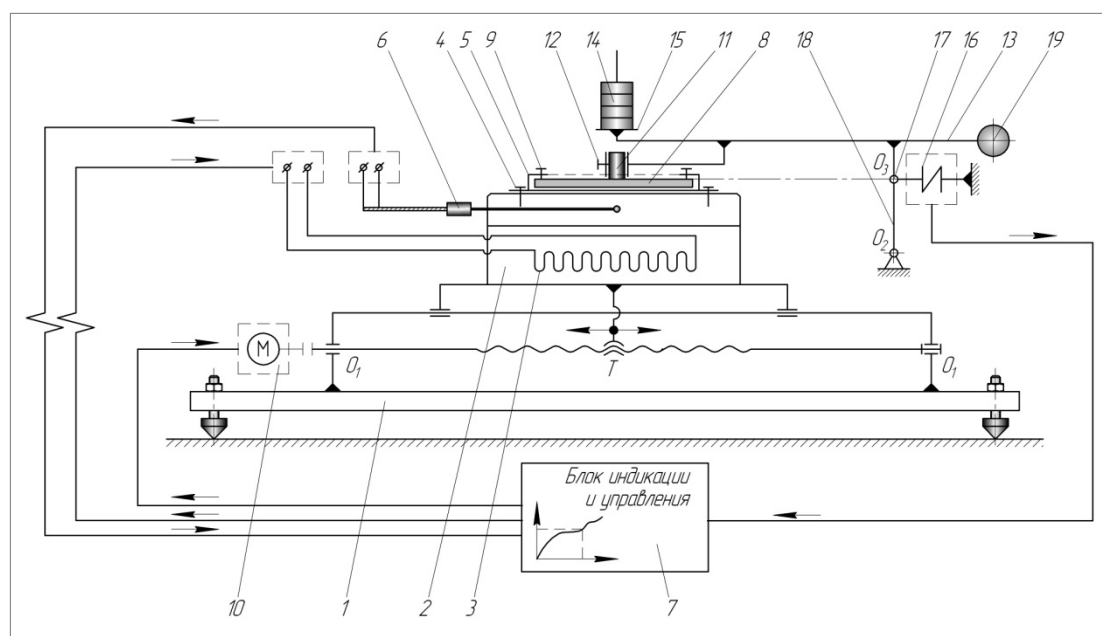


Рис. 1. Схема устройства трибометра ТЛПТ-01:

- 1 — основание, 2 — каретка, 3 — нагревательный элемент, 4 — ванночка, 5 — смазочный материал, 6 — температурный датчик, 7 — блок индикации и управления, 8 — контртело, 9 — держатель контртела, 10 — привод, 11 — испытуемый образец, 12 — держатель образца, 13 — рычажное устройство, 14 — грузы, 15 — опора, 16 — датчик сил, 17 — шарнирное соединение; 18 — шарнирная опора; 19 — противовес.

Сила трения измеряется динамометром. Сигнал с тензодатчика динамометра передается и регистрируется на ПК через СОМ-порт в режиме реального времени с интервалом опроса не более 200 мс. По окончании работы массив данных сохраняется в txt-файле и может и может быть использован для дальнейшего анализа и обработки.

Управление нагревом осуществляется блоком терморегуляции на базе регулятора МЕТА-КОН-523-Т-ТП-1. Сигнал по температуре с термодатчика, опущенной в смазочную ванну, подается на семисторный регулятор, который за счет изменения мощности нагрева позволяет поддерживать заданную температуру. Диапазон температур нагрева — до 200 °С, стабильность — ± 1 °С.

Для проверки работоспособности были проведены тестовые испытания. Результаты тестовых испытаний показали высокую надежность системы, повторяемость результатов экспериментов,

позволили наблюдать явления окисления масла при высоких температурах.

Выводы. Созданная установка обладает заявленным функционалом и позволит изучать явления фазообразования в граничных смазочных слоях на основе изучения изменения свойств смазочного материала от температуры на следующем этапе исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ по проектной части государственного задания вузу № 9.700.2014/К и гранта РФФИ № 15-43-03125 р_центр а.

[1] Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов. Справочник. – М.: Машиностроение, 2008. 384 с.

[2] Устройство для измерения силы трения // Патент на полезную модель RU 138016 Авторы: Новиков В.В., Лисицын Р.Ю., Сырбу С.А. и др. Оpubл. 05.02.2014.

ХИММОТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПЫТАНИЙ И ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК

Любинин И.А. (ialyubin@rosneft.ru)

ООО «РН-Смазочные материалы», Москва, Россия.

Рассмотрены лабораторные методы оценки трибологических характеристик пластичных смазок, испытательные стенды и расчетные методы для определения ресурса эксплуатации подшипников качения. Отмечено, что существующие методы испытаний и расчетные модели не позволяют всесторонне оценить работоспособность смазок в условиях эксплуатации. Применение смазок базируется на накопленном эмпирическом опыте

Ключевые слова: пластичные смазки, трибологические характеристики, подшипники качения, условия эксплуатации

Оценка трибологических и эксплуатационных характеристик пластичных смазок – одна из наиболее важных задач на стадиях разработки и испытаний создаваемых смазок.

Существующие лабораторные методы оценки трибологических характеристик не позволяют прогнозировать поведение смазки в условиях эксплуатации, что предопределяет необходимость дальнейшего проведения стендовых испытаний, более длительных и дорогостоящих.

Наиболее распространенный метод – четырехшариковая машина. В этом методе смазочный материал при оценке противозадирных свойств изначально испытывается в режиме повреждаемости, что не соответствует условиям применения. Пара трения сталь ШХ-15 так же не работает в условиях скольжения и т.д. Поэтому, основное использование метода – оценка показателей, заложенных в нормативно-техническую документацию при производстве и определении качества смазок.

Вибротрибометр SRV разрабатывался как метод оценки масел в условиях фреттинг-коррозии,

что охватывает узкий диапазон применения и небольшой ассортимент смазочных материалов.

Машина трения Фалекс 1, пара трения «штифт- V-образные призмы», используется для определения противозадирных характеристик в условиях скольжения.

Машина трения Тимкен применяется для оценки противозадирных характеристик смазок и масел в условиях скольжения.

Перечень лабораторных методов оценки трибологических характеристик смазочных материалов можно продолжить, но очевидно отсутствие универсального метода, позволяющего соотнести получаемые значения испытаний с реальными параметрами в условиях эксплуатации.

Для возможного проецирования результатов лабораторных испытаний на условия эксплуатации важно определение показателей: P, V, T – нагрузка, скорость, температура на соответствующих материалах пары трения. Такие попытки предпринимались в работах К.И. Климова, М.Д. Безбородько, В.А. Михеева, Г.В. Никулина, но метод не был создан.

Приближением к условиям эксплуатации является этап стендовых испытаний. Так производители подшипников проводят испытания смазок в специализированных стендах на натуральных подшипниках.

Стенд FE8 фирмы FAG применяется для испытания масел и смазок используемых в радиально-упорных шарикоподшипниках, конических роликовых и упорных цилиндрических роликоподшипниках качения. Оцениваются фрикционные свойства и износ. На испытательные подшипники задается осевая нагрузка от 10 до 100 кН, скорость от 7,5 до 3000 мин⁻¹ и температура от -20 до 200° С. Время испытаний 500 ч и более.

Стенд FE9 фирмы FAG используется для определения срока службы смазочного материала. Испытания проводят в радиально-упорном подшипнике при нагрузке 1500 Н, скорости 600 мин⁻¹ и в температурном диапазоне 120 – 200° С. Статистические подсчеты проводят после пяти испытаний в одинаковых условиях.

Фирма SKF использует для оценки смазок в подшипниках качения серию стендов.

Стенд SKF Grease Test Sig BeQuiet+ для оценки шумности смазок;

SKF Grease Test Rig R0F+ для определения срока службы смазок;

SKF Grease Test Rig RHF1 для определения срока службы смазок при высоких скоростях;

SKF Grease Test Rig EMCOR для определения коррозионной стойкости смазок;

SKF Grease Test Rig V2F испытания смазок для буксовых узлов железнодорожных вагонов;

SKF Grease Test Rig R2F для определения механико-динамических характеристик;

SKF Grease Test Rig RST определение смазки на сдвиг.

Проведение длительных и дорогостоящих испытаний необходимо для оценки разработанного образца смазки и не оправдано при поисковых работах. Учитывая большое количество факторов, влияющих на работу смазки в подшипнике качения, очевидно что и в стендовых испытаниях вы-

являются не все составляющие характеризующие смазку.

В существующих расчетных методах определения ресурса подшипников качения составляющая смазочного материала включена только по одному параметру – вязкости : ГОСТ 18855 – 2013 Такой подход объясняется мнением, что только дисперсионная среда обеспечивает работоспособность подшипника качения. Если учесть, что в подшипнике качения реализуется эластогидродинамический или граничный режим трения, в зависимости от условий эксплуатации, то влияние физико-химических и трибологических характеристик смазки также оказывает существенное влияние на долговечность работы узла трения.

Накопленный эмпирический опыт реализуется в общих рекомендациях по применению пластичных смазок, знании свойств загустителей и базовых масел, их реологических, физико-химических и трибологических характеристик. Так в узлах трения работающих при температурах до 120°С чаще всего используют литиевые смазки на нефтяных маслах. При более высоких температурах применяют комплексные литиевые и комплексные кальциевые смазки, а также полимочевинные и бентонитовые. Все более широкое применение находят комплексные сульфонатные смазки. Для экстремальных температур (положительных и отрицательных) в качестве дисперсионной среды используют синтетические масла, а для достижения функциональных свойств смазок используют присадки и наполнители.

В результате оценка смазки осуществляется в условиях эксплуатации, с учетом всех факторов:

- конструктивных особенностей узла трения или оборудования;
- конструкционных материалов, взаимодействующих со смазкой;
- условий эксплуатации (температура, скорость, нагрузка, окружающая среда и др.);
- сроков смены смазки.

ПЛАСТИЧНЫЕ СМАЗКИ С ПОЛИМОЧЕВИННЫМИ ЗАГУСТИТЕЛЯМИ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ В АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

¹Лядов А.С. (lyadov@ips.ac.ru), ¹Шахматова А.С., ¹Максимова Ю.М.,
²Кириллов В.В., ²Окнина Н.В.

¹Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева, Москва, Россия;

²ОАО «Электрогорский институт нефтепереработки», Электрогорск, Россия.

ИНХС РАН совместно с ЭлИИП разработана технология получения пластичных смазок путем загущения базового масла, в том числе и силиконовых жидкостей, ди- и олигомо-чевинами различного строения. Разработана пластичная смазка «Политерм-Арктик» и доказана работоспособность этой смазки в условиях низких температур.

Ключевые слова: пластичная смазка, полимочевина, арктическое материаловедение.

Создание новых смазочных материалов, способных устойчиво работать в экстремальных условиях, является важной задачей, стоящей перед исследователями в нашей стране. Полимочевинные смазки относятся к группе смазочных материалов, работоспособных при высоких нагрузках, широком интервале температур и скоростей, в контакте с агрессивными средами, а также устойчивых к радиационному воздействию. Несомненные преимущества этого типа пластичных смазок могут быть использованы в арктических условиях для обеспечения надежной и эффективной работы узлов трения.

ИНХС РАН совместно с ЭлИНП разработана технология получения пластичных смазок путем загущения базового масла ди- и олигомочевинами различного строения. В ОАО «Электрогорский институт нефтепереработки» введена в 2015 году в строй производственная линия по серийному выпуску пластичной полимочевинной смазки «ПОЛИТЕРМ-АРКТИК» в соответствии с ТУ 0254-046-00151742-2004, которая предназначена для смазки узлов трения в условиях низких температур. Доказана работоспособность этой смазки в интервале температур от +150 до -60°C (по данным независимой экспертизы компании SKF) без ухудшения основных физико-химических показателей, а также удовлетворительная прокачиваемость при -60°C, вследствие чего смазка может быть рекомендована для использования в централизованных системах подачи. Эффективная вязкость смазки при минус 55°C и среднем градиенте скорости деформации 10c^{-1} не превышает 500 Па·с. Пластичная смазка «ПОЛИТЕРМ-АРКТИК» способна заменить применяемые зарубежные смазки

Shell Alvania EP, CASTROL Optitemp TT1 (EP2), Shell Gadus S5 V100, KLUBER ISOFLEX NBU 15, Jet Lube 33 и др. Важным отличием смазки «ПОЛИТЕРМ-АРКТИК» с полимочевинным загустителем является увеличенная длительность работы узла трения до пересмазывания по сравнению с мыльными смазками. В настоящее время мощность ОАО «ЭлИНП» по выпуску пластичных смазок составляет 500 тонн в год и в состоянии удовлетворить полностью потребности РФ в низкотемпературных смазках.

ИНХС РАН и ЭлИНП продолжают исследования по дальнейшему повышению качества арктических смазок. Перспективными базовыми маслами для арктических видов пластичных смазок являются кремнийорганические жидкости, которые отличаются низкими температурами потери текучести (до -110°C), высокой термостойкостью (до 350°C), низким давлением насыщенных паров (0,133 ÷ 133 мкПа), малой летучестью, низкой зависимостью вязкости и других свойств от температуры, высокой гидрофобностью и лиофильностью. Стандартные подходы для загущения кремнийорганических жидкостей не применимы, поэтому был разработан способ загущения этих жидкостей димочевинами различного строения и получены пластичные смазки с улучшенными низкотемпературными свойствами.

Таким образом, используя богатый научный потенциал ИНХС РАН и ОАО «ЭлИНП» решена проблема обеспечения техники, работающей при экстремально низких температурах, высококачественными и надежными пластичными смазками.

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В ТРИБОМЕТРИЧЕСКОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

¹Малафеев С.И. (sim_vl@nm.ru), ²Копейкин А.И.

¹ООО Компания «Объединенная Энергия», Москва, Россия;

²Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия.

Рассматривается модель измерительной колебательной электромеханической системы с управляемой «электрической пружиной». Определены условия параметрического резонанса в системе.

Ключевые слова: электропривод, измерение, резонанс, трение, колебания, управление, модель.

При использовании трибометрических электромеханических колебательных систем особый интерес представляет анализ режимов их работы [1, 2]. Представлены новые результаты исследования резонансного режима колебаний в экспериментальной установке для испытания трибологических характеристик механических подсистем приводов.

Экспериментальная установка для исследования характеристик пар трения содержит синхронный двигатель с постоянными магнитами, одна из обмоток которого (B) подключена к регулируемому

источнику постоянного тока, а другая (A) – к источнику переменного напряжения, частота и амплитуда которого регулируются блоком управления [3]. Первая обмотка выполняет функцию электрической пружины с переменной жесткостью, задаваемой постоянным током, а вторая обмотка создает качающееся магнитное поле, обеспечивающее колебания ротора с постоянными магнитами.

В резонансной области колебания ротора синхронного двигателя могут быть описаны дифференциальным уравнением второго порядка [3]:

$$J\ddot{\theta} + C_3\theta = 0, \quad (1)$$

где J - момент инерции колеблющихся масс; θ - угол поворота ротора; $C_3 = C_3(t)$ - параметр, зависящий от токов обмоток, угла поворота и, следовательно, от времени.

Приближенно параметр $C_3(t)$ определяется по формуле:

$$C_3(t) \approx -M_m \cos \left[\arctg \left(a \frac{i_A}{i_B} \right) - \theta_m \cos(\omega t + \varphi_A) \right], \quad (2)$$

где M_m - максимальный момент синхронного двигателя; θ_m - амплитуда колебаний ротора; φ_A - фазовый сдвиг колебаний тока в обмотке A относительно напряжения на этой обмотке; a - коэффициент пропорциональности.

В диапазоне углов поворота ротора двигателя от 0 до $\pm \frac{\pi}{2}$ уравнение (2) с погрешностью, не превышающей 3%, может быть аппроксимировано выражением

$$C_3(t) \approx -M_m \cos[\theta_1 \cos(\omega t + \varphi)],$$

где θ_1 - амплитуда колебаний; $\varphi = \varphi_A + \varphi_d$; φ_d - дополнительный фазовый сдвиг.

При этом дополнительный фазовый сдвиг φ_d зависит от тока i_A и во всем диапазоне нагрузок не превышает $\frac{2\pi}{45}$.

Величина результирующей фазы колебаний φ устанавливается режимным путем: либо выходным напряжением усилителя мощности U_A , либо подмагничиванием двигателя. Поэтому уравнение (2) с достаточной точностью может быть заменено соотношением $J\ddot{\theta} + \psi(t)\theta = 0$,

где $\psi(t) = \frac{M_m}{JT} \cos[\theta_1 \cos(\omega t + \varphi)] = \Psi_0 - \Psi_m \cos(\omega t + \varphi)$ - периодически изменяющийся параметр (параметр жесткости); Ψ_0 и Ψ_m - соответственно среднее и амплитудное значения переменной составляющей $\psi(t)$, характеризующей глубину модуляции.

Среднее значение переменной составляющей

$$\psi(t) = \frac{M_m}{JT} \int_0^T \cos[\theta_1 \cos(\omega t + \varphi)] dt \approx \frac{M_m}{J} \left(1 - \frac{\theta_1^2}{4} + \frac{\theta_1^4}{64} - \frac{\theta_1^6}{2304} + \frac{\theta_1^8}{147456} \right). \quad (3)$$

Полученные соотношения (2) и (3) позволяют интерпретировать движение системы в установленном колебательном режиме соотношением, выраженным в вариациях амплитуды $\delta\theta_1$, а именно:

$$\delta\ddot{\theta}_1 + K_0^2(1 - \mu \cos \omega t)\delta\theta_1 = 0 \quad (4)$$

или

$$\frac{d^2(\delta\theta_1)}{d\tau^2} + (\alpha - 2\beta \cos 2\tau)\delta\theta_1 = 0, \quad (5)$$

где k_0^2 - среднее значение квадрата частоты свободных колебаний; $\mu = \frac{\Psi_m}{\Psi_0}$ - относительная глубина модуляции периодического параметра; $2\tau = \omega t$; $\alpha = \frac{4k_0^2}{\omega^2}$; $\beta = \frac{2\mu k_0^2}{\omega^2}$.

Уравнение (5) есть известное уравнение Маттье [4]. Его решения могут быть ограниченными или неограниченно возрастающими. Свойства решений выявляются нанесением вычисленных значений параметров α и β уравнения (5) на диаграмму устойчивости Айнса-Стретта [4].

При экспериментальных исследованиях колебательной системы с синхронным двигателем И6615-02 при $I_0=0,2$ А; $\omega_0^2=2390,8$ установлено, что при увеличении частоты f в диапазоне 7,3...7,45 Гц система входит в область параметрического электромеханического резонанса, амплитуда при заданных электрических параметрах привода ограничивается величиной 130° за счет сил трения и нагрузки, а затем при $f=7,5$ Гц вновь входит в область устойчивости. При уменьшении частоты потеря устойчивости происходит в диапазоне 6,75... 6,6 Гц.

Заключение

1. Для систем периодического движения с управляемой электрической пружиной относительная частота ν свободных колебаний нелинейным образом зависит от перемещения в соответствии со скелетной кривой амплитудно-частотной характеристики. Аналитически эта зависимость приближенно может быть описана соотношением $\nu = \frac{\omega_{св}}{\omega_0}$, в котором частота свободных колебаний

$\omega_{св}$ определяется из решения уравнения (3).

2. Причиной нелинейной зависимости относительной частоты колебаний от угла поворота $\nu(\theta)$ является изменение относительной глубины модуляции периодического коэффициента μ , который определяется электромагнитной жесткостью связи статор - ротор двигателя.

3. Модуляция электромагнитной жесткости ограничивает возможный диапазон амплитуд колебаний, в котором возможна работа электромеханической колебательной системы, а также служит причиной возможной неустойчивой ее работы.

4. Уравнение (5) для вариаций амплитуды колебаний позволяет исследовать устойчивость периодической системы по диаграмме Айнса-Стретта.

- [1] Малафеев С.И., Копейкин А.И., Данилов Е.В. Диагностика и оценка ресурса пар трения приводных систем / Контроль, диагностика, 2013, № 7. – С. 59 – 62.
 [2] Малафеев С.И., Копейкин А.И. О диагностике пар трения по интегральным характеристикам / Трение и смазка в машинах и механизмах, 2013, № 2. – С. 30 – 32.

- [3] Копейкин А.И., Малафеев С.И. Управляемые электромеханические колебательные системы. Владимир, Издательство «Посад», 2001. – 128 с.
 [4] Блэкбер О. Анализ нелинейных систем / Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 400с.

ОГРАНИЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЕ ПРОКАТНОГО СТАНА

¹Малафеев С.И. (sim@jpc.ru), ²Малафеева А.А., ¹Коняшин В.И.

¹ООО Компания «Объединенная Энергия», Москва, Россия;

²Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, г. Владимир, Россия.

Рассматриваются результаты исследования динамических нагрузок в мехатронной системе прокатного стана ДУО-300. Установлен вид нелинейной зависимости между нагрузкой и частотой вращения валков. Определены условия возникновения автоколебаний при прокатке. Рассмотрены способы демпфирования автоколебаний и снижения динамических нагрузок.

Ключевые слова: мехатроника, прокатный стан, колебания, демпфирование, регулятор, электропривод, модель.

Введение

Процессы обработки металла на прокатном стане сопровождаются интенсивными колебаниями масс, обусловленными упругостью соединительных валов, зазорами в передачах, трением и ударным характером нагрузки [1, 2]. Вместе с упругими колебаниями моментов происходят колебания давления на валки, что свидетельствует о взаимосвязи механических процессов в прокатном стане с процессами в зоне деформации металла. При этом характер происходящих процессов зависит от структуры и параметров системы управления электроприводом [2, 3].

В настоящей работе представлены результаты исследования динамических процессов в главной линии, рабочих клетях и электроприводе стана

ДУО-300 при прокатке с учётом внутренних связей в системе и способы демпфирования колебаний.

Колебательные процессы в мехатронной системе при захвате слитка

При прокатке металла в мехатронной системе прокатного стана действует положительная обратная связь по скорости, вызванная нелинейным характером зависимости момента технологической нагрузки от частоты вращения [4]. Эта зависимость имеет два участка без наклона (момент нагрузки не зависит от частоты вращения) и один участок с отрицательным наклоном, на котором линейная скорость валков соизмерима со скоростью прокатки (рисунок).

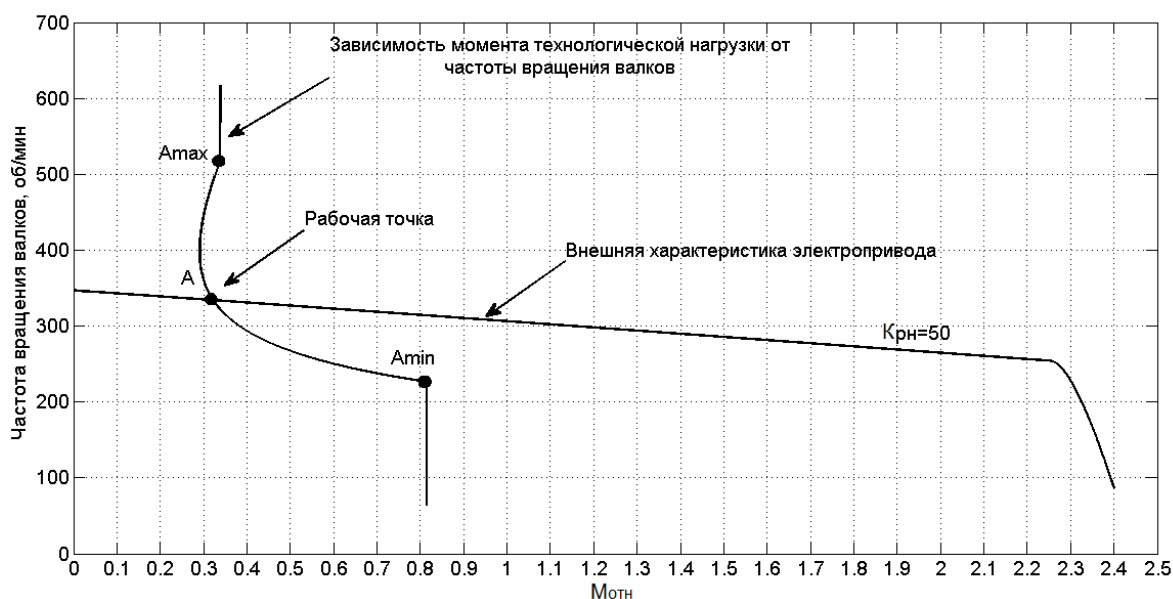


Рис. 1. Зависимость момента технологической нагрузки от частоты вращения валков.

Если рабочая точка в течение процесса прокатки находится на участках без наклона, в системе отсутствует положительная обратная связь (достаточное условие работы электропривода прокатного стана без автоколебаний). Если рабочая точка находится на участке с отрицательным наклоном, то автоколебания возникают только в тех случаях, когда в системе в процессе работы осуществляется переход рабочей точки с участка с отрицательным наклоном на участок характеристики без наклона. Это происходит при захвате слитка в результате резкого снижения частоты вращения двигателя, рабочая точка при этом смещается в сторону участка без наклона. Одновременно в системе развиваются упругие колебания крутящего момента. Рабочая точка периодически переходит из участка с нулевым наклоном на участок с отрицательным наклоном и обратно. Таким образом, в системе развиваются незатухающие колебания скорости. Поведение нелинейной системы определяется начальным этапом захвата.

Демпфирование колебаний в мехатронной системе

Для обеспечения режима работы электропривода без автоколебаний необходимо и достаточно, чтобы рабочая точка в процессе прокатки всегда находилась только на одном участке характеристики технологической нагрузки. Простым способом решения задачи является выбор коэффициента передачи П-регулятора напряжения при настройке электропривода или задание частоты вращения валков непосредственно до прокатки; возможно изменение технологических переменных, таких как скорость прокатки и др.

Эффективным способом обеспечения заданного режима работы системы является стабилизация положения рабочей точки на начальном этапе захвата, т.е. снижение динамических нагрузок при захвате. Это достигается в электроприводе с главной обратной связью по скорости, т.к. при захвате динамические нагрузки минимальны, а электропривод имеет жесткую внешнюю характеристику.

Динамические нагрузки и колебания крутящего момента, возникающие на начальном этапе прокатки, вызваны электромагнитной инерционностью приводного двигателя и наличием люфта в механической передаче. Электромагнитная инерционность приводного двигателя проявляется в относительно медленном нарастании тока в якорной обмотке (электромагнитного момента) при резком увеличении момента нагрузки. Это позволяет рассматривать подчиненный контур тока электропривода как объект управления с большой постоянной времени, а при наличии люфта в механической передаче – как объект управления с транспортной задержкой. Эффективным способом снижения динамических нагрузок в мехатронной системе прокатного стана является использование в контуре тока предиктивного пропорционально-интегрального регулятора (ППИ-регулятора). Такой способ коррекции обеспечивает снижение динамических нагрузок при прокатке более чем в 2 раза.

Заключение

Рассмотренные способы коррекции электропривода постоянного тока прокатного стана ДУО-300 обеспечивают ограничение динамических нагрузок и демпфирование колебаний. Алгоритмы управления электроприводом постоянного тока дискретного стана ДУО-300 использованы на Владимирском заводе прецизионных сплавов.

[1] Верев В.В., Большаков В.И., Юнаков А.М. Модели динамических процессов в прокатных станах // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: Сб. науч. тр. - Вып.19. - Днепропетровск, 2009. - С. 346 – 358.

[2] Малафеев С.И., Малафеева А.А., Коняшин В.И. Компьютерное моделирование процессов при прокатке металлов на стане 300 / Автоматизация в промышленности. 2013, № 7, С. 10 - 13.

[3] Малафеев С.И., Коняшин В.И. Модель мехатронной системы прокатного стана 300 / Вестник машиностроения, 2014, №2. – С. 83 - 87.

[4] Патент РФ № 2544483, МПК H02P 7/06; H02P 7/14; G05B 11/01. Автоматизированный электропривод прокатного стана / С.И. Малафеев, В.И. Коняшин. - Оpubл. 20.03.2015. Бюл. № 8.

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВОСХОДЯЩЕЙ ДИФФУЗИИ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ СТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЕМ ПРИ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ С РЕСУРСНЫМ СМАЗЫВАНИЕМ

Маленко П.И. (malenko@tsu.tula.ru), Леонов А.Ю., Релмасира К.Д.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», Тула, Россия.

При трении диффузия направлена к поверхности трения и относится к восходящему типу. Для равновесных твердорастворных фаз поверхностных слоев причиной восходящей диффузии служат поверхностные термические удары с давлением P , трансформация которых по глубине поверхностного слоя приводит к появлению напряжений расширения с $P_{диф} < P$. Под действием $P_{диф}$ атомы решетки приходят в энергетически активированное состояние, диффундируя по кооперативному или резонансному механизмам.

Ключевые слова: восходящая диффузия, термические удары, трение скольжения с ресурсным смазыванием, метод молекулярной динамики, резонансный механизм диффузии, кооперативный механизм диффузии, термоупругопластичность.

Введение

В трибологической литературе отмечается, что при трении возникающая под действием внешних факторов диффузия направлена в сторону поверхности трения, то есть противоположно действию законов Фика [1]. Подобная диффузия носит название восходящей и объясняется неупорядоченностью твердорастворных фаз [2]. На практике, однако, равновесные фазы встречаются гораздо чаще (пример, пары трения). В этой связи вопрос о причинах возникновения и параметрах восходящей диффузии остается открытым. Между тем данный тип диффузии вызывает в поверхностных слоях структурно-фазовые изменения с отличными от исходного состояния физико-механическими и трибологическими свойствами.

Материалы и методы

В качестве материала для исследований использовалась теплостойкая сталь 25Х3М3НБЦА (процентное содержание α -Fe – 90 %) с нитрированным (карбонитридным) покрытием толщиной $h = 25 \dots 50$ мкм, подвергнутая действию термических ударов (ТУ) “сжатия-расширения” с давлениями $P = \pm(5,6 \dots 16,8)$ ГПа. В качестве исходной базы использовалась диаграмма “напряжение-деформация”, включающая упругие и пластические участки. Исследовалась трансформация давлений ТУ по глубине поверхностного слоя методами теории термоупругопластичности [3]. С целью упрощения решение дифференциальных уравнений рассматривалось на качественном уровне.

Результаты и их обсуждение

В результате исследований была получена трансформационная зависимость продольных напряжений (задача решалась для стержня) от деформаций (рис. 1). Участки PB и P_1B_1 отражают пластическое течение материала, участки DR и D_1R_1 – пластическую деформацию (упрочнение), участок OA – термическую деформацию, остальные участки – упругую деформацию.

Максимальные значения растягивающих напряжений σ будут в точке B_1 . Значения потенциальной энергии, действующей на атом, находятся по формуле [4]

$$E_{nom} = 3\varepsilon P_{diff} V, \quad (1)$$

где $\varepsilon = \frac{P_{diff}}{E}$ – относительная линейная деформация; V – объем атома.

Результаты расчетов для самодиффузии Fe по формуле 1 приведены в табл. 1.

Таблица 1. Энергия E_{nom} для различных температур

T, K	600	800	1000
$\sigma(P_{diff}), GPa$	4,7	9,5	13,48
P, GPa	5,6	11,2	16,8
$E_{nom}, \text{эВ}$	0,02	0,08	0,19
$z \cdot 10^6, \text{м}$	60	40	25
n	20	10	6

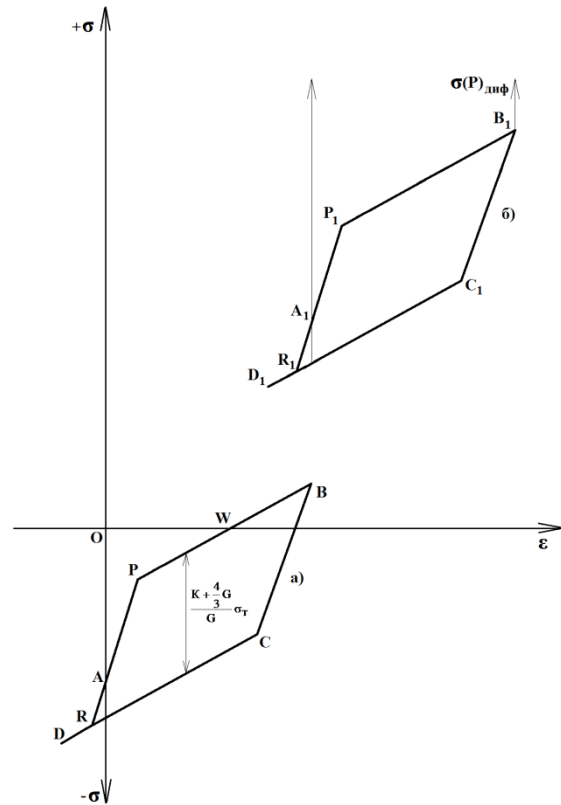


Рис. 1. Зависимость продольных напряжений от деформации: а – при сжатии ($-P$); б – при растяжении ($+P$).

Глубина z действия ТУ (глубина теплосодержащей зоны) определялась по глубине затухания звуковой волны (табл. 1). Энергия связи для α -Fe $E_{cb} = 4,28$ эВ. Так как $E_{nom} \ll E_{cb}$, то для выхода атома из решетки, то есть начала восходящей диффузии, необходимо n ударов ТУ

$$\frac{n(n+1)}{2} = \frac{E_{cb}}{E_{nom}}. \quad (2)$$

Значения n приведены в табл. 1.

Подобный тип механизма восходящей диффузии относится к кооперативному механизму. Помимо кооперативного механизма имеет место и резонансный механизм [5], при котором атомы выходят из решетки за один удар, образуя каскады столкновений.

[1] Любарский И. М., Палатник Л. С. Металлофизика трения. — М.: Металлургия. — 1976

[2] Гегузин Я. Е. Восходящая диффузия и диффузионное последствие // Успехи физических наук. — 1986 (149), вып. 1, 149—159

[3] Новацкий В. К. Волновые задачи теории пластичности. — М.: Мир. — 1978

[4] Борн М., Хуан Кунь. Динамическая теория кристаллических решеток. — М.: Изд-во иностр. лит. — 1958.

[5] Дроздов Ю. Н., Маленко И. П., Маленко П. И. Исследование резонансных процессов в поверхностных слоях пар трения скольжения со смазочным материалом, вызванных термическими ударами // Вестник машиностроения. — 2015, № 2, 44—52

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КЕРАМИЧЕСКОГО НАНОКОМПОЗИТА ГРАФЕН/AL₂O₃

¹Малютин К.В. (akitlov@bk.ru), ^{2,3}Мисоченко А.А., ^{2,3}Столяров В.В.

¹ Университет машиностроения (МАМИ), Москва, Россия;

² Институт машиноведения РАН, Москва, Россия;

³ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия.

Существующие требования к испытаниям на трение и износ керамических и композиционных наноматериалов слабо отражают специфичность свойств и структурного состояния поверхности образцов. В ходе трибологических исследований керамического нанокompозита графен/Al₂O₃ основное внимание уделено условиям и методическим особенностям измерения коэффициента трения и скорости износа.

Ключевые слова: трибология, методические особенности, графен, нанокompозит, корунд, трение, износ.

Введение

Керамический нанокompозит графен/Al₂O₃ является перспективным материалом для различных, в частности трибологических, применений. Исследования трибологических и механических свойств с использованием современных физических методов – важная научная задача, имеющая большое значение для разработки новых перспективных материалов. Спецификой данного композита является высокая твердость, близкая к алмазу и предъявляющая особые требования к выбору материала индентора, а также наноразмер частиц матрицы и наполнителя.

Анализ нормативно-методических документов показал, что испытания материалов на износостойкость в России регламентируют несколько Государственных стандартов [1]. Однако, в этих документах отсутствует методическая информация, необходимая для испытания керамических наноматериалов и нанокompозитов.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования выступали образцы композита графен/Al₂O₃ (Г/Al₂O₃), который был приготовлен мокрым ультразвуковым диспергированием чешуек графена (толщина 5 нм) в нанопорошке Al₂O₃ (45нм) и последующим плазменно-искровым спеканием (1550°C, 10 мин). В результате были получены диски Ø15x2 мм. Содержание графена в композите составляло 0,5, 1 и 2%. В качестве контрольных использовались образцы из Al₂O₃ (0% графена), слесенные в тех же условиях, что и композитные образцы.

Трибологические испытания проводились при помощи трибометра CSM Instruments SA по схеме «палец–диск». В качестве контртела выступали шары Ø6 мм из различных материалов: WC, корунд, рубин. Линейная скорость перемещения контртела по поверхности исследуемого образца составляла $v = 6$ см/с, нагрузка $P = 20$ Н, время испытания $t_k = 3,5$ час. (для кругового движения), и $t_{в-п} = 16$ час. (для возвратно-поступательного движения). Ширина и профиль дорожки износа на образце по окончании трибологического испытания оценивалась при помощи профилометра

НОММЕЛ-ETAMIC T8000. Скорость износа W оценивали по формуле

$$W = \Delta V / t, \quad (1)$$

где – ΔV объем дорожки трения, определяемый на профилометре, мм³; t – время износа, мин.

Результаты и обсуждение

Измерения проводились в два этапа, на одном и том же наборе образцов. Измерения шероховатости во время первого этапа показали, что шероховатость поверхности образцов сильно различается (R_a от 0,11 мкм до 0,38 мкм). Перед вторым этапом измерений поверхность образцов была подготовлена более тщательно, и шероховатость всех образцов приведена к величинам $R_a = 0,12 \pm 0,02$ мкм.

Качественно характер зависимости коэффициента трения на обоих этапах не изменился. Значения коэффициента трения для образцов с сильно уменьшенной шероховатостью увеличились на ~ 15%. Был выявлен также ряд других особенностей. Скорость износа образцов без графена составила $0,3-0,5 \cdot 10^{-3}$ мм³/мин, что на 3 порядка больше, чем с добавлением графена ($< 2 \cdot 10^{-6}$ мм³/мин).

Было обнаружено также, что на образцах без графена смена направления движения от возвратно-поступательного к круговому приводит к резкому увеличению износа образца и контртела. При этом коэффициент трения имеет тенденцию к постоянному слабому росту. Вероятно это связано с абразивным влиянием продуктов износа, оказывающих воздействие на поверхность, как образцов, так и контртел. В случае возвратно-поступательного движения индентора продукты износа уносятся из рабочей области и в дальнейшем не участвуют в процессе износа. При круговом движении продукты износа постоянно вновь попадают в область взаимодействия образца и контртела, что приводит к усилению износа что, в свою очередь, приводит к постепенному увеличению коэффициента трения. Замена индентора с WC на более твердый (корунд, рубин) привела к резкому уменьшению величины износа образцов. Несмотря на низкую скорость износа коэффициент трения исследованных образцов находился в интервале 0,4-0,8 в зависимости от содержания графена.

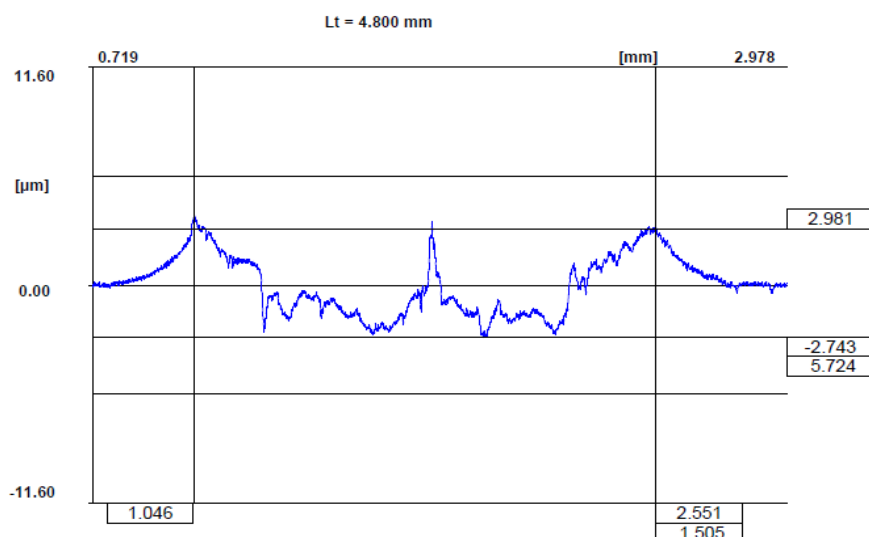


Рис.1. Профилограмма дорожки износа образца с 0% графена, возвратно-поступательное движение контртела.

В работе [2] показано, что добавление графена приводит к упрочнению материала образцов, как за счёт упрочнения самих зёрен, так и за счёт упрочнения по границам зёрен.

Таким образом, в образцах без графена происходит значительный износ обоих тел, что, в случае кругового движения, усугубляется воздействием продуктов износа. В образцах с добавлением графена разрушения материала практически не происходит, что снижает износ обоих тел до экстремально низких значений. Также влияние оказывает и действие графена, как смазочного мате-

риала – коэффициент трения графеновых композитов ниже на 10-20%, чем у контрольных образцов.

Заключение

Таким образом показано, что для трибологических испытаний и получения объективных данных по износу нанокompозита с высокой твердостью важными условиями являются: материал индентора и направление его движения.

[1] ГОСТ 30480-97 «Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость. Общитребования»

[2] Kim, H. J. et al., Unoxidized Graphene/Alumina Nanocomposite: Fracture- and Wear-Resistance Effects of Graphene on Alumina Matrix, Scitif. Rep.4, 5176 (2014).

ТУННЕЛЬНОЕ БЕСКОНТАКТНОЕ ТРЕНИЕ МЕТАЛЛОВ

Мандель А.М., Ошурко В.Б., Соломахо Г.И., Соломахо К.Г., Шарц А.А. (schtscha@yandex.ru)

ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН», Москва, Россия.

Рассмотрен механизм трения для проводящих материалов, занимающий промежуточное положение между обычным контактным и бесконтактным радиационным трением.

Ключевые слова: бесконтактное трение проводников, квантовомеханический подход.

Как известно, основная трудность при теоретическом рассмотрении трибологических задач – чрезвычайное обилие различных факторов и конкурирующих механизмов, влияющих на конкретную ситуацию. При этом термин «сила трения» включает практически любой механизм взаимодействия контактирующих поверхностей. Диапазон простирается от чисто геометрического соприсосновения шероховатостей до плазменных процессов, возникающих в паре трения при больших относительных скоростях[1,2,3]. Но что должны непременно содержать все такого рода взаимодействия, так это механизм необратимых потерь механической энергии. По этой причине силы трения

не вписываются в картину классической механики, где все силы консервативны.

В рассматриваемом случае обмен импульсом в паре трения осуществляют туннелирующие через пространство электроны. Такой механизм аналогичен вязкому трению в жидкости.

Расчёт силы трения проводился как по классической схеме модели идеального электронного газа, так и с помощью квантовой механики. Результаты, полученные обоими методами, в основных чертах совпали, но есть и различия. То есть в основе неконсервативности бесконтактного трения лежат квантовые эффекты.

У нас речь идёт только о сухом трении материалов с металлической связью. При плотном кон-

такте таких тел трение связано с износом контактирующих поверхностей. Наиболее последовательно современные представления об этом виде трения изложены в монографии [4]. Характерный масштаб элементарного акта трения примерно соответствует энергии связи иона в кристаллической решётке Ea^3 , где E - модуль Юнга, a - период решётки. Такой же результат даёт оценка $\lambda\rho a^3$, где λ - удельная теплота плавления, ρ - плотность. На противоположном полюсе лежит радиационный механизм бесконтактного трения. При настолько неплотном контакте в паре трения, что ширина потенциального барьера между контактирующими поверхностями исключает возможность туннелирования массивных частиц, основным механизмом потерь энергии становится обмен фотонами [5]. В силу эффекта Доплера импульс фотона, вылетающего в направлении движения слайдера, несколько превышает импульс фотона в противоположном направлении, и это обуславливает потерю импульса слайдера, то есть силу трения. Обычно такого рода сила в макро-масштабе пренебрежимо мала.

В нашей работе речь идёт о промежуточной ситуации, когда характерная ширина промежутка между трущимися поверхностями не превышает нескольких периодов решётки. В этом случае могут туннелировать и электроны, и в результате возникает сила трения, аналогичная вязкому трению в жидкости, только здесь продольный импульс переносят не молекулы, а электроны. Такой механизм трения, оставаясь бесконтактным может давать заметную величину трения, а рассматриваемый механизм может быть доминирующим даже при относительной малости электронных потоков. Поскольку туннельный эффект - основа данного механизма, то природа неконсервативности здесь является квантовой.

Цель предлагаемой работы - дать аналитические оценки силы трения в рамках рассматриваемого механизма двумя путями: в квазиклассическом приближении и в квантовомеханическом.

Отвлекаясь от очевидного механизма квазиклассического приближения, рассмотрим квантовомеханический расчёт, полагая электроны дебройлевскими волнами. Нормальный к поверхности раздела компонент потока вероятности в расчёте на один локализованный в слайдере электрон можно записать в виде

$$j_z^* = \frac{i\hbar}{2m} \left(\psi \frac{\partial \psi^*}{\partial z} - \psi^* \frac{\partial \psi}{\partial z} \right),$$

где $\psi(z)$ - волновая функция электрона, туннелирующего из слайдера в подложку. Используем одномерное приближение, тогда внутри слайдера ($z < z_1$) сумма падающей и отражённой волн

$$\psi(z) = A \left[u_{kz}(z) \exp(-ik_z z) + R u_{kz}^*(z) \exp(ik_z z) \right]$$

где u_{kz} - блоховские функции в материале слайдера с периодом a , нормированные на единицу, R - коэффициент отражения, $k = (2mE_z)^{1/2}/\hbar$, где E_z - энергия нормального к границе движения, A - постоянная нормировки.

В пространстве между слайдером и подложкой ($z_1 < z < z_2$)

$$\psi(z) = AB_1 \exp \left[-\frac{z}{\hbar} (2m(A_e + E_F - E_z))^{\frac{1}{2}} \right] + AB_2 \exp \left[\frac{z}{\hbar} (2m(A_e + E_F - E_z))^{\frac{1}{2}} \right].$$

И наконец, в подложке ($z < z_2$)

$$\psi(z) = A G u'_{kz}(z) \exp(-ik_z z),$$

где u'_{kz} - блоховские функции в подложке, G - коэффициент прозрачности барьера.

У не атомарно-гладких поверхностей ширина туннельного промежутка между слайдером и подложкой $\Delta z = z_2 - z_1$ значительно превышает e_0 характерную глубину проникновения электрона в потенциальный барьер высотой A_e . Для достаточно широкого потенциального барьера $B_2 = 0$, коэффициент прозрачности экспоненциальный

$$G = \exp \left[-\frac{\Delta z}{\hbar} (2m(A_e + E_F - E_z))^{\frac{1}{2}} \right].$$

Тогда для потока вероятности в расчёте на одну частицу, проникающую через потенциальный барьер в подложку, оценка даёт зависимость

$$j_z^* = \frac{\hbar k_z}{m} |A|^2 G^2.$$

Одна частица на объём слайдера Ω приходит-ся когда $A = \Omega^{-1/2}$, и тогда поток вероятности на один туннелировавший электрон

$$j_z^* = \frac{(2mE_z)^{\frac{1}{2}}}{m\Omega} \exp \left[-\frac{\Delta z}{\hbar} (2m(A_e + E_F - E_z))^{\frac{1}{2}} \right]$$

После интегрирования плотность состояний, то есть число состояний туннелирующих электронов в расчёте на единицу поперечного движения

$$\rho(E_z) = \frac{4\pi}{3} \frac{1}{2} \frac{2}{(2\pi\hbar)^3} \frac{\Omega m}{p_z} \int_{-\infty}^{+\infty} dp_x \times \int_{-\infty}^{+\infty} dp_y f(E_z + E_r) [1 - f(E_z + E_r)]$$

где p_x, p_y - импульсы, а E_r - энергия поперечного (латерального) движения соответственно.

Здесь смысл отдельных сомножителей следующий: $4\pi/3$ - поправка, преобразующая сферу Ферми в импульсном пространстве в куб с ребром p_F , чтобы выделить состояния с определёнными импульсами. Множитель $1/2$, так как из состояний с фиксированным модулем p_z нам нужна половина, что аналогично множителю $1/2$ в классическом случае. Двойка в числителе третьего множителя связана с двумя спиновыми ориентациями электрона, а знаменатель - объём ячейки в фазовом пространстве состояний. Переход из занятого состояния в слайдере в свободное состояние в подложке задаётся функциями Ферми

$$f(E) = \left[1 - \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right) \right]^{-1}.$$

После вычисления интеграла по E_z плотность состояний приводится к виду

$$\rho(E_z) = \frac{2}{3\pi\hbar^3} \frac{\Omega m^2}{(3mE_z)^{1/2}} kT.$$

Таким образом, полное число электронов, туннелирующих из слайдера в подложку в секунду

$$N = \int_0^{E_F} dE_z \int_S dS(\Delta z) \rho(E_z) j_z^*,$$

что можно привести к виду

$$N = \frac{mkT}{3\pi\hbar^2} \frac{S}{h} \int_0^{E_F} dE_z (2m(A_e + E_F - E_z))^{-1/2} \times \exp\left[-\frac{2\Delta z}{\hbar} (2m(A_e + E_F - E_z))^{1/2}\right]$$

Этот интеграл вычисляется точно. Умножая его на средний продольный импульс mu , переносимый одним электроном, приходим (полагая в силу экспоненциального подавления, что

$$\exp\left[-\frac{2\Delta z}{\hbar} (2mE_F)^{1/2}\right] \ll 1),$$

к выражению для силы трения

$$F = \frac{S mukT}{h 6\pi\hbar\delta} \exp\left[-\frac{2\Delta z}{\hbar} (2mA_e)^{1/2}\right],$$

где δ – минимальное расстояние между слайдером и подложкой (порядка постоянной решётки), а h – среднее расстояние между ними, равное средней высоте шероховатостей.

Численные коэффициенты в квазиклассическом и квантовом рассмотрении практически одинаковы, но физически значимое отличие состоит в том, что множитель перед экспонентой в квантовом случае более чувствителен к геометрии контактирующих поверхностей, а в классическом – к структуре потенциального барьера.

Простая численная оценка величины полученной силы для $h \sim 10^{-7}$ м, $u \sim 0,1$ м/с, $T \sim 300$ К, $\delta \sim 10^{-10}$, даёт для касательного напряжения $\sim 3 \cdot 10^{-3}$, а для атомарно-гладких поверхностей ($h \sim 10^{-10}$), $F/S \sim 3$ Н/м², то есть вполне макроскопические значения.

Таким образом, причиной необратимых потерь при бесконтактном трении металлов может служить чисто квантовое явление – туннельный эффект.

[1] Григорьев С.Н., Мандель А.М., Ошурко В.Б., Соломахо Г.И., Веселко С.Г. О механизме уменьшения трения наноразмерных многослойных покрытий // Металлофизика.- Новейшие технологии.- 2013 (35), №7, 933-942

[2] Grigor'ev S.N., Lanovoi O.V., Mandel A.M. et al. On mechanism of Decreasing Friction in Coatings of Transition Metal Dichalcogenides Due to Effect of Radiation // J. Friction and Wear. - 2013, № 34, 238-243

[3] Mandel A.M., Oshurko V.B., Solomakho G.I., Veselko S.G. A Simple Theory of Electrically Induced Dry Friction // 15th Conference «Research and Development in Mechanical Industry» RaDMI.-2015.- А. 33.

[4] Popov Valentin L. Contact Mechanics and Friction. - Berlin: Springer Science and Business Media.- 2010

[5] Волокитин А.И., Дж.Перссон Б.Н. Дж. Радиационная передача тепла и бесконтактное трение между наноструктурами // УФН. – 2007 (177), №9, 921-951.

РОСТИСЛАВ МИТРОФАНОВИЧ МАТВЕЕВСКИЙ – ГЛАЗАМИ СЫНА

Матвеевский В.Р. (v.matveevsky@mail.ru)

ООО «ММК» (Системы и комплексы диагностики), Москва, Россия.

Воспоминания Матвеевского В.Р. об отце, выдающемся отечественном ученом - трибологе, Ростиславе Митрофановиче Матвеевском. Кратко описываются с приведением сохранившихся фото детские годы отца, учёба в школе и институте, женитьба, участие в боевых действиях во время войны, семейные отношения, рождение и воспитание сыновей, работа после демобилизации из армии в ИМАШ. Особое внимание уделяется становлению характера Ростислава Митрофановича и качествам, способствовавшим формированию его, как учёного.

Ключевые слова: родители, детство, юность, учёба, женитьба, тяжёлое ранение, сыновья, научная работа, черты характера, спорт.

Введение

Доклад посвящён жизненному пути выдающегося ученого - триболога, заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, Лауреата премии Совета министров СССР, профессора, доктора технических наук Матвеевского Ростислава Митрофановича (1916 – 2001 гг.), 100 - летию с дня рождения которого отмечается в этом году.

На основе рассказов самого Р.М. Матвеевского о себе и своей жизни; бережно хранимых в семье воспоминаний его матери Гермионы Анатольевны о детских и юношеских годах ученого; впечатлений от общения с отцом сыновей; фотографий из архива семьи, а также документов, имеющих историческое значение, в докладе воссоздаются основные периоды жизни Ростислава

Митрофановича, этапы становления его, как ученого, от рождения в г. Вятка в декабре 1916 г. до самой его смерти в Москве в 2001 г.

Детство и юность.

В этом разделе доклада рассказывается о детских годах Ростислава Митрофановича, которые пришлось на тяжелые времена - гражданская война и разруха в стране. Опорой, другом и помощником для рано оставшегося без отца мальчика (отец умер от тифа в 1918 г.) стала его мать, которая, несмотря на все трудности, смогла не только воспитать достойного человека, но ее поддержка во многом сделала возможным его становление в будущем, как талантливого ученого.

Показывается, что семья жила трудно, много переезжала с места на место (в связи с тем, что мать была актрисой драматического театра), часто испытывая материальные трудности, и, тем не менее, этот период закалил характер мальчика. Переезд в Москву (1928 г.) открыл перед юношей новые возможности. Успешная учеба, занятия спортом, участие в школьном драмкружке – все это, во многом определило его дальнейшую судьбу. Фотографии из семейного архива иллюстрируют этот период жизни Р.М. Матвеевского.

Учёба в институте. Личная жизнь.

Показывается разносторонность интересов Ростислава Митрофановича во время обучения в Московском текстильном институте, знакомство с будущей супругой Таисией Александровной Соколовой (студенткой института связи) и женитьба на ней 19 июня 1940 года практически за год до начала Великой отечественной войны. (Также иллюстрируется фото из семейного архива.)

Война. Первые послевоенные годы.

Рассказывается об участии командира взвода лейтенанта Р.М. Матвеевского, в Великой Отечественной войне, в составе частей Северо-Западного фронта, тяжёлом ранении, длительном лечении в госпитале и продолжении службы, но уже как инженера-механика, а затем начальника механического цеха танкового завода. О воинских наградах, о рождении 2-х сыновей, о демобилизации в конце 1946 г. и поступлении на работу в ИМАШ, о личной трагедии, наложившей

отпечаток на его дальнейшую судьбу (неизлечимая болезнь супруги – Таисии Александровны).

Черты характера. Воспитание сыновей.

В этом разделе раскрываются основные черты характера Ростислава Митрофановича, как учёного, отца и воспитателя двух сыновей. Рассказывается о том, что, несмотря на жизненные невзгоды, Ростислав Митрофанович не только не падал духом, но и с колоссальной самоотдачей погрузился в научную работу в ИМАШ, чему способствовали присущие ему: стремление ко всему новому, неуёмная жажда знаний, целеустремлённость и настойчивость, умение доводить начатое дело до конца. Именно эти черты характера и позволили Ростиславу Митрофановичу получить ряд научных достижений, представленных как в виде кандидатской и докторской диссертаций, так и других теоретических и экспериментальных исследованиях, принесших ему мировую известность.

Рассказывается о волевых качествах характера и стремлению к физическому совершенству. Эти качества проявлялись, в частности, в его занятиях в течение всей жизни различными видами спорта (гимнастика, лыжи, волейбол, плавание и др.). Этому он постоянно учил своих сыновей, личным примером прививая им: любовь к спорту, туризму, рыбалке, учил понимать и любить природу, т.е. - всему тому, что было неотъемлемой частью его собственной жизни.

Подчеркивается и иллюстрируется фотографиями из семейного архива, что поддерживать высочайшую работоспособность Ростиславу Митрофановичу помогал не только спорт, но и непосредственное общение с природой. Всю свою жизнь в редкие дни отдыха он находил время для прогулок и выездов на природу. Во время отпуска со всей страстью отдавался рыбалке, приучив к ней сыновей, предпочитая любым другим местам озеро Селигер. В заключение отмечается, что заслужив мировую известность, и на работе и в семье Ростислав Митрофанович Матвеевский оставался очень скромным, сдержанным и немногословным человеком. Никогда не афишировал своих научных успехов и наград. Был требователен к себе, и весьма сдержан в отношении оценок своих достижений.

К ВОПРОСУ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ ПРИ КОНТРОЛЕ ИЗНОСА ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДАМИ БОРТОВОЙ ТРИБОДИАГНОСТИКИ

Матвеевский В.Р. (v.matveevsky@mail.ru), **Матвеевский Б.Р.**

ООО «ММК» (Системы и комплексы диагностики), Москва, Россия.

Предложен, разработанный и запатентованный в РФ комплекс малогабаритных, встроенных приборов «ВЕКТОР» («Встроенный единый комплекс трибодиагностики оборудования различного назначения»), который предназначен для определения износа узлов трения и прогнозирования остаточного ресурса технологического оборудования в режиме

реального времени. Рассматриваются структуры построения приборов комплекса, принципы работы применяемых датчиков, приводятся технические характеристики в сравнении с зарубежными аналогами.

Ключевые слова: трение, износ, трибодиагностика, контроль, встроенный, бортовой, комплекс, приборы.

Доклад посвящен вопросам разработки и внедрения встроенных (бортовых) малогабаритных систем для оценки технического состояния технологического оборудования, машин и механизмов, используемых в самых различных отраслях отечественной промышленности, путем анализа продуктов износа в системе смазки в любой момент их эксплуатации.

На базе краткого анализа известных методов диагностики износа (спектральный, гранулометрический, ферро-графический, фотометрический, встроенный /бортовой/ контроль и ряд других) и построенных на их применении приборов и систем делается вывод о перспективности встроенных (бортовых) систем контроля, т.к. их использование позволяет следить за износом оборудования в реальном времени, не останавливая рабочий процесс. Как следствие, при этом происходит и экономия денежных средств, поскольку при наличии таких систем нет необходимости отправлять оборудование на ремонт по регламенту, который иногда просто не требуется, в частности, при простоях этого самого оборудования.

В качестве альтернативного варианта существующим (выпускаемым серийно) зарубежным системам встроенного контроля: Diamas (США), MetalSCAN (Канада) и некоторым другим, предлагается для использования в различных отраслях российской промышленности, разработанный фирмой «ММК» (Системы и комплексы диагностики) и запатентованный в РФ, комплекс приборов «ВЕКТОР» («Встроенный единый комплекс трибодиагностики оборудования различного назначения»).

Малогабаритные, встроенные (бортовые), контрольно-диагностические приборы комплекса «ВЕКТОР», позволяют пользователю получать информацию об изношенности деталей того или иного оборудования, без остановки этого оборудования и его разборки (т.е. в реальном времени), определяя размер, тип и концентрацию изношенных частиц как чёрных, так и цветных металлов и

сплавов в маслосистемах любых эксплуатируемых механизмов.

В докладе рассматриваются варианты структур построения приборов комплекса, в состав которых входят датчики накопительного и/или проточного типов, устанавливаемые в систему смазки механизма, и контрольно-диагностический блок (КДБ) обработки сигналов и индикации.

Описывается алгоритм функционирования блока (КДБ), на дисплее которого высвечивается, соответствующая информация о концентрации и/или размерах изношенных частиц и их материале (Fe, Pb, Sn, Al) в зависимости от варианта построения самого блока.

Рассматриваются конструктивные особенности установки датчиков того или иного типа в маслопровод диагностируемого механизма и блока КДБ (патенты РФ), в котором предусмотрено подключение к ПК для графического представления данных об износе узлов трения и прогнозирования остаточного ресурса работы этих узлов (или оборудования в целом) с использованием разработанного программного обеспечения.

Представлены результаты экспериментальных исследований и технические характеристики приборов комплекса «ВЕКТОР» в сравнении с характеристиками зарубежных аналогов. Проведённый анализ позволяет сделать вывод о возможности импортозамещения известных зарубежных систем приборами предлагаемого комплекса при их серийном производстве в РФ.

В заключении приводятся также и положительные оценки разработанного комплекса приборов «ВЕКТОР» (бронзовая и серебряная медали), полученные на Международных Салонах изобретений, новой техники и технологий, соответственно, «Женева–2009» (Швейцария) и «АРХИМЕД-2010» (Москва), которые придают нам уверенность в необходимости скорейшего решения проблемы внедрения предложенного комплекса.

ЗАМЕНА БРОНЗ НА АЛЮМИНИЕВЫЕ ЛИТЕЙНЫЕ СПЛАВЫ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ МОНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

¹Миронов А.Е., ¹Гершман Е.И. (igershman@gmail.com), ¹Гершман И.С.

¹Акционерное общество «Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», Москва, Россия.

Проведен комплекс исследований и испытаний опытных алюминиевых антифрикционных сплавов в сравнении со стандартной бронзой марки БрО4Ц4С17. Определены механические и триботехнические характеристики 8 сплавов с различным легированием алюми-

ниевой основы в сравнении со стандартной бронзой. Показана связь свойств сплавов с их химическим составом. Определены оптимальные уровни легирования алюминия б элементами для получения необходимых механических и триботехнических свойств.

Ключевые слова: алюминиевые антифрикционные сплавы, бронза, механические свойства, прочность, твердость, триботехнические свойства.

Проведен комплекс работ по замене бронзовых литых монометаллических подшипников скольжения на алюминиевые сплавы на основе системы Al-Sn. Такая замена обеспечивает снижение массы каждого подшипника в 2,5 – 3 раза при снижении стоимости единицы массы детали в 2,7 – 2,9 раза. Это делает производство таких подшипников экономически выгодным.

Цель работы состояла в том, чтобы с помощью сложного легирования алюминия обеспечить триботехнические свойства лучше, чем у бронзы, а механические свойства, в основном прочностные, не хуже, чем у бронзы.

Было проверено 8 экспериментальных сплавов с разными вариантами легирования алюминия. Составы сплавов и бронзы приведены в таблице 1.

Таблица 1. Химические составы экспериментальных алюминиевых сплавов и бронзы.

Сплав	Содержание элементов, % масс.								
	Sn	Pb	Cu	Zn	Mg	Si	Ti	Fe	Al
1	8,7	3,2	3,4	2,9	0,4	0,5	0,03	0,08	ост
2	11,0	2,6	3,9	2,6	-	0,1	0,01	0,07	ост
3	9,8	2,5	4,5	2,4	1,2	0,6	0,03	0,13	ост
4	9,6	3,2	4,9	4,4	0,3	0,1	0,02	0,09	ост
5	6,4	3,0	4,1	1,9	1,4	0,9	0,01	0,08	ост
6	5,4	2,6	3,5	2,3	1,7	0,8	0,03	9,10	ост
7	5,8	2,7	4,1	2,3	1,5	1,5	0,03	0,14	ост
8	7,6	3,3	4,0	0,5	-	1,0	0,06	0,12	ост
БрО4Ц4С1 7	4,1	16,9	Ост	3,8	-	-	-	0,12	Ост

Экспериментальные сплавы показали достаточный уровень механических свойств (таблицы 2, 3). Экспериментальные сплавы имели достаточный уровень механических свойств.

В литом состоянии все экспериментальные сплавы имеют значение прочности выше, чем у бронзы. Однако после термообработки прочность трех сплавов уступает значениям прочности бронзы на 3-8 %, что можно признать удовлетворительным.

Таблица 2. Пределы прочности (σ_b) и твердости (НВ) экспериментальных сплавов и бронзы в литом состоянии и после термической обработки (Т/О).

Сплавы	σ_b , МПа		НВ	
	Литые	Т/О	Литые	Т/О
1	168	168	50	60
2	151	173	56	59
3	162	163	77	74
4	187	185	65	63
5	183	136	73	55
6	171	144	74	53
7	187	140	78	55
8	151	159	53	50
БрО4Ц4С17	146	148	70	65

Таблица 3. Относительное удлинение при растяжении (δ) и ударная вязкость (КСu) экспериментальных сплавов и бронзы в литом состоянии и после термической обработки (Т/О).

Сплавы	δ , %		КСu, кДж/м ²	
	Литые	Т/О	Литые	Т/О
1	4,4	5,5	71	83
2	9,5	2,9	119	121
3	0,4	0,3	28	21
4	1,7	3,8	50	50
5	0,9	2,3	24	35
6	0,9	2,9	23	32
7	0,6	1,9	17	24
8	4,1	4,0	48	45
БрО4Ц4С17	4,4	8,8	28	40,0

В литом состоянии половина экспериментальных сплавов имеет твердость выше, чем у бронзы, а после термообработки – только один сплав. Однако авторы считают, что снижение твердости у экспериментальных сплавов по сравнению с бронзой может являться в определенных пределах, положительным фактором.

Важно, что экспериментальные сплавы превосходят бронзу по комплексу триботехнических характеристик (таблицы 4, 5).

Таблица 4. Нагрузка задира (Р), площадь контакта при обработке (S), Износ антифрикционного материала (I_m).

Сплав	Р, Н	S, мм ²	I _m , мг
1	2407	50,0	2,4
2	1650	49,8	1,2
3	2832	57,8	0,7
4	2107	42,8	2,0
5	2767	53,0	0,9
6	2825	49,7	0,5
7	2330	39,7	0,4
8	1823	46,8	0,5
БрО4Ц4С17	1081	39,2	2,7

Таблица 5. Износ стального контртела (I_s), Средний момент трения при испытаниях на износ (М), Средняя температура стали при испытаниях на износ (Т_s).

Сплав	I _s , мг	М, Н·м	Т _s , °С
1	0,8	0,293	32
2	0,6	0,270	33
3	0,7	0,206	31
4	2,1	0,252	37
5	1,0	0,183	38
6	0,7	0,229	36
7	0,6	0,242	40
8	0,8	0,353	42
БрО4Ц4С17	4,0	0,325	38

Все экспериментальные сплавы на 52-263 % превосходят бронзу по задиристости, на 1,2-47,4 % по прирабатываемости и меньше изнашивают стальное контртело на 47,5-667 %. С износом самого антифрикционного материала дело обстоит не так однозначно. По весовому износу все алюминиевые сплавы превосходят бронзу на 12-675 %, однако, с учетом разницы в удельных весах

алюминия и меди, линейный износ сплавов 1, 2 и 4 больше, чем у бронзы на 33-267 %, у сплава 5 линейный износ такой же, как у бронзы, а у сплавов 3, 6, 7, 8 даже линейный износ на 22,2-225 % меньше, чем у бронзы.

Представляет интерес сравнение средних значений момента трения и температуры стальной поверхности трения при 40-часовых испытаниях на износ при одинаковых постоянных условиях нагрузки, смазки и скорости скольжения. У одного сплава момент трения оказался выше, чем у бронзы на 9 %, а у остальных сплавов ниже, чем у бронзы на 11-78 %. При этом температура поверхности трения стального ролика оказалась выше, чем при работе с бронзой у двух сплавов (на 2-4 °С), у одного сплава она была одинаковой с брон-

зой, а у остальных сплавов она оказалась ниже, чем при работе с бронзой на 1 – 7 °С. Интересно отметить, что экспериментальные сплавы со средним содержанием олова имели большее значение момента трения при меньших температурах нагрева, чем сплавы с низким содержанием олова. Наиболее вероятно, что это связано с образованием разных типов вторичных структур на поверхности трения этих групп сплавов.

Проведенные исследования показали не только возможность но и целесообразность замены бронзовых литых монометаллических подшипников на алюминиевые из экспериментальных сплавов.

Работа выполнялась при поддержке грантов Российского научного фонда № 15-19-00217 и № 14-19-01033

ИЗНАШИВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ БАББИТА Б83, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ, В УСЛОВИЯХ СУХОГО ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ

¹Михеев Р.С. (mikheev.roman@mail.ru), ¹Коберник Н.В., ²Калашников И.Е.,
²Болотова Л.К., ²Быков П.А., ²Кобелева Л.И., ²Колмаков А.Г.

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;

² Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия.

Приведены результаты исследований трибологических свойств антифрикционных покрытий из композиционных материалов, полученных методом дуговой наплавки на стальную подложку. Показано, что применение наплавочных композиционных прутков на основе баббита Б83, содержащих субмикронные частицы бора, карбида бора, или частицы карбида кремния микронного размера, позволяет получать покрытия с повышенными трибологическими характеристиками

Ключевые слова: баббит Б83, армирующие наполнители, дуговая наплавка, коэффициент трения, износостойкость.

Введение: Несмотря на широкое применение оловянных баббитов, в частности сплава марки Б83 по ГОСТ 1320, в подшипниках скольжения энергетического и транспортного машиностроения, малая износостойкость в сочетании с низкой сопротивляемостью усталостному разрушению накладывают некоторые ограничения на область их использования, и эксплуатационные характеристики новых машин и механизмов [1].

Улучшить свойства баббитов можно путем создания на их основе дисперсно-упрочненных композиционных материалов (КМ), т.е. введением в их состав керамических частиц микронного или субмикронного размера, повышающих нагрузочную способность и износостойкость, или приводящих к диспергированию структуры мягкой основы (α -фаза) и интерметаллидных фаз Sn-Sb [2].

Наибольший интерес для нанесения рабочего антифрикционного слоя из баббита на жесткую стальную опору подшипника скольжения, в том числе и при выполнении текущего ремонта, представляют технологии дуговой наплавки, позволяющие предотвратить ликвацию упрочняющей

фазы и сформировать покрытия требуемой толщины, характеризующиеся высоким уровнем адгезионной связи с подложкой и дисперсностью структуры [3]. Поэтому в настоящей работе приведены результаты исследования изнашивания композиционных покрытий, полученных методом дуговой наплавки с применением композиционных наплавочных прутков на основе баббита Б83.

Материалы и методы: Покрытия на поверхности массивной подложки (толщина 8 мм) из стали марки Ст3сп (ГОСТ 380) получали методом дуговой наплавки с применением изготовленных методом экструзии композиционных наплавочных прутков на основе баббита марки Б83 (10-12 мас.% Sb, 5,5-6,5 мас.%Cu, Sn - остальное, ГОСТ 1320), диаметром 3 мм и длиной 350-400 мм. Для армирования в состав прутков вводили 5 мас.% частиц карбида кремния (SiC) средним размером 40 мкм, а также субмикронные частицы бора (B), либо карбида бора (B₄C) размером соответственно не более 0,5 и 1 мкм в количестве 0,25 мас.%.

Дуговую наплавку производили на переменном токе неплавящимся вольфрамовым электро-

дом в защитной среде на режиме: сварочный ток - $I=(160-170)$ А, напряжение на дуге - $U_0=(16-18)$ В, скорость наплавки - $V_n=4,2$ м/ч, расход защитного газа (аргона) - (12-14) л/мин.

Трибологические испытания полученных покрытий из КМ проводили в условиях сухого трения скольжения на установке CETR UMT Multi-Specimen Test System по схеме: неподвижная втулка (контртело из стали 45 по ГОСТ 1050, HRC>63) против вращающейся шайбы (испытываемый образец) при удельных нагрузках от 0,2 до 0,7 МПа и скорости скольжения 0,39 м/с. Время испытаний при каждой удельной нагрузке составляло 10 мин. Поведение образцов оценивали по величинам массовой интенсивности изнашивания (I_m) и коэффициента трения, определяемой путем автоматического программного обсчёта. Средствами оптической и сканирующей электронной микроскопии исследовали поверхности трения.

Результаты и их обсуждение: Наплавленные валики характеризуются достаточно гладкой поверхностью с плавным переходом к металлу подложки и обладают толщиной 2-3 мм после механической обработки, необходимой для выравнивания рабочей поверхности. Установлено, что композиционные покрытия, сформированные прутками, содержащими в своем составе субмикронные частицы бора, либо карбида бора, или микронные частицы карбида кремния, обладают на 30-35% большей износостойкостью при снижении до 40% величины коэффициента трения по сравнению с таковой для покрытий, полученных с применением аналогичных наплавочных прутков из баббита Б83. После трибологических испытаний на поверхности трения образцов наряду с канавками пластического сдвига, образовавшимися под действием неровностей контртела, обнаружены вытянутые в направлении скольжения кратеры макроскопических размеров, являющиеся результатом перехода от абразивного и окислительного изна-

шивания, свойственных соответственно для начальной и установившейся стадии режима трения, к адгезионному типу. Наибольший размер кратеров (площадь до 1 мм²) наблюдается на поверхности трения образцов с наплавленным слоем из баббита Б83. Введение в состав покрытий субмикронных частиц бора или карбида бора за счет применения соответствующих наплавочных композиционных прутков на основе баббита Б83 позволяет изменить микрорельеф поверхностей трения: уменьшить площадь и размеры очагов схватывания. Однако, в присутствии частиц карбида кремния очаги схватывания имеют наименьшую площадь среди исследованных образцов с композиционными покрытиями и более фрагментированы. Это, вероятно, связано с тем, что частицы наполнителя микронного размера играют роль несущих опор, ограничивая пластическую деформацию и препятствуя уносу материала матрицы в процессе сухого трения скольжения.

Выводы: Таким образом, проведенные исследования показывают большую перспективность применения наплавочных композиционных прутков на основе баббита Б83 для получения антифрикционных покрытий, обладающих меньшими на 30-40% коэффициентами трения при увеличении износостойкости на 30-35% в сравнении со слоем, сформированным с использованием аналогичных наплавочных прутков из баббита Б83.

[1] Потехин Б.А., Илюшин В.В., Христолюбов А.С. Особые свойства баббита Б83, полученного турбулентным способом литья // Литье и металлургия. – 2010, № 3, 78-81.

[2] Zeng Jun, Xu Jincheng, Hua Wei, Xia Long, Deng Xiaoyan, Wang Sen, Tao Peng, Ma Xiaoming, Yao Jing, Jiang Chao, Lin Lei. Wear performance of the lead free tin bronze matrix composite reinforced by short carbon fibers // Applied Surface Science. – 2009 (255), 6647–6651.

[3] Гвоздев П.П., Коберник Н.В., Михеев Р.С. Влияние углеродных нанотрубок на структуру и свойства антифрикционных покрытий // Сварка и диагностика. – 2013, № 6, 36-39.

КРИТЕРИАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ФОРМИРОВАНИИ КВАЛИФИКАЦИОННЫХ НОРМАТИВОВ

Моисеев А.А. (slow.coach@yandex.ru)

ГосНИИ химмотологии, Москва, Россия.

Рассматривается критериальная модель фрикционного износа, в состав которой с учетом противоизносных свойств смазывающего топлива, введен критерий объемного износа. Физический смысл данного критерия – отношение импульса увлекаемого износного материала к импульсу силы трения. Он используется для решения следующих задач: оптимального выбора параметров критериальной модели; формирования уравнения связи между величиной и условиями износа; прогнозирования величины износа в различных эксплуатационных условиях; расчета квалификационных нормативов для лабораторной установки.

Ключевые слова: фрикционный износ, квалификационные испытания, лабораторная установка, критериальная модель, критерий объемного износа, прогнозирование износа, квалификационный норматив.

1. Рассматривается критериальная модель фрикционного износа пары трения «головка плунжера – наклонная шайба» в аксиально – поршневом насосе [1]. На основе анализа основных конструктивных особенностей данного насоса и с учетом противоизносных свойств смазывающего топлива, в качестве критерия подобия между лабораторной установкой и исследуемым объектом был выбран критерий объемного износа, физический смысл которого – отношение импульса увлекаемого износного материала к импульсу силы трения [2].

2. Критериальное моделирование износа включает два этапа: параметризацию модели по результатам квалификационных испытаний и прогнозирование износа при заданных условиях и длительности. Модель реализуется в виде рабочего файла в программной среде **Microsoft Excel 7** и дополняется вспомогательным файлом надстройки, который представляет собой библиотеку специальных функций **Visual Basic**. Эти функции формировались по результатам квалификационных испытаний [3] и использовались для прогнозирования характеристик износа в различных условиях. В число разработанных функций входят:

- функция, предназначенная для расчета объемного износа;
- функция, предназначенная для расчета глубины износа;
- функция, предназначенная для расчета ширины полосы;
- функция, предназначенная для расчета числа Зоммерфельда;
- функция, используемая для расчета коэффициента граничного трения по коэффициенту сухого трения и числу Зоммерфельда;
- функция, используемая для расчета температурной зависимости динамической вязкости на базе соотношения Андраде [4];
- функция, предназначенная для расчета критерия подобия объемного износа;
- функция, предназначенная для прогнозирования объемного износа по оптимальной величине критерия подобия.

3. Первым этапом параметризации модели являлось формирование статистики критерия подобия по полученным измерениям и выбранным значениям калибровочных параметров. В совокупности рассчитанные значения критерия подобия образуют статистику, для расчета вариации критерия для выбранных значений параметров. Оптимизация этих параметров осуществлялась методом случайного спуска [5]. После завершения параметризации и ввода в программу оптимизированных значений параметров становится возможным прогнозирование износа. При этом формировалось уравнение связи между величиной расчетного износа и прочими параметрами критерия подобия. Это уравнение решалось методом случайного спуска, в результате чего формировались зависимости глубины и полосы износа от времени, которые интерпретировались как прогнозы износа.

Выводы

1. На основе анализа основных конструктивных особенностей плунжерного насоса и с учетом противоизносных свойств смазывающего топлива, в качестве критерия подобия между лабораторной установкой и исследуемым объектом был выбран критерий объемного износа. Его физический смысл – отношение импульса увлекаемого износного материала к импульсу силы трения. Критерий используется для решения следующих задач:

- оптимального выбора параметров критериальной модели путем минимизации вариации критерия подобия для износа;
- формирования уравнения связи между величиной износа и параметрами в составе критерия подобия;
- прогнозирования величины эксплуатационного износа при заданных условиях;
- расчета квалификационных норм для лабораторной установки.

2. Оптимальная параметризация критериальной модели износа базировалась на интерпретации критерия износа как инварианта. В этой ситуации оптимальные параметры представляют собой точку минимума вариации критерия и могут быть найдены с использованием стандартных методов оптимизации, например, случайного спуска.

3. Соотношение, связывающее критерий объемного износа и его усредненное значение с минимальной вариацией, рассматривалось как уравнение связи между величиной износа и прочими параметрами критерия, включая время износа. Это позволило использовать данное уравнение для прогнозирования величины износа в заданных условиях и для различных сроков эксплуатации.

4. Разработанная модель может быть использована для формирования квалификационных норм износа на основании эксплуатационных ограничений на глубину износа, соответствующую заданной длительности последнего. С ее помощью рассчитывалась ширина полосы износа измерительного элемента при заданной длительности эксперимента, которая принималась в качестве квалификационной нормы при проведении соответствующих испытаний.

[1] Орлов Ю.М. Авиационные объемные гидромашины с золотниковым распределением – Пермь, ПГТУ – 1993

[2] Моисеев А.А., Критериальная модель квалификационных испытаний на износ // Инженерная физика – №12, 2015, с 30.

[3] Никитин И.М., Кондратенко В.В., Баевский Д.Ф. Сравнительная оценка определения противоизносных свойств отечественных реактивных топлив на установке ВОСЛЕ и приборе ПСТ – 2// Труды 25 ГОСНИИ МО РФ – вып. 56, с. 175, М., «Перо», 2014.

[4] Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей – Л., Химия – 1982

[5] Теория и применение случайного поиска, п/ред. Растригина Л.А. – Рига, Зинатне – 1969

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОГО ИЗНАШИВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Мотова Е.А. (motik-1@mail.ru)

Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия.

Разработана аналитическая модель коррозионно-механического разрушения при механической обработке конструкционных материалов с использованием энергетических представлений процесса разрушения.

Ключевые слова: коррозия, механическое разрушение, конструкционные материалы.

Разрушение материала при трении является сложным многофакторным процессом, характеризующимся: многообразием управляемых, неуправляемых и неконтролируемых факторов, оказывающих большое влияние на ход процессов; многочисленным разнообразием сложных корреляционных связей между факторами; ярко выраженной зависимостью физико-механических свойств материалов от температуры, среды и многих других причин. Изучение процессов разрушения материала поверхности при трении требует усовершенствования методики экспериментальных исследований при ясной формулировке целей и задач. Задачи могут быть разнообразными: изучение механизма разрушения поверхности при трении, разработке оптимальной конструкции сопряжения, выбор и создание материалов для сопряжения и выборов их режимов работы. Как правило, имеется очень мало сведений о механизме процесса коррозионно-механического разрушения при трении, известны лишь некоторые параметры, определяющие условия его протекания, и требования к его результатам.

Цель исследования заключалась в разработке аналитической модели коррозионно-механического разрушения поверхности при трении с использованием кибернетического подхода.

В основу подхода положена идея «черного ящика», основанная на принципе изображения процессов разрушения поверхности металла при трении в виде кибернетической модели с входными управляемыми, контролируемыми и неконтролируемыми факторами. Управляемыми факторами были выбраны скорость скольжения, удельная нагрузка, расход смазочно-охлаждающей жидкости, абразива. В качестве контролируемых факторов: состав смазочно-охлаждающей жидкости, температура окружающей среды. Неконтролируемые факторы, т.е. факторы которые могут быть недоступны для измерения, или неизвестны исследователю (например, изменение шероховатости поверхностей в процессе их приработки, неоднородность поверхности по механическим свойствам). При исследовании процесса разрушения выходными параметрами процесса были коэффициент трения и интенсивность изнашивания.

Для достижения цели исследования решались задачи экспериментальные, связанные с определением оптимальных условий протекания процесса при трении и задачи интерполяционные, связанные с выяснением механизма разрушения. При этом предусматривалось несколько этапов: сбор и анализ предварительной информации об исследуемом процессе; выбор параметров оптимизации и плана эксперимента; построение матрицы планирования; обработка результатов эксперимента с использованием многомерного регрессионного анализа; построение математической модели с проверкой ее на адекватность. С учетом цели исследования задача моделирования заключалась в математическом описании процесса разрушения поверхности при выяснении его механизма.

В отличие от обычного физического понятия термина «механизм процесса» подразумевается не прямое исследование атомно-молекулярного, химического, абразивного и других взаимодействий поверхностей при трении, а изучение процесса разрушения поверхности, учитывающего наиболее существенные результаты эксперимента. Решение такого типа задач сводится к поиску математических моделей, адекватно описывающих исследуемый процесс, например, оценка параметра оптимальности [1]. Оптимальные планы эксперимента или близкие к ним, минимизируют обобщенную дисперсию исследуемого параметра и на основании полученных данных проводится дискриминация моделей. В итоге выбирается математическая модель, которая не только более адекватно описывает процесс разрушения поверхности при трении, но имеет простой вид, физический смысл и информационную ценность.

При выводе аналитической зависимости для оценки интенсивности коррозионно-механического разрушения поверхности конструкционного материала использовали энергетические представления процесса разрушения [2].

[1] Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. - М.: Высшая школа. - 1975.

[2] Костецкий Б.И. Износостойкость металлов. - М.: Машиностроение. - 1980.

ГРАНИЧНАЯ СМАЗКА И МАССОПЕРЕНОС ПРИ ТРЕНИИ

Мышкин Н.К. (mpri@mail.ru)

Институт механики металлополимерных систем НАНБ им.В.А. Белого, Гомель, Беларусь.

Рассмотрены проблемы граничной смазки и роль Р.М. Матвеевского в создании научных основ анализа этого режима и методов испытаний смазочных материалов эффективных в данных условиях. Показано, что массоперенос при трении реализуется в режиме граничной смазки по различным механизмам, в зависимости от механики контакта и действия смазочной среды, в частности, трибохимических эффектов. В случае полимерного контакта массоперенос, как правило, определяет трение и изнашивание трибосистемы.
Ключевые слова: граничная смазка, температурная стойкость, задир, пленка переноса.

Граничная смазка.

Смазка разделяет реальные шероховатые поверхности, не давая им деформироваться и слипаться. Смазка трущихся поверхностей существенно изменяет механизм трения и изнашивания, а степень этого изменения зависит от вязкости и толщины слоя смазки. В условиях граничной смазки контактирующие тела разделены такой тонкой пленкой смазки, что ее поведение становится мало похожим на поведение жидкости, и в этой ситуации возрастает роль физико-химических и химических процессов. В реальных узлах трения чаще всего трение происходит именно в этом режиме, поскольку металлы контактирующих тел обычно покрыты абсорбированной пленкой, а кроме того вступают в трибохимические реакции с окружающей средой и образуют пленки различного состава и структуры. Важные результаты в этой области трибологии были получены Р.М. Матвеевским, который ввел такие важные понятия как температурная стойкость граничных слоев и их противозадирная стойкость [1,2]. Им предложены методики определения температурной стойкости смазочных материалов, основанные на измерениях зависимости коэффициента трения от температуры, и описаны факторы влияния состава и свойств материалов трибосистемы и смазочной среды, а также трибохимических реакций в контакте [2]. Подход Р.М. Матвеевского оказался интересным в научном плане и очень полезным в практике. Он стал основой многих методов испытаний, в том числе с нагревом контакта электрическим током [3].

Массоперенос при граничной смазке.

Граничные слои предотвращают непосредственный контакт неровностей и, экранируя поверхностные поля, значительно снижают адгезию. При этом они имеют низкую сдвиговую прочность и большое сопротивление сжатию. Тонкая граничная пленка, покрывающая шероховатые поверхности, повторяет их рельеф. Поэтому поверхности контактируют через смазку, но по отдельным пятнам. Малая толщина смазочного слоя не может препятствовать упругой и пластической деформации контактирующих тел, но сдвиг происходит в

пленке или тонком поверхностном слое. При этом, хотя изнашивание и не устраняется вообще, но размер частиц разрушения мал и большую роль играют процессы массопереноса. Часто образуется, так называемое третье тело – пленки сложного химического состава из фрагментов контактирующих тел и продуктов их модификации с участием смазочной среды или даже ее полимеризации в условиях контактных нагрузок, температур и каталитического действия металлических поверхностей [4]. Закономерности фрикционного переноса определяют во многих случаях эксплуатационные характеристики пар трения различных материалов. Даже при отсутствии смазочного материала третье тело обладает смазочной способностью. В случае металло-полимерных пар, очень часто работающих без смазки, процессы массопереноса являются ключевыми в их поведении при трении. Аналитическое описание процессов массопереноса присутствует в литературе [4]. С точки зрения механики наибольшее внимание привлекли процессы пластической деформации и образования частиц изнашивания с последующим образованием третьего тела. С точки зрения трибохимии подверглись детальному изучению реакции на контакте, механизмы трибополимеризации, коррозионные явления и модификация поверхностных слоев трущихся тел, а также действие таких внешних факторов, как электрические и магнитные поля. В целом, можно отметить, что данное направление в трибологии требует дальнейших усилий, являясь интересным с точки зрения науки и практики.

[1] Матвеевский Р.М. Граничная смазка. В кн Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ/ Под ред. В.А. Белого и др. — М.: Машиностроение — 1993

[2] Матвеевский Р.М., Буяновский И.А., Лазовская О.В., Противозадирная стойкость смазочных сред при трении в режиме граничной смазки. — М.: Наука — 1978

[3] Мышкин Н.К., К оценке температурной стойкости материалов и смазок электрическими методами, Трение и износ, т. 5, № 4, с. 744-747 -- 1984

[4] Myshkin NK, Friction transfer film formation in boundary lubrication, Wear, vol 245, p.116-124-2000

О МЕХАНИЗМЕ ДЕЙСТВИЯ СОТС ПРИ ЛЕЗВИЙНОМ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ

Наумов А.Г., Латышев В.Н., Раднюк В.С., Наумова О.А.

Ивановский государственный университет, Трибологический центр, Иваново, Россия.

Представлены обобщенные результаты экспериментальных и теоретических исследований по развитию теории действия СОТС при лезвийном резании материалов. Показано, что одновременно с образованием разделительных смазочных слоев в зоне контакта происходят диффузионные процессы компонентов СОТС в трибосопряженные поверхности инструмента и обрабатываемого материала, приводящие к изменению их физико-механических характеристик.

Ключевые слова: СОТС, резание металлов, трибологические процессы, физико-химические процессы.

Сложность физико-химических процессов и явлений, сопровождающих процессы лезвийного резания материалов, как отмечается в многочисленных научных исследованиях, в том числе, академиком Н.Н.Семенова, П.А.Ребиндера, В.Д.Кузнецова, обусловлена целым рядом факторов. Основными из них являются: высокие температуры и давления, наличие постоянно обновляющихся химически чистых и имеющих свободные валентности (химически активных) металлических поверхностей, многокомпонентные структуры матриц инструмента и обрабатываемого материала и т.д. Все это приводит к интенсивному развитию различных видов изнашивания рабочих поверхностей инструментов, первопричиной возникновения которых являются адгезионные взаимодействия между трибосопряженными химически активными поверхностями инструментального и обрабатываемого материалов.

Смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС) способны оказывать эффективное влияние на процессы резания. При этом, как показал акад. П.А.Ребиндер, в зоне контакта могут протекать такие химические реакции, термодинамическая возможность которых маловероятна при обычных условиях.

В ходе развития науки о резании многие ученые старались теоретически описать процессы, протекающие в зоне контактирования и приводящие к облегчению условий резания в целом. Анализ этих, в большинстве случаев, противоречивых, но экспериментально подтвержденных гипотез, позволили В.Н.Латышеву сформулировать теорию, описывающую динамику процессов образования в контактной зоне разделительных смазочных пленок посредством протекания радикально-цепных реакций и предположить, что вышеуказанные гипотезы являются частными случаями данной теории. Предложенная теория и высказанные предположения впоследствии были подтверждены многочисленными исследователями.

Дальнейшие наши исследования, проведенные с привлечением теории и экспериментальных данных в области материаловедения и упрочнения материалов, показали, что СОТС при резании металлов будет оказывать действие не только на границе раздела инструмента с обрабатываемым ма-

териалом, как это описывается теорией радикально-цепных реакций. Образованные в контактной зоне в результате физико-химических процессов отдельные компоненты СОТС будут диффундировать в трибосопряженные металлические поверхности, в той или иной мере изменяя их физико-механические характеристики.

Согласно этого, в общем случае механизм действия СОТС, приводящий к изменению условий трибосопряжения между инструментальным и обрабатываемым материалами при резании, можно описать как совокупное действие трех явлений, приводящих к изменению трибологических характеристик контактной зоны.

В первом случае, смазочный эффект от действия СОТС представляет собой совокупность двух механизмов, основой проявления которых являются термодинамические характеристики зоны резания [2]. В областях, где температуры недостаточно высоки для пиролиза СОТС, ее действие, в основном, описывается механизмом граничной смазки. В областях непосредственного контакта (зона трибосопряжений), где температуры резания в зависимости от инструментального материала имеют средние значения от 500-550^oC до 900-1000^oC, СОТС претерпевает термодеструкцию с образованием химически активных атомов, ионов и радикалов. Следствием этого является образование на границе раздела смазочных пленок, улучшающих трибологическую обстановку и экранирующих непосредственный контакт химически активных ювенильных поверхностей инструмента и обрабатываемого материала.

Наряду с возникновением разделительных смазочных пленок на границе раздела инструмента с обрабатываемым материалом в контактной зоне происходят процессы диффузии продуктов деструкции компонентов СОТС через ювенильные поверхности с образованием твердых растворов внедрения или замещения в металлических матрицах. В этих процессах участвуют как нейтральные атомы, так и заряженные частицы (ионы, радикалы). Скорость проникновения частиц СОТС вглубь металла определяется градиентом химического потенциала, наличием физически чистых (незапасивированных оксидами) ювенильных поверхностей, диффузионной подвижностью этих частиц в ме-

талле (т.е. коэффициентом диффузии) и характеристиками процесса резания, в первую очередь, температурами в контактной зоне, т.к. диффузия является термоактивируемым процессом.

Образование твердых растворов, как внедрения, так и замещения приводит к изменению фазового состава и структуры матрицы, следствием чего является изменение физико-механических характеристик приповерхностных объемов металлов. Это приводит к увеличению значений их микротвердости и остаточных микронапряжений, которые плавно уменьшаются от поверхности вглубь до величин, соответствующих немодифицированной матрице. При этом, наблюдаемые визуально зоны деформированного металла на обработанной поверхности и зоны вторичной деформации на прирезцовой стороне стружки имеют значительно меньшие размеры.

Следует отметить, что не исключена вероятность скопления абсорбированных частиц в отдельных микрообъемах приповерхностных слоев, результатом чего будет наблюдаться выделение новой фазы. Однако, этот процесс согласно проведенным исследованиям не является доминирующим для обрабатываемых материалов ввиду достаточно короткого времени нахождения этого материала в контактной зоне, т.е. времени активных диффузионных процессов.

Иную картину можно наблюдать в случае инструментальных материалов, особенно для углеродистых, легированных и быстрорежущих сталей. Нормативное время работы инструментов составляет 2 часа, т.е. инструментальный материал достаточно длительное время подвергается действию активной атмосферы, образованной в результате деструкции СОТС. С учетом того, что при классическом упрочнении химико-термической обработкой длительность процесса насыщения инструментальных сталей составляет от 5 до 60-70 мин., можно констатировать, что в процессе резания в результате диффузионных процессов материал рабочих поверхностей инструментов модифицируется значительным количеством диффундирующих элементов. В результате этого, в приповерхностных слоях будет наблюдаться не только формирование твердых растворов, но и образование новых фаз, которые могут непосредственным образом оказывать влияние на физико-механические характеристики инструментального материала, а, следовательно, на трибологические и физико-химические процессы в контактной зоне.

При этом, следует отметить, что такая модификация инструментального материала может приводить как к положительному, так и к отрицательному эффектам (стойкостные показатели инструментов, характеристик процесса резания, качество обработанных поверхностей). В качестве примера можно привести дискуссию среди исследователей о влиянии кислорода на процесс резания.

Вместе с тем, при рассмотрении механизмов действия СОТС необходимо так же учитывать закон действия масс (или закон масс). Суть его заключается в том, что с учетом изобарно-изотермического потенциала образование новых соединений (смазочных пленок) носит избирательный характер. Наиболее вероятно протекание тех химических реакций между частицами СОТС и металлами, изобарно-изотермический потенциал которых имеет минимальное значение, т.е. взаимодействующие вещества обладают большим сродством друг к другу по сравнению с другими.

Однако образование того или иного соединения определяется не только степенью сродства, но и массой взаимодействующих веществ. Например, быстрорежущая сталь содержит в своем составе вольфрам, ванадий, молибден и другие элементы, которые обладают большим сродством к кислороду, чем железо. Но, при малой концентрации ванадия и огромной, по сравнению с ванадием, массе железа ванадий может не образовать своего оксида, а войти в состав оксида железа, изменяя его физико-механические свойства. Аналогичным образом могут вести себя и другие элементы. В этом и проявляется закон масс.

Таким образом, из выше приведенного следует, что смазочное действие СОТС в большей степени проявляется в результате протекания в контактной зоне радикально-цепных реакций с образованием на границе раздела разделительных смазочных пленок, а так же в результате модификации рабочих поверхностей инструментов компонентами СОТС в процессе резания.

Диффузионные процессы, протекающие на обработанных поверхностях, влияют на изменение трибологической обстановки контактной зоны опосредовано – через изменение условий контактного взаимодействия в результате изменения физико-механических характеристик металлических поверхностей. Эти процессы оказывают непосредственное влияние на наследственность обработанных поверхностей, т.е. на их дальнейшие служебные характеристики.

ИСПЫТАНИЕ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ НА ВЫНОСЛИВОСТЬ

Никольская В.В., Головин В.П., Казаков А.М., Юсупов М.Р.

ХТЦ УАИ, Уфа, Россия.

Предложена методика и лабораторный стенд для испытания стальных канатов на выносливость в жидких агрессивных средах и при разных температурах.

Ключевые слова: выносливость, износ, канат, смазочный материал, проволока, пробегная машина, трение.

Введение

Долговечность и работоспособность стальных канатов определяют посредством испытаний образцов на выносливость на пробегных машинах. Однако современные методики испытания на выносливость не позволяют оценить реальную работоспособность стального каната с учетом условий эксплуатации.

Поэтому создание методики, позволяющей оценить долговечность, работоспособность и выносливость стального каната с учетом условий эксплуатации, является актуальной проблемой, изучение которой позволит лучше понять механизм изнашивания и разрушения различных конструкций канатов, а так же поможет в создании новых эффективных смазочных материалов, защищающих канаты от преждевременного разрушения под воздействием эксплуатационных факторов.

Методика испытаний

В работе предложена методика и лабораторный стенд для испытания канатов на выносливость в жидких агрессивных средах и при разных температурах, который позволяет оценить выносливость

и работоспособность стальных канатов, а так же эффективность канатных смазок с учетом реальных условий эксплуатации.

Методика заключается в том, что испытания проводят на пробегной машине, обеспечивающей возвратно-поступательные перемещения образца каната и позволяющей создавать изгиб каната на требуемый угол при определенной температуре, а так же, осуществлять периодическое окунание в жидкую агрессивную среду.

Результаты испытаний

В настоящее время в лаборатории ХТЦ УАИ был собран стенд для испытания канатов выносливость в жидких агрессивных средах и при разных температурах и проводятся первые испытания.

- [1] ГОСТ 2387-80. Канаты стальные. Метод испытания на выносливость
- [2] Труды ЛПИ №282. Машиностроение, Л.: «Машиностроение», 1966. – 376 с.
- [3] Сергеев С.Т. Надежность и долговечность стальных канатов. Изд-во «Техника», 1968. – 238 с.

РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИЙ И УГЛОВ СДВИГА В СТРУЖКЕ С ПОМОЩЬЮ ТРИБОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ

Новиков В.В., Афанасьева О.В. (novikov-ww@mail.ru)

Ивановский государственный университет, Иваново, Россия.

Предложена трибологическая модель стружкообразования, в которой деформация в стружке описывается через действие максимальных касательных напряжений, формируемых напряженным состоянием на поверхности инструмента, связанным с трением. Показано, что в общем случае направление скольжения не совпадает с традиционным углом сдвига в стружке по схеме Мерчанта. Модель позволяет по известному углу трения и переднему углу инструмента рассчитывать угол текстуры стружки, угол сдвига, усадку стружки для различных обрабатываемых материалов.

Ключевые слова: трение, стружкообразование, деформация стружки, усадка стружки.

Расчет напряжений и деформаций в зоне стружкообразования важен для понимания процесса резания и влияния на него СОТС. В настоящее время расчет напряжений производится численными методами. Отсутствие аналитического описания затрудняет понимание общей картины формирования стружки, влияния на этот процесс коэффициента трения и других факторов резания.

Нами была предложена теория, позволившая указать на совпадение плоскостей максимальных касательных напряжений с плоскостями текстуры стружки [1]. Нами было показано, что если мы знаем средние напряжения на двух перпендикулярных гранях, то нормальные и касательные напряжения на наклонной грани σ_α и τ_α можно вычислить по формулам:

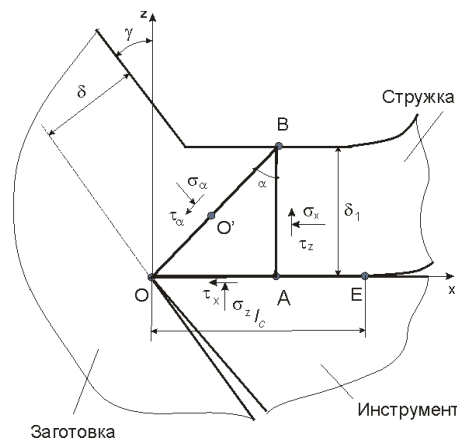


Рис. 1. К расчету напряжений в зоне стружкообразования.

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_x \cos^2 \alpha + \sigma_z \sin^2 \alpha + \tau_x \sin 2\alpha, \quad (1)$$

$$\tau_{\alpha} = \frac{\sigma_z - \sigma_x}{2} \sin 2\alpha + \tau_x \cos 2\alpha, \quad (2)$$

где σ_z и τ_x — средние нормальные и касательные на поверхности инструмента, σ_x — средние нормальные напряжения в плоскости, перпендикулярной поверхности инструмента.

Для условий свободного схода стружки в случае положительных передних углов можно принять, что

$$\sigma_z \gg \sigma_x, \quad \sigma_z \pm \sigma_x \approx \sigma_z \quad (3)$$

Из выражений (1—3) можно получить формулу для расчета угла α_0 , при котором касательные напряжения будут максимальны, а также величину этих напряжений:

$$\operatorname{tg} 2\alpha_0 = \frac{\tau_x}{2\sigma_z} = \frac{1}{2\mu}, \quad (4)$$

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_z}{2} \sqrt{1 + 4\mu^2}. \quad (5)$$

Согласно полученному решению развитие пластического течения в стружке будет происходить в плоскостях, направление которых будет определять только коэффициент трения на передней поверхности. Построенная модель образования стружки в полной мере отражает влияние на процесс трения, и для краткости может называться *трибологической моделью стружкообразования*.

На основе анализа корней стружки, приведенных в работе Н.Н. Зорева [2], нам удалось показать, что плоскости течения совпадают с направлением текстуры формирующейся стружки:

$$\beta_2 = \gamma + \alpha_0 = \gamma + \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \left(\frac{1}{2\mu} \right), \quad (6)$$

а не с углом сдвига, о котором идет речь в традиционной схеме Мерчанта.

Плоскость сдвига в стружке, принимаемая в традиционной модели, не является физической плоскостью, в которой происходит сдвиг. Это всего лишь условная видимая граница между пластически деформированной областью стружки и недеформированной областью основного материала. Проходя сквозь эту условную границу, материал претерпевает пластическую деформацию сдвига, приводящую к удлинению элемента объема вдоль направления действия максимальных касательных напряжений и сужение в направлении, перпендикулярном удлинению.

Построенная модель стружкообразования под действием напряжений на передней поверхности позволяет получить зависимость деформации сдвига при стружкообразовании от коэффициента усадки стружки и параметров резания

$$\varepsilon = \left(\frac{\sin(\alpha_0 + \gamma)}{\cos \alpha_0} \xi - 1 \right), \quad (7)$$

где ξ — поперечная усадка стружки.

Важным прикладным фактором может являться знание взаимосвязи между углом сдвига в стружке и коэффициентом трения. В настоящее время известно несколько формул для расчета такой взаимосвязи (рис. 2). Однако экспериментальные данные не соответствуют прогнозам, получаемым с применением известных теоретических моделей.

Наша модель стружкообразования позволяет получить приведенные соотношения, объясняя наблюдаемые экспериментальные закономерности. Результаты нашей аппроксимации представлены в табл. 1, где $\eta = \operatorname{arctg}(\mu)$ — угол трения, $\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1$ — разность между углами текстуры и углом сдвига в стружке, принимаемая константой.

Таблица 1. Аппроксимация экспериментальных зависимостей.

Материал	$\Delta\beta$	Аппроксимация
Сталь 0,4% С	14°	$2.5\beta_1 + \eta - \gamma = 70^\circ$
Свинец	20°	$2.5\beta_1 + \eta - \gamma = 55^\circ$
Медь	25°	$2.5\beta_1 + \eta - \gamma = 42^\circ$
Олово	10°	$2\beta_1 + \eta - \gamma = 70^\circ$
Алюминий	20°	$\beta_1 + \eta - \gamma = 25^\circ$

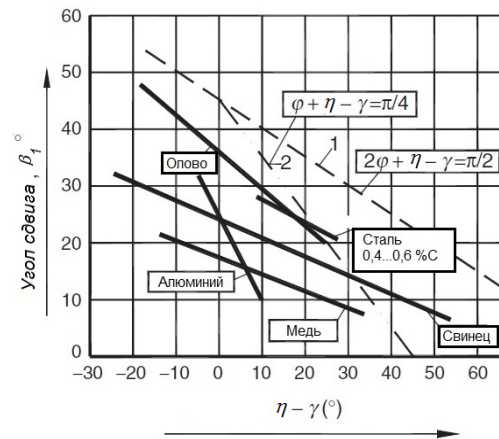


Рис. 2. Сравнительная диаграмма экспериментальных и теоретических зависимостей между значениями угла сдвига в стружке и разностью значений угла трения и переднего угла [3].

Выводы. Предложена трибологическая модель стружкообразования, которая позволяет по известному углу трения и переднему углу инструмента рассчитывать угол текстуры стружки, угол сдвига, усадку стружки и величину деформации удлинения при стружкообразовании.

[1] Новиков В. В. Анализ контактных явлений при лезвийном резании металлов и смазочное действие COTC // Металлообработка. № 1(85). 2015. С. 13—20.

[2] Зорев Н. Н. Исследование элементов механики процесса резания. М: Машгиз, 1952, 364 с.

[3] Astakhov P. V. Tribology of metal cutting // Cutting tribology and interface engineering series, 52 Editor: B.J. Briscoe. Elsevier Ltd. Oxford, 2006. 454 p.

Трибология импортозамещению

Новиков В.И. (info@venchur-n.ru)

ООО «Венчур-Н», Москва, Россия.

Предлагается снизить остроту проблемы импортозамещения за счет применения отечественных триботехнических разработок, позволяющих продлить срок службы импортного оборудования и техники; повысить качество и конкурентоспособность отечественной продукции; создать мощную контр санкцию, способную навсегда прекратить применение внешних санкций и нормализовать внешнеэкономическую деятельность российских предприятий.

Ключевые слова: импорт, курс доллара, ресурс, надежность, конкурентоспособность, санкции, противодействие.

Введение

Проблема импортозамещения обусловлена тем, что российские организации и предприятия долгие годы предпочитали покупать технологическое оборудование и автотракторную технику зарубежных производителей.

Секция «Инновационного развития и экономики» провела расследование, выявившее факты, свидетельствующие о том, что зарубежные производители сознательно не предпринимают должных усилий по адаптации своей продукции к российским условиям,

В связи с резким повышением курса доллара, евро и соответствующим дефицитом средств на замену и сервис импортного оборудования и техники определились следующие задачи, решение которых позволит снизить остроту проблемы:

1. Продление срока службы импортного оборудования и техники.
2. Улучшение качества и конкурентоспособности отечественной продукции или продукции стран СНГ для адекватного замещения импортных аналогов.

3. Проведение активных действий для скорейшего прекращения внешних санкций и полного восстановления нормального режима внешнеэкономической деятельности российских предприятий.

Секция «Инновационного развития и экономики» межведомственного научного совета по трибологии РАН надеется заинтересовать коллег трибологов конкретными примерами применения триботехнических исследований и разработок для решения этих задач.

Проблемы эксплуатации импортного оборудования и техники

Еще в январе 2014 г. к нам обратились представители ООО "Стройгазконсалтинг" с проблемой низкой надежности эксплуатации импортной автотракторной техники. Речь идет о технике всех ведущих мировых производителей. Однако особый интерес вызывает эксплуатация дизельных двигателей корпорации "Caterpillar", поскольку их дизель Cat 3126 с 2002 г. массово применяется в наиболее распространенных в России автобусах ЛИАЗ.

О серьезности проблем эксплуатации Cat 3126 говорит тот факт, что при заявленном производителем пробеге до капитального ремонта более 900 тыс. км потеря эксплуатационных характеристик становится очевидной при 400 тыс.

чтобы обеспечить завышенный спрос на продукцию и сервисные услуги.

Наиболее вероятные причины ускоренного износа отдельных узлов импортного дизельного двигателя

Прежде всего, речь идет о недостаточной противоизносной эффективности импортных смазочных материалов. В частности, моторное масло Cat DEO, рекомендуемое в руководстве фирмы "Caterpillar" по эксплуатации двигателей Cat 3126, производится в корпорации Exxon Mobil, т.е. является на самом деле хорошо известным моторным маслом "Mobil 1".

Мы изучили триботехнические характеристики масла "Mobil 1" и убедились, что у одного из лучших моторных масел нулевая несущая способность. Поэтому смазочный слой не способен гасить пробой на неровных дорогах, при старте, при остановке и при амплитуде виброколебаний, превышающей толщину смазочного слоя.

У корпорации Exxon Mobil есть моторные масла для тяжело нагруженных дизелей, например, Mobil Delvac 1™ LE 5W-30. Но в документах фирмы "Caterpillar" нет ни слова про эти масла. Поэтому можно сделать вывод, что фирма "Caterpillar" сознательно создает условия для завышенного спроса в России на ее продукцию.

Таким образом, недостаточная противоизносная эффективность рекомендованного моторного масла является главной причиной ускоренного износа дизелей Cat 3126 и других импортных дизелей.

В то же время, у каждого узла двигателя есть свои специфические причины для еще большего увеличения скорости износа. Мы сделали теоретические прогнозы относительно развития износа и соответственно виброактивности различных узлов двигателя и получили полное подтверждение этих прогнозов с помощью нашей оригинальной методики вибродиагностики:

1. Износ подшипников турбины, гидронасоса и электромагнитного клапана управления давлением

ем в масляной магистрали высокого давления будет определяться только несущей способностью масла, поэтому уровень износа будет минимальным.

2. У рядных двигателей, к которым относится Cat 3126, коленчатые валы двигателей из-за большой длины испытывают значительные торсионные нагрузки, т. е. они подвержены деформации скручивания.

При быстром изменении нагрузки деформация скручивания увеличивается; возрастает давление шеек коленвала на краевые участки поверхностей вкладышей коренных и шатунных подшипников; продавливается разделительный смазочный слой; соответственно, резко нарастает трение, температура и износ краевых зон вкладышей, появляется нагрузка сдвига вкладышей. Поэтому износ коренных и шатунных подшипников будет всегда выше, чем у подшипников турбины.

3. Износ деталей цилиндропоршневой группы, ГРМ, насосов-форсунок усугубляется детонацией при сгорании суррогатного топлива. Суррогатное или "самоварное" топливо представляет собой смесь различных углеводородов, в том числе, смол - тяжелых углеводородов с высокой температурой кипения.

Под действием инфракрасного излучения от фронта горения рабочей смеси возникают множественные очаги возгорания в объеме перед фронтом, микровзрывы, разрушающие рабочие поверхности цилиндров и компрессионных колец, порождающие детонационную волну. Заправка "самоварным" топливом может за один раз "убить" двигатель, уменьшив на 30-50% компрессию в цилиндрах.

Смолистые фракции суррогатного топлива являются причиной абразивных углеродистых отложений, частицы которых вызывают ускоренный износ распылителя, топливного плунжера и электромагнитного клапана насосов-форсунок.

Мы провели вибродиагностику импортных дизелей с различной степенью износа и можем обоснованно утверждать, что однозначно выявлены такие факторы ускоренного износа, как моторное масло с нулевой несущей способностью и детонация от суррогатного топлива.

Продление срока службы импортного оборудования и техники или улучшение качества и конкурентоспособности отечественной продукции

Такие возможности выбора дает потребителю разработанная в ООО "Венчур-Н" совместно с Институтом машиноведения им. А.А. Благонравова РАН технология безыносной эксплуатации (ТБЭ) всех видов механического оборудования и транспорта. ТБЭ основана на применении смазочных материалов с восстановительным эффектом, содержащих

антифрикционную ресурсовосстанавливающую композицию (АРВК).

Эффективность применения АРВК во время полевых испытаний в двигателе и в трансмиссии трактора ДТ-75ДЕС4 подтверждена испытаниями, проведенными в ФГУ «Северо-Кавказская ГЗМИС», что отражено в протоколе № 11-41-08 (4230172) от 23 декабря 2008 года: «Анализ результатов эксплуатационных испытаний АРВК позволяет сделать следующие обобщения:

- при применении АРВК в качестве добавки к моторному маслу **для новых, приработанных двигателей в технически исправном состоянии** наблюдается корректирующий эффект, позволяющий улучшить **мощностные** (увеличение максимальной эксплуатационной мощности на **3,6%**) и **топливно-экономические показатели** (снижение удельного расхода топлива на **1,2%**) двигателя и обеспечить их стабильность во время рядовой эксплуатации, и при этом, снизить вибрацию двигателя в **1,3 раза**;

- при применении АРВК в качестве добавки к трансмиссионному маслу, для агрегатов, прошедших обкатку и приработку в ходе предыдущей эксплуатации, наблюдается снижение виброактивности зубчатых передач в **1,4 раза**;

- при применении АРВК в качестве добавки к трансмиссионному маслу для новых агрегатов, узлов, не прошедших в полном объеме обкатку с неприработанными кинематическими парами, наблюдается ускорение приработки и значительное снижение виброактивности зубчатых передач и шлицевых соединений в **2...3 раза**. При этом, установлено улучшение показателей шероховатости рабочих поверхностей зубьев в **1,5...3 раза**.

Эффективность применения АРВК во время эксплуатации сельхозтехники подтверждена испытаниями, проведенными в ФГУ «ЦМИС», что отражено в протоколе № 13-26-04 (4230212) от 7 декабря 2004 г.: «Испытаниями установлено, что введение АРВК в **изношенный** двигатель Д-240 зав.№ 158718 трактора МТЗ-82 зав. № 006135 1975 года выпуска после наработки 228 мч повысило компрессию в цилиндрах двигателя **с 18 кг/см² до 20...21 кг/см²** максимальная мощность двигателя повысилась на **3,7 кВт**; при этом часовой расход топлива снизился на **0,29 кг/ч**, а удельный – на **39 г/кВт·ч**. Испытаниями установлено, что АРВК способствует очистке двигателя...»

Отсюда следует возможность завоевания мирового рынка сервиса – реальный путь к скорейшему и окончательному прекращению санкций против России.

СЕТЕВОЙ МАРКЕТИНГ КАК ИНСТРУМЕНТ ВЫВОДА РОССИЙСКИХ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОДУКТОВ НА МИРОВОЙ РЫНОК

Новиков В.И. (info@venchur-n.ru)

ООО «Венчур-Н», Москва, Россия.

Разработана концепция быстрого вывода российской экономики из нарастающего кризиса за счет финансовых резервов, которые дает развитие инновационного экспорта. Смысл нашей концепции в том, чтобы компенсировать потери от нефтяного экспорта, помогая каждому российскому предприятию с мировой известностью создать свой сектор международной сети продаж инновационных продуктов, используя международный потенциал доверия к брендам российских предприятий.

Ключевые слова: инновации, нововведения, коррупция, кризис, инновационный экспорт, сетевой маркетинг.

Введение

По определению, инновация – это нововведение, введение нового наукоемкого товара на рынок, инновация и успех на рынке – не разделимы.

Нововведению предшествует создание новшеств, т.е. новых разработок, технологий, изобретений. Трудоемкость этого процесса составляет, примерно, 5% от общего объема усилий. А 95% требуется, чтобы вывести новый товар на рынок.

В работе Фокина С. «Роль инноваций в системе мирового хозяйства» отмечается: «Изобретение и инновация имеют столько же общего, сколько Божий дар с яичницей. Новшество или изобретение является лишь начальным пунктом инновационного процесса, который требует много времени, денег, доступа к различным рынкам и блестящей интуиции».

Таким образом, инновационная деятельность это, в чистом виде, инновационный маркетинг, по-русски, говоря, организация продаж. Поэтому единственным объективным критерием успеха инновационной деятельности на предприятии, в холдинге, в стране является рост инновационного экспорта.

Идеальный вариант вхождения в инновационный бизнес:

Лидер предприятия, холдинга, государства ставит задачу: "Инновационный экспорт - любой ценой!", - и весь административный аппарат начинает работать на реализацию этой задачи. Примером может служить Южная Корея с ее смешанной моделью экономической системы, сочетающей в себе регулирующую роль государства и экономическую свободу производителей.

В 1961 году власть после военного переворота оказалась в руках генерал-майора Пак Чон Хи, правительство которого в 1962 г. разработало стратегию экономического развития, основанную на стимулировании и государственной поддержке экспорта. В результате с 1962 по 1997 гг. валовой национальный доход страны вырос с 2,3 до 474 млрд. долларов, а доход на душу населения - с 87 долларов до 10 тысяч 307 долларов США.

В развитых странах инфраструктура нововведений, инфраструктура организации продаж складывалась естественным образом, начиная с середины 19-го века. У нас в стране такой инфраструк-

туры нет, и никто не занимается ее построением, поскольку понятия нововведения в официальных документах нет.

Коррупционные препятствия на пути инновационных преобразований экономики России

Еще в 1998 г. в постановлении Правительства Российской Федерации от 24.07.98 за № 832 «О концепции инновационной политики Российской Федерации на 1998-2000 годы» введены следующие термины: «инновационная деятельность» - процесс, направленный на реализацию результатов законченных научных исследований и разработок либо иных научно-технических достижений в новый или усовершенствованный продукт, реализуемый на рынке, в новый или усовершенствованный технологический процесс, используемый в практической деятельности, а также связанные с этим дополнительные научные исследования и разработки.

С точки зрения грамматики, «реализуемый» - это незаконченная форма. Мы уже 25 лет что-то там реализуем. А правильнее было употребить законченную форму: «реализованный на рынке», причем реализованный с громким успехом.

Таким образом, в определение понятия «инновационная деятельность» сознательно внесено искажение, позволившее ограничить сферу действия поддержкой создания новшеств; поддержкой приоритетных направлений, выделением средств, контролем за расходованием этих средств. В результате, есть приоритетные направления, есть коррупционные интересы, но ничего нет на рынке.

Наиболее естественным и наиболее эффективным способом добиться успеха на инновационном рынке было бы

- проведение инновационной рационализации хозяйственной деятельности российских предприятий путем массового внедрения ресурсо, энерго, топливо сберегающих продуктов и технологий;

- вывод на мировой рынок своего опыта финансового оздоровления в качестве инновационного товара, опираясь на громкий рекламный фактор успеха на внутреннем рынке.

Однако наш многолетний опыт работы с российскими предприятиями всех форм собственности во всех секторах экономики свидетельствует о том, что такой путь к успеху на инновационном рынке

вызывает ожесточенное сопротивление технического персонала во главе с техническим директором, главным инженером, главным механиком и главным энергетиком, поскольку сопровождается "обнулением" финансовой базы для получения "откатов".

Таким образом, можно сделать однозначный вывод, что в России инновации не востребованы ни федеральным Правительством, ни правительствами регионов, ни российскими предприятиями. Это при том, что в условиях нарастающего кризиса только доходы от инновационного экспорта являются единственным реальным до сих пор не использованным резервом, способным переломить ситуацию в пользу России.

Что можно и нужно сделать?

Ради спасения экономики страны чрезвычайно важно найти быстрый и эффективный механизм вывода российских инновационных продуктов и технологий на мировой рынок.

Серьезнейшая проблема на пути нововведений - это непонимание потенциальных покупателей, проблема преодоления психологической инерции, предрассудков и предубеждений.

Добиваться успеха на инновационном рынке можно с помощью агрессивной массированной рекламы, требующей вложения миллионов долларов. А можно использовать преимущества сетевого маркетинга, когда каждое звено сети продвигает товар знакомым лицам или предприятиям на основе потенциала доверия и неформальных отношений.

Мы предлагаем использовать международный потенциал доверия к брендам ведущих российских предприятий с обширной зарубежной клиентской базой для преодоления барьера сомнений и недопонимания. Зарубежные клиенты могут

стать начальными звеньями сети продаж, затем продолжить построение сети, используя потенциал доверия у своих клиентов и т. д.

Каждая организация, каждое предприятие РФ с мировой известностью может построить свой сектор сети продаж на мировом инновационном рынке. Чтобы не тратить силы и время на преодоление коррупционного сопротивления, проще создать на каждом предприятии обособленный Центр инновационного экспорта (ЦИЭ).

Для работы Центра необходимо подобрать 2-3 молодых энергичных сотрудников, владеющих английским языком, сочетающих знание естественных и технических наук и способность усвоить основы инновационного маркетинга. Задача сотрудников - создать постоянно действующие презентационные площадки для демонстрации эффекта от применения инновационных продуктов и технологий.

Достаточно продемонстрировать хотя бы на одном российском предприятии пример успешной работы ЦИЭ и разработать механизм тиражирования этого успеха на остальных предприятиях. Тогда мы получим суммарный объем экспортных доходов, способный компенсировать потери от нефтяного экспорта.

Более того, у нас есть возможность завоевания значительной части мирового рынка сервиса автотракторной техники и механического оборудования всех видов и для создания таким образом мощной контр санкции, перспективы развития которой отрезвят всех любителей наказывать Россию.

У России есть шанс достойно выйти из сложнейшей экономической ситуации. Грех им не воспользоваться!

СВЕРХНИЗКОЕ ТРЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Ноженков М.В.

ЗАО "Техном-Т", Москва, Россия.

Исследовано влияние технологических параметров на свойства покрытий, наносимых ионно-плазменными методами. Обнаружено сверхнизкое трение, получены композиционные покрытия, обладающие высокими антифрикционными и защитными свойствами.

Ключевые слова: сверхнизкое трение, износ, покрытие, движение потоков частиц без диссипации энергии.

С целью повышения износостойкости и антифрикционных свойств в технике применяются защитные покрытия, наносимые различными методами. Свойства рабочих поверхностей используемых в современном машиностроении нержавеющей сталей аустенитного класса и титановых сплавов можно улучшить путем применения многослойных покрытий. Композиционные покрытия на основе переходных металлов наносились магнетронным и высокочастотным катодным распылением. Явление сверхнизкого трением исследовано в работах [1-5], где было установлено подобие ряда явлений (сверхнизкое трение, сверхпро-

водимость, сверхтекучесть) и определены критерии подобия как соотношение количества двух фаз (потоков частиц) с различными свойствами.

В данной работе покрытия на основе переходных металлов IV-VI групп Периодической системы, в частности, оксидов хрома, нитридов молибдена, дихалькогенидов молибдена и вольфрама (MoS_2 , MoSe_2 , WS_2 и WSe_2) были нанесены вакуумными ионно-плазменными методами. Триботехнические испытания были проведены на воздухе при нормальных условиях на машинах трения УГС-1. Испытания по схеме диск-сфера (диаметр сферы 9,0 мм) производились при на-

грузке 3,0 Н, скорость скольжения была постоянной и равной 0,019 м/с. Покрытия наносились при температурах подложки от 283 до 1573К на полированные образцы из компактной керамики Al_2O_3 , стали ШХ-15, стали 12Х1810Т, титановые сплавы. Структура покрытий была исследована методом дифракции электронов на отражение в электронографе ЭМР-102М, морфологию поверхности изучали с помощью электронных микроскопов JXA-841 и JSM-35С. Исследования элементного состава полученных покрытий были проведены методом спектроскопии характеристического рентгеновского излучения (JEM-100С с приставкой CEVEX) и методом рентгеновской фотоэмиссионной спектроскопии (ESCALAB-5).

Исследованиями установлено, что при изменении температуры подложки происходило формирование аморфных, поликристаллических или текстурированных покрытий. Ориентация кристаллитов с осью $[10\bar{1}0]$, перпендикулярной поверхности подложки, наблюдалась для MoS_2 , $MoSe_2$, WS_2 , WSe_2 в температурном диапазоне 473-973К и с осью $[11\bar{2}0]$ - для MoS_2 при $T=673-773К$. Текстура роста с осью $[10\bar{1}0]$ формировалась во всех дихалькогенидах, тогда как текстура с осью $[11\bar{2}0]$ была обнаружена в покрытиях из дисульфида молибдена в температурном диапазоне 673-773К.

Установлено, что наиболее высокими антифрикционными свойствами обладают покрытия на основе дихалькогенидов с кристаллической структурой. Сочетание нанесения износостойкого подслоя с легированием наружных антифрикционных слоев атомами дополнительного элемента позво-

ляет существенно улучшить антифрикционные характеристики. Энергетически выгодным расположением частиц в кристаллической решетке для осуществления без диссипативного перемещения с отсутствием сил сопротивления являются пространства Ван-дер-Ваальса в слоистых системах, в которых возможно прогнозирование реализации исследованных явлений. Предложена модель роста покрытий и механизм сверхнизкого трения.

- Нанесение легированных покрытий дает возможность получения сверхнизкого трения при нормальных условиях и приводит к росту долговечности покрытия в несколько раз.

- Обнаружено явление бездиссипативного переноса массы вдоль эквипотенциальных поверхностей слоистых анизотропных веществ.

- Установлено, что сверхнизкое трение, сверхпроводимость и сверхтекучесть являются подобными явлениями, определены критерии подобия.

- Созданы композиционные многослойные покрытия переменного по толщине состава от износостойкого слоя до легированного антифрикционного, обладающие высокими износостойкими свойствами.

[1] Ноженков М.В. Влияние структуры на сверхнизкое трение покрытий, нанесенных ионным распылением // Поверхность. - 2015, №5, 100-112.

[2] Ноженков М.В. Структура и свойства вакуумных ионно-плазменных покрытий // Поверхность.-2014. №1. 54-63.

[3] Nozhenkov M.V. Superlow interaction in layered structures // Global J. Res. Engineer. A. - 2014 (14), Is.2, 49-55.

[4] Ноженков М.В. Влияние кристаллической структуры на триботехнические свойства вакуумных ионно-плазменных покрытий // Трение и износ. - 2013, Т.34, №2, 188-198

[5] Nozhenkov M. V. The ultra-low friction of layer structures // Mechanical Engineering Research. - 2013 (3), N2, 73-90.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАГРЕВА ЭЛЕМЕНТОВ ФРИКЦИОННЫХ ПАР ТОРМОЗОВ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

Носко А.Л. (dr.nosko@mail.ru)

МГТУ им. Н.Э.Баумана, Москва, Россия.

Представлена методика расчета температур элементов фрикционных пар тормозов ПТМ, реализованная в виде компьютерной программы Thermobrake, которая позволяет определять температуру КПК, объемную температуру накладки, температуру диска/шкива; Приведены результаты сравнительного анализа расчетных и экспериментальных значений температуры контурной площади контакта фрикционной накладки диско-колодочных тормозов ПТМ.

Ключевые слова: температура, фрикционная пара, тормоз, подъемно-транспортная машина.

При работе тормозного устройства ПТМ в повторно-кратковременном режиме при каждом торможении температуры накладки и диска/шкива возрастают. С течением времени наступает установившийся тепловой режим, при котором имеет место баланс теплоты за цикл работы тормоза [1].

Разработанная в работах [2-3] математическая модель и численный алгоритм положены в основу методики расчета температур элементов фрикци-

онных пар тормозов ПТМ [4], позволяющей определять температуру КПК, объемную температуру накладки, температуру диска/шкива (рис. 1).

Методика расчета температур элементов фрикционных пар тормозов ПТМ реализована в виде компьютерной программы Thermobrake, позволяющая определять температуру КПК, объемную температуру накладки, температуру диска/шкива.

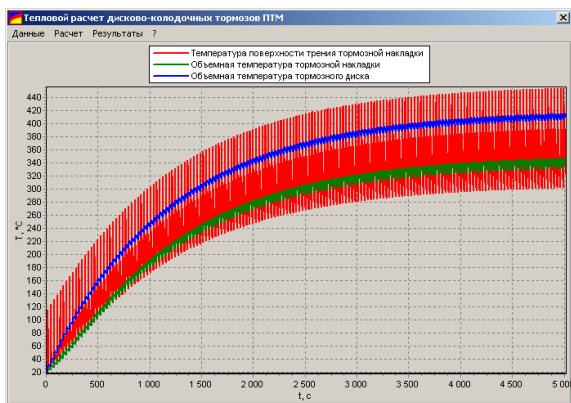


Рис. 1. Характерные записи температур элементов фрикционной пары, полученные с помощью программы *Thermobrake* при выходе тормоза на установившейся тепловой режим (пара трения ФПМ / Сталь, дисково-колодочный тормоз типа ТДЕ-1, диаметр диска 315 мм).

Исходные данные для расчета по программе *Thermobrake* на примере применения колодочного ТКТ-200/100 и дискового ТДП-11 тормозов в приводе ПК-6,3 механизмов передвижения и изменения вылета башенных кранов серии КБ приведены в табл. 1.

Таблица 1. Исходные данные для технического анализа эффективности применения тормозов ТКТ-200/100 и ТДП-11 в приводе ПК-6,3

Категория	Параметр
Свойства материала накладки	Плотность, кг/м ³
	Удельная теплоёмкость, Дж/(кг °С)
	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м °С)
	Предельная температура, °С
Свойства материала диска/шкива	Удельная теплоёмкость, Дж/(кг °С)
	Предельная температура, °С
Конструкция тормоза	Коэффициент взаимного перекрытия
	Количество накладок
Геометрические параметры накладки	Длина, м
	Ширина, м
	Толщина, м
Геометрические параметры шкива/диска	Средний диаметр трения, м
	Масса, кг
	Площадь охлаждения, м ²
Кинематические параметры режима работы	Скорость вращения диска/шкива, рад/с
	Время разгона, с
	Время установившегося движения, с
	Время цикла, с
Динамические параметры режима работы	Номинальный тормозной момент, Н·м
	Приведенный момент инерции механизма, кг·м ²

Приведены результаты сравнительного анализа расчетных и экспериментальных значений температуры T_c контурной площади контакта фрикционной накладки дисково-колодочных тормозов типа ТДК-00.01 и ТДК-00.04 для различных режимов работы механизмов ПТМ. В качестве примера на Рис. 2 представлена зависимость T_c от количества торможений N для режима $W_{mn} = 40$ кДж, $p = 1,1$ МПа, $n_0 = 725$ об/мин, ПВ=30%, $H = 120$ вкл./час [5], где: W_{mn} - работа единичного торможения, p - контактное давление, n_0 - начальная частота вращения диска, ПВ – относительная продолжительность включений, H - количество включений в час.

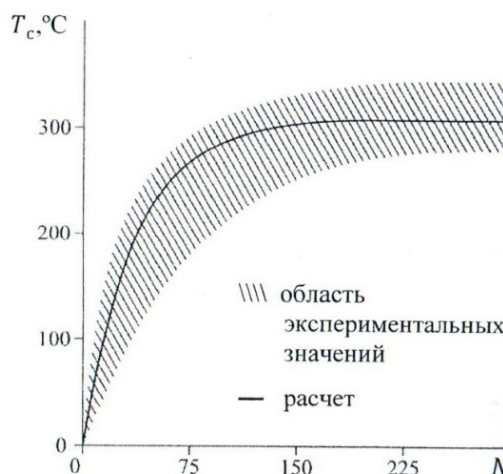


Рис. 2. Зависимость T_c от N .

Установлено, что при определении температуры поверхности трения на КПК фрикционных накладок тормозов ПТМ с помощью предлагаемой методики погрешность расчета значительно ниже, чем при расчете по имеющимся в настоящее время методикам теплового расчета тормозных устройств ПТМ (рис. 2). Средняя погрешность расчета T_c для установившегося режима составляет 15%.

Предлагаемая методика расчета нагрева элементов фрикционных пар использована при разработке *отечественных конструкций* колодочных, дисковых и дисково-колодочных тормозов ПТМ, на одну из которых получен патент [6].

- [1] Александров М. П., Носко А. Л. Расчет нагрева тормозных устройств с малым коэффициентом взаимного перекрытия (на примере дисково-колодочных тормозов подъемно-транспортных машин) // Трение и износ. 1993. Т. 14, №5. С. 895–901.
- [2] Носко А.Л., Носко А.П. Тепловые процессы в узлах трения машин // Известия вузов. Машиностроение. 2005. №11. С. 3–9.
- [3] Носко А. Л., Носко А. П. Решение контактной тепловой задачи с учетом теплопередачи между элементами трибосопрежения // Трение и износ. 2006. Т. 27, №3. С. 279–284.
- [4] Носко А. Л., Носко А. П. Расчет нагрева тормозных устройств ПТМ // Строительные и дорожные машины. 2007. №3. С. 38–43.
- [5] Носко А.Л. Испытания материалов и фрикционных пар тормозов ПТМ. // Механизация строительства. - 2015, № 6 (852), С. 35 – 39.
- [6] Патент на полезную модель RU 143717 .Колодочный тормоз. / Носко А.Л., Курилкин В.В. // Б.И. 2014, №21.

Трибологическая эффективность наноразмерных частиц сульфидов вольфрама как присадок к смазочным маслам

Оганесова Э.Ю. (oganesova@ips.ac.ru), Займовская Т.А., Бордубанова Е.Г.,
Лядов А.С., Паренаго О.П.

Институт нефтехимического синтеза им. А.В.Топчиева РАН, Москва, Россия.

Синтезированы тетраалкиламмоний тетрагетравольфраматы (ТААТТВ), включающие алкильные группы различной природы. Полученные соединения охарактеризованы элементным анализом, оптическими методами и термогравиметрически. Методом термосольволиза ТААТТВ получены частицы WS_3 , растворимые и стабильные в неполярных углеводородах. Размеры частиц WS_3 оказались равными 10-100 нм в зависимости от природы исходного ТААТТВ. Показано, что растворы наночастиц WS_3 в вазелиновом масле (1-2 масс. %) проявляют противоизносную активность.

Ключевые слова: тетраалкиламмоний тетрагетравольфраматы, наночастицы сульфида вольфрама, противоизносная активность.

В процессах снижения трения и износа высокую активность проявляют серосодержащие соединения молибдена и вольфрама [1]. В отличие от серосодержащих соединений молибдена в литературе встречается немного работ по сульфидам вольфрама, используемых в качестве добавок к смазочным материалам [2, 3].

В настоящей работе представлены результаты по синтезу наноразмерных частиц сульфидов вольфрама, их некоторым физико-химическим характеристикам, а также по исследованию трибологической активности в составе смазочных масел.

Синтез наночастиц WS_3 осуществляли двумя способами. В одном из них на первой стадии проводили взаимодействие тетрагетравольфрамата аммония, $(NH_4)_2[WS_4]^{2-}$ (ТТВА) с тетраалкиламмоний галогенидами, включающими различные алкильные группы: метилтриалкил- (C_8-C_{10}) аммоний хлорид, $[CH_3(C_8-C_{10})_3N]^+Cl^-$ (Адоген), метилтрикаприламмоний хлорид, $[CH_3(C_8H_{17})_3N]^+Cl^-$ (Аликват) или тетрабутиламмония бромид (ТБАБ). Выход продуктов $[CH_3(C_8-C_{10})_3N]^+[WS_4]^{2-}$ и $[CH_3(C_8H_{17})_3N]^+[WS_4]^{2-}$ составлял около 80%, в случае бутильного производного выход был ниже (55%). На второй стадии проводили синтез наночастиц сульфидов вольфрама термической обработкой полученных тетраалкиламмоний ТААТТВ. Другой способ получения наночастиц WS_3 осуществляли *in situ* без выделения промежуточного $[(R_4N)^+(WS_4)^{2-}]$.

С помощью метода динамического светорассеяния определены размеры частиц сульфидов вольфрама, которые оказались равными 10-100 нм в зависимости от природы исходного ТААТТВ.

Изучение трибологических свойств соединений вольфрама проводили с помощью машин трения различных типов. Для определения противоизносной активности использовали 4-х шариковый трибометр ЧМТ-1, измерения проводили по ГОСТ 9490-75. Антифрикционные свойства изучали на трибометре марки УМТ (фирмы Brukner, США), который также включал 4-х шариковый узел тре-

ния (частота вращения 1460 об/мин, нагрузка 200 Н, время опыта 900 сек).

Противоизносные свойства наночастиц WS_3 изучали в растворе вазелинового масла при изменении содержания добавки в масле в пределах 0-2 масс. % (рис. 1).

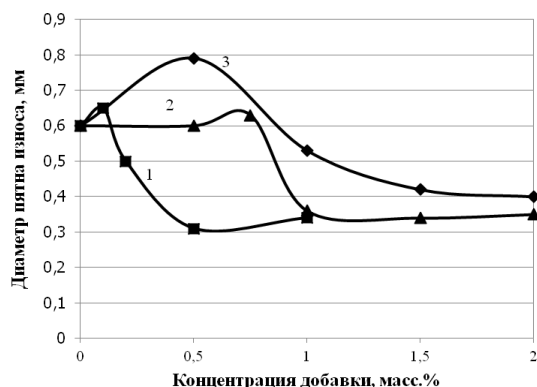


Рис. 1. Зависимость диаметра пятна износа от концентрации добавки в вазелиновом масле для наночастиц, полученных из различных прекурсоров: $[CH_3(C_8-C_{10})_3N]_2WS_4$ (1), $[CH_3(C_8H_{17})_3N]_2WS_4$ (2) и $[(C_4H_9)_4N]_2WS_4$ (3).

Изучение антифрикционной активности растворов наночастиц WS_3 в вазелиновом масле не выявили снижения коэффициента трения в выбранных условиях измерений. Возможно, для обнаружения антифрикционной активности следует использовать иной узел трения и условия трибологического контакта.

Таким образом показано, что полученные наноразмерные частицы трисульфида вольфрама, проявляют высокую противоизносную активность в растворе минерального масла при концентрации 1-2 масс. %.

[1] Bakunin V.N., Suslov A.Yu., Kuzmina G.N., Parenago O.P. Synthesis and application of inorganic nanoparticles as lubricant components // J. Nanoparticle Research. - 2004 (6), 273-284

[2] Rapoport L., Moshkovith A., Perfilov V., and Tenne R. On the efficacy of *if*- WS_2 nanoparticles as solid lubricant: the effect of the loading scheme // Tribol. Lett. - 2007 (28), 81-87

ЖЕСТКОСТНАЯ МОДЕЛЬ СЛОИСТОГО УПРУГОГО ТЕЛА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ТРИБОМЕХАНИКЕ

¹Огар П.М. (ogar@brstu.ru), ¹Горохов Д.Б., ¹Кожевников А.С.

¹Братский государственный университет, Братск, Россия.

Рассмотрен контакт жесткой шероховатой поверхности слоистым упругим полупространством. С использованием жесткостной модели слоистого полупространства определена упругая характеристика для каждой контактирующей неровности. Приведена система трансцендентных уравнений, позволяющая определить зависимость относительной площади при контактировании через слой покрытия в зависимости от параметров шероховатости, свойств материалов, толщины покрытия и приложенной нагрузки.

Ключевые слова: тонкослойное покрытие, слоистое полупространство, шероховатая поверхность, контактные характеристики, относительная площадь контакта.

Одним из перспективных направлений, обеспечивающих повышение эксплуатационных показателей уплотнений и узлов трения, является нанесение на их рабочие поверхности антифрикционных материалов и покрытий из пластмасс, металлов, керамик.

Ранее, используя жесткостную модель слоистого полупространства, авторы [1] определили его упругую характеристику в зависимости от толщины покрытия и упругих констант материалов основания и покрытия. При этом рассматривалось нагружение полупространства нормальной нагрузкой вида

$$p(r) = p_0 \sqrt{1 - r^2/a^2}, \quad 0 \leq r \leq a. \quad (1)$$

В докладе рассмотрена контактная система с однослойным покрытием толщиной δ_1 . Использование выражения (1) для упругопластического контакта может привести к определенным погрешностям, так как при упругопластическом контакте распределение давления описывается следующим выражением [2]:

$$p(r) = p_0 \left(1 - r^2/a^2\right)^\beta, \quad (2)$$

где $0 \leq \beta \leq 0,5$, $p_0 = p_m(1 + \beta)$, $p_m = P/(\pi a^2)$ – среднее давление.

Следуя классическому подходу, основанному на применении потенциальных функций Буссинеску, перемещение любой точки по оси симметрии внутрь однородного полупространства для случая его нагружения распределенной нагрузкой определяются выражениями [3]:

$$u_z = \frac{1 + \nu}{2\pi E} \left[2(1 - \nu)\psi - z \frac{d\psi}{dz} \right], \quad (3)$$

$$\psi = \iint_s p(r) \frac{1}{R} r dr d\varphi, \quad R = \sqrt{r^2 + z^2}.$$

С учетом выражения (2) и того, что $\rho = r/a$ и $\bar{z} = z/a$,

$$\psi = 4p_0 a \int_0^{\frac{\pi}{2}} \int_0^1 \frac{(1 - \rho^2)^\beta \rho d\rho d\varphi}{\sqrt{\rho^2 + \bar{z}}}. \quad (4)$$

После интегрирования имеем

$$\psi = \frac{\pi p_0 a}{1 + \beta} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \bar{z}^2}} \cdot {}_2F_1\left(\frac{1}{2}, 1 + \beta; 2 + \beta; \frac{1}{1 + \bar{z}^2}\right), \quad (5)$$

где ${}_2F_1(a, b; c; x)$ – гипергеометрическая функция Гаусса.

Подставляя выражение (5) в (3) и учитывая, что $\frac{d\psi}{dz} = \frac{d\psi}{a d\bar{z}}$, получим

$$u_z = \frac{p_m a}{E^*} K(\bar{z}, \beta, \nu), \quad (6)$$

где $E^* = \frac{E}{1 - \nu^2}$, $p_m = \frac{p_0}{1 + \beta}$;

$$K(\bar{z}, \beta, \nu) = \frac{1}{\sqrt{1 + \bar{z}^2}} \cdot {}_2F_1\left(\frac{1}{2}, 1 + \beta; 2 + \beta; \frac{1}{1 + \bar{z}^2}\right) - \frac{\bar{z}}{2(1 - \nu)} \cdot \frac{d}{d\bar{z}} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + \bar{z}^2}} \cdot {}_2F_1\left(\frac{1}{2}, 1 + \beta; 2 + \beta; \frac{1}{1 + \bar{z}^2}\right) \right]. \quad (7)$$

Для $\beta = 0$ и $\beta = 0,5$ выражение (7) можно соответственно представить через элементарные функции:

$$K(\bar{z}, 0, \nu) = \frac{2}{\sqrt{1 + \bar{z}^2}} \left(1 + \frac{1}{2(1 - \nu)} \frac{\bar{z}}{\sqrt{1 + \bar{z}^2}} \right); \quad (8)$$

$$K(\bar{z}, 0,5, \nu) = \frac{3}{2} \left[\text{arcctg} \bar{z} + \frac{\nu}{1 - \nu} \bar{z} (1 - \bar{z} \text{arcctg} \bar{z}) \right]. \quad (9)$$

Упростим обозначения, приняв $K_i(0, \beta, \nu_i) = K_i(0)$, $K_i(\bar{\delta}_i, \beta, \nu_i) = K_i(\bar{\delta}_i)$.

Для приведенного модуля упругости и коэффициента Пуассона топокомпозита получено:

$$E_{01}^* = E_1^* \cdot F_1; \quad (10)$$

$$F_1 = K_1(0) \left[\frac{(K_1(0) - K_1(\bar{\delta}_1))^2}{K_{01}(0) - K_{01}(\bar{\delta}_1)} + K_1(\bar{\delta}) \frac{K_0(\bar{\delta}_1)}{K_{01}(\bar{\delta}_1)} \cdot \frac{E_1^*}{E_0^*} \right]^{-1}; \quad (11)$$

$$v_{01} = v_1 + (v_0 - v_1) \frac{1 - F_{01}^{-1}}{1 - E_1^*/E_0^*}. \quad (12)$$

Для случая контакта гладкой жесткой сферы со слоистым полупространством сближение тел, радиус контакта и максимальное давление определяются выражениями:

$$w_{01} = w_1 \cdot F_1^{-\frac{2}{3}}, \quad a_{01} = a_1 F_1^{-\frac{1}{3}}, \quad p_{01} = p_0 F_1^{-\frac{2}{3}}. \quad (13)$$

При контактировании шероховатой поверхности с упругим слоистым полупространством для отдельной неровности параметр $\bar{\delta}_{li}$ можно представить в виде

$$\bar{\delta}_i = \frac{\delta}{a_r} = \frac{\delta}{a_c} \cdot \frac{a_c}{a_r} = \gamma \cdot \eta_i^{-0.5}, \quad (14)$$

где $\gamma = \delta_1/a_c$ – относительная толщина покрытия;

$\eta_i = a_r^2/a_c^2$ – относительная площадь контакта для отдельной неровности; a_c – радиус площадки, приходящийся на одну неровность.

Таким образом, для каждой контактирующей неровности согласно выражениям (10) и (13) имеем:

$$E_{01}^*(\gamma, \varepsilon, u) = E_1^* \cdot F_{li}(\gamma, \varepsilon, u); \quad (15)$$

$$\eta_i(\gamma, \varepsilon, u) = \eta_{li}(\varepsilon, u) \cdot F_{li}^{-\frac{2}{3}}(\gamma, \varepsilon, u); \quad (16)$$

$$\eta_{li}(\varepsilon, u) = (\varepsilon - u)/(2\omega); \quad (17)$$

где $F_{li}(\gamma, \eta_i)$ определяется выражением (11) с учетом (12).

При контактировании жесткой шероховатой поверхности со слоистым упругим полупространством получим:

$$F_{q1}(\gamma, \varepsilon) = \frac{q_c a_c}{E_1^* \omega R_{\max}} = \frac{8}{3\pi} \int_0^{\min(\varepsilon, \varepsilon_s)} \eta_{li}^{1.5}(\varepsilon, u) \varphi'_n(u) du; \quad (18)$$

$$\eta(\gamma, \varepsilon) = \int_0^{\min(\varepsilon, \varepsilon_s)} \eta_{li}(\varepsilon, u) \cdot F_{li}^{-\frac{2}{3}}(\gamma, \varepsilon, u) \varphi'_n(u) du; \quad (19)$$

где $\varphi'_n(u)$ – плотность распределения неровностей по высоте; a_c , ω , R_{\max} – параметры микрогеометрии; q_c – контактное давление.

Для заданных значений γ и ε выражения (18) – (19) совместно с (10) – (12) и (14) – (17) представляют собой замкнутую систему трансцендентных уравнений, позволяющих определить зависимость относительной площади контакта $\eta_1(\gamma)$ от комплексного параметра F_{q1} .

Исследования проведены при поддержке Минобрнауки России в рамках госзадания № 2014/10 на 2016 г. (проект № 1754).

[1] Огар П.М., Ключев Е.А., Максимова О.В. Инженерная методика определения упругих характеристик топокомполитов // Системы. Методы. Технологии. — 2009. № 1. С. 19–22.

[2] Алпатов Ю.Н., Тарасов В.А., Горохов Д.Б., Кожевников А.С. К вопросу определения контактных характеристик в трибосопряжениях на основе топокомполитов // Труды Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. — 2014. Т. 2. С. 39–47.

[3] Джонсон К. Механика контактного взаимодействия. М.: Мир, 1989. — 510 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКОГО ЗАКОНА МАЙЕРА ДЛЯ УЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК УПРОЧНЯЕМОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ВНЕДРЕНИИ СФЕРЫ

¹Огар П.М. (ogar@brstu.ru), ¹Горохов Д.Б., ¹Кожевников А.С.

¹Братский государственный университет, Братск, Россия.

Для описания внедрения сферы в упрочняемое полупространство использован эмпирический закон Майера, связывающий усилие с диаметром отпечатка d . В исследованиях использованы зависимости взаимосвязи экспоненты упрочнения n с индексом Майера m , полученные С.И. Булычевым. Указано на отсутствие необходимости определения констант закона Майера. Приведено сравнение полученных результатов с опубликованными результатами конечно-элементного анализа по внедрению сферы.

Ключевые слова: внедрение сферы, упругопластический контакт, упрочнение материала, экспонента упрочнения, закон Майера.

Введение. Для решения задач трибомеханики широко используется дискретная модель шероховатой поверхности, в которой микронеровности (далее неровности) представлены сферическими сегментами, а распределение вершин неровностей соответствует опорной кривой. Одной из важных проблем при рассмотрении контакта отдельной

неровности является учет упрочнения материала.

В работе [1] для учета упрочнения материала использовался эмпирический закон Майера, который устанавливает связь между усилием при вдавливании сферы и диаметром отпечатка. Авторы подчеркивают влияние индивидуальных физико-механических свойств реальных материалов на

особенности формирования контактных упруго-пластических деформаций, однако влияние таких характеристик исследовано не было, что является недостатком такого подхода.

Целью настоящей работы является использование вышеуказанных характеристик упрочняемого тела при применении закона Майера.

Решение задачи. В зарубежной литературе при описании упругопластического упрочняемого тела получил степенной закон Холломона (Hollomon's power law), согласно которому связь между напряжениями и деформациями при однородном растяжении-сжатии описывается уравнениями

$$\sigma = \begin{cases} \varepsilon E, & \varepsilon \leq \varepsilon_y; \\ \sigma_y (\varepsilon/\varepsilon_y)^n, & \varepsilon > \varepsilon_y; \end{cases} \quad (1)$$

где $\varepsilon_y = \sigma_y/E$, σ_y – предел текучести, E – модуль упругости; n – экспонента упрочнения.

Е. Майер первым описал поведение материала в упругопластической области законом, который связывает нагрузку P с диаметром отпечатка d

$$P = Ad^m. \quad (2)$$

Выражение (2) часто представляют в виде

$$\frac{4P}{\pi d^2} = p_m = HM = A \left(\frac{d}{D} \right)^{m-2} = A^* \left(\frac{a}{R} \right)^{m-2}, \quad (3)$$

где M – твердость по Майеру; m – индекс Майера; A , A^* – константы, причем A^* имеет размерность напряжения; $D = 2R$ – диаметр сферы, $d = 2a$.

Согласно [2]

$$A^* = 2HB_{\max}/k_m, \quad (4)$$

$$k_m = m^{\frac{m}{2}} (m-1)^{1-m} (m-2)^{\frac{m-2}{2}}.$$

Подставляя константу A^* в выражение (4) имеем

$$p_m = HM = \frac{2}{k_m} HB_{\max} \left(\frac{a}{R} \right)^{m-2}. \quad (5)$$

Из работы [3] следует, что

$$\sigma_B = k \cdot HB, \quad (6)$$

где $k = 0,333$ для углеродистых и перлитных низколегированных сталей, для других материалов значения k приведены в [3, табл. 1.2], которые можно аппроксимировать выражением:

$$k = k(n) = 0,280 + 0,888n^{1,719}. \quad (7)$$

По данным С.И. Булычева [4] предельная равномерная деформация ε_p , соответствующая σ_B равна

$$\varepsilon_p = n = 0,961(m-2). \quad (8)$$

Отсюда

$$m = 2 + 1,041n. \quad (9)$$

Из выражения (6) с учетом (1) имеем

$$HB = \frac{\sigma_y}{k} n^n \cdot \varepsilon_y^{-n}. \quad (10)$$

Для усилия $P = \pi a^2 p_m$ с учетом (10) получим

$$P = 2\pi \frac{\sigma_y a^2}{k \cdot k_m} n^n \varepsilon_y^{-n} \left(\frac{a}{R} \right)^{m-2}. \quad (11)$$

С учетом (9)

$$\frac{P}{E^* R^2} = \frac{2\pi}{k \cdot k_n} n^n \varepsilon_y^{1-n} \left(\frac{a}{R} \right)^{2+1,041n}, \quad (12)$$

где E^* – приведенный модуль упругости;

$$k_n = \frac{(2+1,041n)^{1+0,5025n}}{(1+0,041n)^{1+0,041n}} (1,041n)^{0,5025n}. \quad (13)$$

Так как $a = \sqrt{2Rh_c} = \sqrt{2Rc^2 h}$, где h_c – глубина, по которой происходит контакт сферы с полупространством, h – глубина внедрения от исходной поверхности, то имеем

$$\frac{P}{E^* R^2} = \bar{P} = \frac{2\pi}{k \cdot k_n} n^n \varepsilon_y^{1-n} (2c^2 \bar{h})^{1+0,5025n}, \quad (14)$$

где $\bar{h} = h/R$; параметр $c^2 = h_c/h$ следует определять согласно данным работы [5].

Как следует из рис. 1, имеется достаточно хорошее совпадение, что позволяет применять выражение (14) для инженерных расчетов.

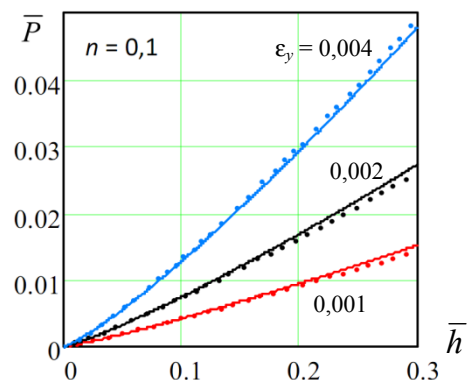


Рис. 1. Зависимости $\bar{P} - \bar{h}$: для значений $\varepsilon_y = 0,001; 0,002; 0,004$; $n = 0,1$; сплошные линии – по выражению (15); пунктирные линии – согласно [6]

Выводы.

1. Используя эмпирический закон Майера, который изначально не связан с физико-механическими свойствами материалов, получены выражения для определения площади контакта и величины внедрения сферы.

2. При этом учитываются характеристики упругопластического тела $\varepsilon_y = \sigma_y/E^*$, экспонента упрочнения n и отсутствует необходимость определения констант закона Майера m и A^* .

3. Дальнейшее совершенствование предлагаемого метода возможно путем уточнения зависимостей (7) и (9).

Исследования проведены при поддержке Минобрнауки России в рамках госзадания № 2014/10 на 2016 г. (проект № 1754).

[1] Болотов А.Н., Мешков В.В., Сутягин О.В., Васильев М.В. Влияние упрочнения на характеристики упругопластического контакта микронеровностей поверхностей // Известия Самарского научного центра РАН. 2013. Т.15. № 4(2). С. 313-315.

[2] Огар П.М., Тарасов В.А., Горохов Д.Б., Турченко А.В. Учет характеристик упрочняемого материала при применении эмпирического закона Майера // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 4. С. 50-54.

[3] Марковец М.П. Определение механических свойств металлов по твердости. М.: Машиностроение, 1979. 191 с.

[4] Булычев С.И. Твердость и гистерезис на пределе текучести // Деформация и разрушение материалов. 2011. № 1. С. 41-45.

[5] Hernot X., Bartier O., Bekouche Y., Mauvoisin G., El Abdi R. Influence of penetration depth and mechanical properties on contact radius determination for spherical indentation // International Journal of Solids and Structures. 2006. № 43. P. 4136-4153.

[6] Collin J.-M., Mauvoisin G., Pilvin P. Materials characterization by instrumented indentation using two different approaches // Materials and Desing. 2010. V. 31. P. 636-640

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЮЧЕ-СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Орешенков А.В., Степанова С.Е.

ФАУ «25 ГосНИИ химмотологии Минобороны России, Москва, Россия.

(25gosniihim@mil.ru)

Приведены схемы приборов, методы испытаний и показатели качества трибологических характеристик товарных топлив, жидких и пластичных смазочных материалов различного назначения, а также нормы по указанным показателям, установленные в нормативной документации для перечисленных продуктов, и диапазон их значений.

Ключевые слова: прибор, метод, показатели качества, трибологические характеристики, топлива, масла, пластичные смазки, нормы, значения.

Трибологические характеристики – показатели качества, характеризующие противоизносные и противозадирные свойства горюче-смазочных материалов. Оценивают трибологические характеристики методами, регламентированными рядом стандартов, суть которых заключается в определении критической нагрузки (P_K), в Н, нагрузки сваривания (P_C), в Н, индекса задира (I_3), в Н, и диаметра пятна износа ($D_{и}$), измеряемого с помощью инструментального микроскопа в мкм или мм, по результатам испытаний опытного образца на различных машинах (аппаратах), реализующих трение скольжения. Сходимость и воспроизводимость результатов измерений трибологических характеристик с $P = 0,95$ не превышают, соответственно, 10 % и 20 % абсолютных значений измеряемой величины.

Трибологические характеристики дизельных топлив с низким (не более 350 мг/кг) содержанием природных, в основном сераорганических соединений, и топлив судовых оценивают по методам, регламентированным [1, 2], на трибометре HFRR (High Frequency Reciprocating Rig). Суть метода заключается в измерении $D_{и}$, в мкм, стальной пластины, сопряженной под нагрузкой 0,02 Н с шариком, совершающим высокочастотные возвратно-поступательные движения в среде испытуемого топлива (2 см^3) при температуре 60°C в течение 60 мин (рис.1).

Металл шарика и пластины, твердость и шероховатость их поверхности, частота и амплитуда колебаний шарика, температура и влажность окружающей среды строго регламентированы в стандартах на метод. Показатель качества $D_{и}$ и метод его оценки включены в ГОСТ 32511 и ГОСТ

Р 52368 на топлива дизельные ЕВРО и топлива судовые дистиллятные, вырабатываемые по ГОСТ 32510. Значение показателя $D_{и}$ в соответствии с требованиями стандартов не должно превышать, соответственно, 460 мкм на все сорта, классы и виды дизельного топлива и 520 мкм – топлив судовых дистиллятных, вырабатываемых по этим нормативным документам. Значения $D_{и}$ у дизельного топлива II вида, вырабатываемого по ГОСТ 305, с содержанием серы 200–350 мг/кг составляют: летнего 450–550 мкм, зимнего 570–660 мкм, арктического более 650 мкм и газоконденсатного 530–630 мкм.

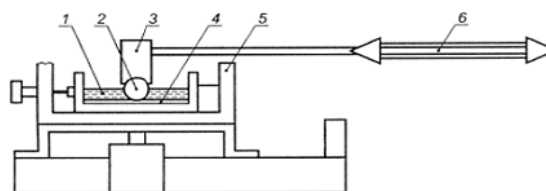


Рис. 1. Схема трибометра HFRR

1 – испытуемый смазочный материал; 2 – контрольный шарик; 3 – цапфа шарика; 4 – неподвижная стальная пластина; 5 – корпус трибометра; 6 – осциллирующее устройство.

Оценку трибологических характеристик топлив для реактивных двигателей осуществляют по методу [3] на аппарате BOCLE (Ballon-on-Cylinder Lubricity Evaluator). Узел трения аппарата представляет собой неподвижный стальной шарик диаметром 12,7 мм с твердостью по Роквеллу 64÷66, закрепленный в вертикальный патрон и прижатый с нагрузкой 0,1 Н к горизонтально закрепленному вращающемуся с постоянной частотой 240 мин^{-1} стальному цилиндру (твердость по Роквеллу 58÷62), частично погруженному в резер-

вуар с испытуемым топливом (рис. 2). Испытания проводят при температуре опытного образца топлива 25°C и относительной влажности воздуха в зоне трения 10 % в течение 30 мин. О противозносных свойствах топлива судят по значению диаметра пятна износа шарика $D_{и}$, в мм.

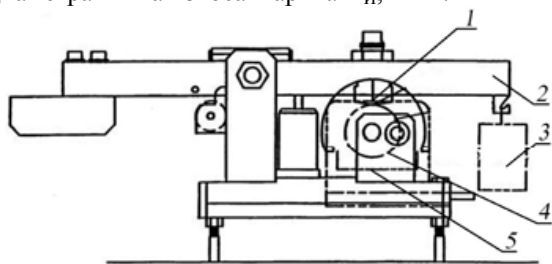


Рис. 2. Схема аппарата ВОСЛЕ

1 — неподвижный стальной шарик; 2 — нагрузочный рычаг; 3 — груз; 4 — вращающийся стальной цилиндр; 5 — резервуар с испытуемым топливом

Показатель качества и метод его оценки включены в ГОСТ 32595 и ГОСТ Р 52050 на топливо для газотурбинных двигателей Джет А-1 (Jet А-1). Значение нормы по показателю $D_{и}$ в соответствии с требованиями стандартов не должно превышать 0,85 мм.

Трибологические характеристики жидких и пластичных смазочных материалов оценивают по методу, регламентированному [4], на четырехшариковой машине трения (ЧШМ). Узел трения ЧШМ (рис. 3) представляет собой пирамиду из четырех контактирующих друг с другом стальных шариков из стали ШХ15 диаметром 12,7 мм.

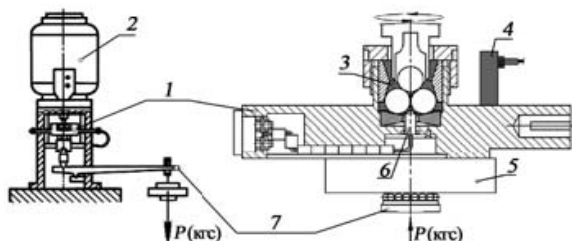


Рис. 3. Схема ЧШМ

1 — чашка; 2 — электродвигатель; 3 — испытуемый смазочный материал; 4 — преобразователь сигнала; 5 — опорная плита; 6 — термомпара; 7 — нагружающее устройство.

Три нижних шарика установлены неподвижно в чашке машины с испытуемым смазочным материалом. Верхний шарик, закрепленный в

шпинделе машины, вращается относительно трех нижних под заданной нагрузкой с частотой $1460 \pm 70 \text{ мин}^{-1}$. Конструкция ЧШМ позволяет в широких пределах изменять нагрузки, скорости скольжения, температурный режим. Испытания предусматривают серию определений. Продолжительность работы машины при текущей нагрузке в процессе определения P_K , P_C и I_3 составляет 10 с, при определении $D_{и}$ — 60 мин. При определении P_K и P_C проводят последовательные испытания с убывающими или возрастающими нагрузками. Критической нагрузкой считают нагрузку, при которой средний $D_{и}$ нижних шариков находится в диапазоне значений предельного износа для данной нагрузки (значение оговорено в ГОСТ 9490) и увеличение которой до величины последующей нагрузки вызывает увеличение среднего $D_{и}$ на величину более 0,1 мм. Нагрузкой сваривания считают наименьшую нагрузку, при которой произошла автоматическая остановка машины при достижении момента трения $(1180 \pm 25) \text{ Н}\cdot\text{см}$ или сваривание шариков, или образуется пятно износа средним диаметром 3 мм и более. Индекс задира вычисляют по формуле :

$$I_3 = \frac{\sum Q_i}{n}, \quad (1)$$

где $\sum Q_i$ — сумма условных нагрузок от начальной нагрузки до ближайшей нагрузки, предшествующей P_C , Н; n — число определений.

Для каждой нагрузки вычисляют Q_i по формуле:

$$Q_i = P_i \frac{d_{ri}}{d_i}, \quad (2)$$

где P_i — осевая нагрузка, Н; d_{ri} — диаметр зоны упругой деформации шариков по Герцу при нагрузке P_i , мм; d_i — средний диаметр пятен износа нижних шариков при нагрузке P_i , мм.

Значение среднего $D_{и}$ нижних шариков определяют при постоянной нагрузке, установленной в нормативном документе на смазочный материал. Основой является нагрузка 196 Н. За $D_{и}$ принимают среднее арифметическое значение результатов двух последовательных определений.

Диапазон значений трибологических характеристик некоторых групп масел и антифрикционных пластичных смазок приведен в табл. 1.

Таблица 1. Диапазон значений трибологических характеристик некоторых групп смазочных материалов

Масла											
для бензиновых двигателей			для судовых, тепловозных и стационарных дизелей			авиационные			для судовых газовых турбин		
Показатели (P_K , I_3 , P_C — в Н; $D_{и}$ — в мм)											
P_K	I_3	$D_{и}$	P_K	I_3	$D_{и}$	P_K	I_3	$D_{и}$	P_K	I_3	$D_{и}$
700–800	36–37	0,3–0,4	700–800	34–37	0,35–0,45	490–900	–	0,35–0,8	700–900	–	0,35–0,60
Масла									Пластичные смазки		
трансмиссионные			гидравлические			индустриальные			антифрикционные		
Показатели (P_K , I_3 , P_C — в Н; $D_{и}$ — в мм)											
P_C	I_3	$D_{и}$ (при 392 Н)	P_K	I_3	$D_{и}$	P_K	I_3	$D_{и}$	P_K	P_C	
3200–4000	490–600	0,50–0,55	350–400	–	0,45–0,50	700–800	350–550	0,35–0,50	500–4000	2000–10 000	

Значения I_3 , P_K и P_C в различных сочетаниях и $D_{И}$, определяемые на ЧШМ, характеризуют, соответственно, противозадирные и противоизносные свойства смазочных материалов.

[1] ГОСТ ISO 12156 – Топливо дизельное. Определение смазывающей способности на аппарате HFRR. Часть 1. Метод испытаний.

[2] ASTM Д 6079 - Метод определения смазывающей способности дизельных топлив.

[3] ASTM D 5001 – Standard test method for measurement of lubricity of aviation turbine fuels by the ball-on-cylinder lubricity evaluator (BOCLE).

[4] ГОСТ 9490 – Материалы смазочные жидкие и пластичные. Метод определения трибологических характеристик на четырехшариковой машине трения.

НЕОБЫЧНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПРОТИВОИЗНОСНЫХ СВОЙСТВ ОТ СОСТАВА СМЕСИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ МАСЕЛ С ПОЛИОРГАНОСИЛОКСАНАМИ

Павелко Г.Ф. (pavelko@ips.ac.ru), Бондаренко Г.Н., Бордубанова Е.Г.,
Займовская Т.А., Лядов А.С., Паренаго О.П.

Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, Москва, Россия.

При изучении зависимости противоизносных свойств от состава смеси углеводородных масел с полиорганосилоксанами обнаружено, что добавление около 10 мас. % углеводородного масла к полиорганосилоксану приводит к заметному росту диаметра пятна износа, который при дальнейшем повышении содержания углеводородного масла в смеси резко снижается.

Ключевые слова: противоизносные свойства, противозадирные свойства, углеводородные масла, полиорганосилоксан 132-24.

В связи с проблемой создания низко застывающих пластичных смазок и выбора для этих целей соответствующих базовых масел проведено изучение физико-химических и трибологических свойств смесей углеводородных масел и полиорганосилоксанов. В качестве кремнийорганического компонента выбран полиэтилсилоксан марки Ж 132-24. Углеводородными маслами служили минеральное масло И-20А, синтетические масла: диоктилсебацат, ДОС и полиалкилбензол марки ПАБ-С, а также модельный углеводород – гексадекан. Исследование величины диаметра пятна износа (ГОСТ 94-75) при различном соотношении минерального масла И-20А (ММ) и силиконовой жидкости (СЖ) показало, что имеет место необычная зависимость противоизносных свойств от состава смеси (рисунок).

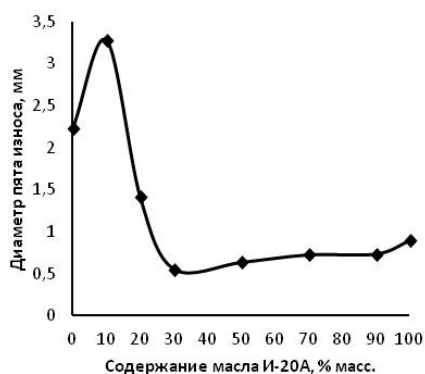


Рис. 1. Зависимость диаметра пятна износа от содержания ММ в СЖ.

Как следует из полученных данных, введение 10 мас. % масла И-20А в полиорганосилоксан приводит к заметному снижению противоизносных свойств смеси. Дальнейшее разбавление кремнийорганического масла углеводородным компонентом резко повышает противоизносную активность системы. Аналогичные зависимости получены для смесей кремнийорганического компонента с другими углеводородными маслами (гексадекан, полиалкилбензол и диоктилсебацат).

Определение противозадирных параметром (P_K , P_C , I_3) выявило два экстремума: при содержании 10 мас. % ММ и 90 мас.% СЖ наблюдалась минимальная противозадирная активность, а при содержании 95 мас. % ММ и 5 мас. % СЖ – максимальное улучшение этих свойств. На кривых зависимости вязкости и плотности от соотношения углеводородного масла и кремнийорганического компонента также не наблюдалось наличия особых точек, для плотности получена линейная зависимость, для вязкости – параболическая.

По данным флуоресцентной рентгеновской спектроскопии, продукты износа содержат соединения железа (скорее всего, в виде FeO) и кремния, причем количество железа повышается, а количество кремния уменьшается при использовании смеси, включающей 10% ММ и 90% СЖ, по сравнению с чистой СЖ. Согласно литературным данным [1–7], при содержании 5–10 мас. % полиорганосилоксанов в растворе углеводородных масел смазочное действие таких смесей улучшается. По мнению авторов работы, [7], это связано с тем, что при определенном соотношении полиорганосилоксанов и углеводородных масел в условия граничного трения на стальных поверхностях об-

разуется твердый подслои, насыщенный кремнием с повышенной твердостью и покрытый мягким слоем, например, FeO, что и обеспечивает его более высокие противозадирные свойства. Однако, как показано в настоящей работе, в противоположной области концентраций компонентов, т. е., при содержании 5–10% углеродородных масел в растворе полиорганосилоксанов, противозадирные свойства раствора ухудшаются. Таких сведений в литературе нами не обнаружено.

Можно полагать, что причиной такого аномального проявления противозадирных свойств у смеси, содержащей в разных соотношениях угле-

водородный и кремнийорганический компоненты, связано как с конкуренцией между этими маслами в процессе хемосорбции на поверхности металла, так и с различной прочностью образующихся при этом хемосорбционных слоев.

- [1] Johnson R. L. et. al., NACA TN 2940 (1945)
- [2] Merker R. L., Zisman W. A., Ind. Eng. Chem., 41, 2546(1949)
- [3] Murray S. F., Johnson R. L., NACA TN 2788 (1952)
- [4] Kowley C. W., et. al., ASLE Trans., 1, 281 (1958)
- [6] Klaus E. E. et. al., J. Chem. Eng. Data, 6, 99 (1961)
- [5] Godfrey D., ASLE Trans., 5, 57 (1962)
- [7] Vinogradov G. V., ASLE Trans., 5, 64 (1962)

КОМПОЗИЦИОННЫЕ АНТИФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСИНЫ

¹Памфилов Е.А. (pamfilov@bgita.ru), ²Шевелева Е.В., ²Прусс Б.Н.

¹Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия;

²Брянский государственный инженерно-технологический университет, Брянск, Россия.

Рассмотрены способы изготовления новых композиционных антифрикционных материалов, управление составом и структурой композиционных материалов, в том числе и новых теплоаккумулирующих, позволяющих расширить возможности их использования

Ключевые слова: узлы трения скольжения, древесно-металлические материалы, теплоотводящие пластмассы, теплоаккумулирующие материалы.

Для изготовления деталей узлов трения оборудования лесного комплекса, сельскохозяйственной техники и ряда других машин, работающих в условиях действия вибраций, динамических нагрузок, абразивного и химического воздействия, недостаточной смазке целесообразным является использование композиционных антифрикционных материалов.

Это связано с тем, что, несмотря на разнообразие такого оборудования, практически все его виды отличает повышенный износ деталей узлов скольжения.

Отличительными эксплуатационными особенностями таких узлов, является то, что процесс их изнашивания представляет собой совокупность реализации сложных явлений, происходящих на функциональных поверхностях и в граничных слоях сопрягаемых деталей пары трения. К таким явлениям относятся деформирование и износ, усугубляемые действием абразива и циклического нагружения, а также проявлением явления схватывания.

Для улучшения триботехнических характеристик узлов скольжения рекомендуется вводить оптимизирующие наполнители в антифрикционный материал, создавая таким образом, более работоспособную гетерогенную структуру. Требуемые свойства таких материалов достигаются за счет комбинирования различных составляющих в композите, которое обеспечивает получение новых материалов, проявляющих не только свойства отдельных исходных компонентов, но и имеющих

определенные совокупные характеристики за счет проявления синергетического эффекта [1, 2, 3].

За счет этого в рассматриваемых материалах суммируются положительные свойства полимерной матрицы (самосмазываемость, задиростойкость, отсутствие шаржирования, коррозионная стойкость, пластичность) и металлического наполнителя (механическая прочность, жесткость, теплостойкость). При этом для создания требуемых эксплуатационных параметров матрицы можно эффективно использовать такой растительный полимер, как древесина различных пород [2, 3].

В качестве металлической составляющей, применяемой, например, для изготовления антифрикционных вкладышей узлов скольжения, эксплуатируемых в условиях действия повышенных температур, возможно использование теплоаккумулирующих наполнителей. Это способствует оптимизации теплофизических свойств создаваемых композиционных материалов. Такой эффект достигается как за счет увеличения количества теплоотводящих металлических компонентов, так и за счет обеспечения возможности аккумуляции тепловой энергии структурными составляющими вследствие теплопоглощения, происходящего при фазовых превращениях эвтектичного или эвтектического характера.

В этом случае выделяющееся при трении тепло отводится как металлическими включениями вследствие их высокой теплопроводности, так и расходуется в них на плавление легкоплавкого содержимого металлических элементов. При этом в течение процесса перехода материала в жидкое

состояние дальнейшего увеличения температуры деталей, выполненных из теплоаккумулирующего материала, не происходит. Таким образом, размещение в модифицированной древесине теплоаккумулирующих элементов из легкоплавкого сплава не только повышает эффективность отвода тепла из зоны трения, но и понижает температуру работы рассматриваемых деталей [4].

Древесно-металлические узлы скольжения, также могут быть выполнены с вкладышем из антифрикционного композитного материала, представляющего собой теплопроводящий элемент в виде древесной ленты из шпона и металлической полосы, расположенной по спирали между отдельными чередующимися слоями [5].

Таким образом, использование описываемых композиционных материалов позволяет в существенной степени снизить недостатки отдельных структурных составляющих, позволяет обеспечить получение повышенных механических, теплофизических и триботехнических характеристик путем комбинирования различных по природе материалов.

Древесина, благодаря своему пористому и волокнистому строению, способна обеспечить режим самосмазывания, обладает возможностью сопротивляться абразивному воздействию, гасить вибрационную и ударную нагрузку, поглощать шум.

Использование теплоаккумулирующего эффекта и других параметров матрицы и различных наполнителей способствует созданию перспективных путей дополнительного улучшения теплофизических свойств создаваемых композиционных материалов. Такой эффект также достигается у предлагаемых материалов за счет увеличения количества теплоотводящих металлических компонентов, за счет обеспечения возможности аккумуляции тепловой энергии структурными составляющими вследствие теплопоглощения.

Обеспечение же различных совокупностей триботехнических характеристик применительно к

конкретным машинам может быть достигнуто путем комбинирования в конструкциях подшипников скольжения нескольких материалов, отличающихся различными физико-химическими свойствами.

При этом немаловажную роль играют доступность и стоимость составляющих материал компонентов. С конструктивной точки зрения, проектируя подшипники скольжения, необходимо стремиться исключить возможность трения без смазочного материала, обеспечивая тем самым низкий коэффициент трения при эксплуатации рассматриваемой техники. Это дает возможность работать при больших нагрузках и высоких скоростях скольжения в присутствии абразива без шума, вибраций и перегрева подшипника.

Следует отметить, что управление составом и структурой композиционных материалов, в том числе и новых теплоаккумулирующих, позволяет расширить возможности их использования и в качестве фрикционных, характеризующихся повышенными температурами работы и интенсивным износом.

[1] Памфилов Е.А., Пилюшина Г.А., Прусс Б.Н., Алексеева Е.В. Новые антифрикционные материалы на основе модифицированной древесины // *Материаловедение*. – 2009, № 4, 36-39

[2] Памфилов Е.А., Алексеева Е.В. Перспективные материалы для узлов трения деревообрабатывающего оборудования // *Лесной журнал*. – 2015, № 4, 113-124

[3] Памфилов Е.А., Шевелева Е.В., Муратов Д.И. Создание новых композиционных древесно-металлических материалов // *Лесной журнал*. – 2006, № 2, 60-66

[4] Пат. 2432508 РФ, МПК F 16 C 33/04 F 16 C 33/24. Подшипник скольжения / Памфилов Е.А., Сидоров О.В., Шевелева Е.В., Алексеева Е.В., Пилюшина Г.А.; заявитель и патентообладатель Брянская гос. инж.-техн. акад. № 2007143028/11; заявл. 20.11.2007; опубл. 27.10.2011

[5] Пат. 108519 РФ, UIF 16 C 33/04 F 16 C 33/24. Подшипник скольжения / Памфилов Е.А., Лукаш А.А., Прусс Б.Н., Пилюшина Г.А.; заявитель и патентообладатель Брянская гос. инж.-техн. акад. № 2011113560/11; заявл. 07.04.2011; опубл. 20.09.2011

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА, РАБОТАЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

¹Памфилов Е.А. (pamfilov@bgita.ru), ²Сиваков В.В. (svv@bgita.ru), ²Грядунов С.С.

¹Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия;

²Брянский государственный инженерно-технологический университет, Брянск, Россия.

В статье рассматривается возможность применения плазменной упрочняющей обработки для повышения износостойкости деревообрабатывающего инструмента (рамных и круглых пил, пильных цепей), работающего в условиях низких (отрицательных) температур. Установлено положительное влияние упрочняющей обработки на повышение трещиностойкости стали 9ХФ и доли вязкого разрушения как при положительных, так и при отрицательных температурах.

Ключевые слова: износостойкость, трещиностойкость, древесина, низкие температуры, плазменное упрочнение.

Введение

Износостойкость инструмента, применяемого при обработке древесины [1] (заготовка цепными пилами с последующей первичной распиловкой рамными, круглыми или ленточными пилами) является одной из важных задач, решение которой способствует повышению эффективности предприятий лесопромышленного комплекса. Особенно важна эта задача при заготовке и обработке древесины в условиях низких климатических температурах и при резании мерзлой древесины, так как основные запасы древесины в РФ сосредоточены на севере европейской части страны, Сибири, Урале [2]. Как было установлено [3, 4], износостойкость инструмента в большой степени зависит от величины вязкости разрушения, для повышения которой может применяться упрочняющая обработка [5,6]. На основании ранее проведенных исследований выявлено положительное влияние комбинированной электроискровой и последующей плазменной обработок [7,8].

Материалы и методы

В качестве объекта исследований принимались следующие инструменты: рамные пилы (ГОСТ 5524-75, ГОСТ 10482-74) и круглые пилы (ГОСТ 980-80). Материал указанных инструментов легированная инструментальная сталь 9ХФ (ГОСТ 5950-73).

Для выявления особенностей воздействия условий работы на инструмент необходимо исследование структуры и характеристик исследуемого материала, а также способности плазменной упрочняющей обработки влиять на износостойкость инструмента.

Металлографические и фрактографические исследования проводили для выявления особенностей микроструктуры и вида излома образцов после проведения испытаний на трещиностойкость, т.е. способности материала сопротивляться хрупкому разрушению в зависимости от температуры.

Для выявления зависимости прочностных и пластических характеристик металла от температуры испытаний последняя изменялась от 213 до 293К с шагом 10К. Испытывали образцы в исходном состоянии и образцы, подвергнутые плазменному упрочнению. Зона упрочнения располагалась в первом случае перпендикулярно плоскости трещины, а во втором - проходила по ней. Плазменное воздействие проводилось по образцам, готовым к испытаниям (с надрезом и нанесенной усталостной трещиной). С целью выявления зависимости распространения трещины от погонной мощности плазменной струи упрочнение проводилось по разным режимам.

Испытания образцов проводились на разрывной машине модели Р-20. Исследуемый образец помещался в термоизолирующую камеру. Необходимая температура образца достигалась применением паров азота.

Результаты и их обсуждение.

На основании полученных данных при испытании образцов с надрезом и усталостной трещи-

ной на разрыв построена характерная диаграмма разрушения, общий вид которой представлен на рис.1. Диаграмма разрушения образцов относится к первому типу, поэтому разрушающая нагрузка R_c совпадает с нагрузкой P_Q , соответствующей началу неустойчивого роста трещины.

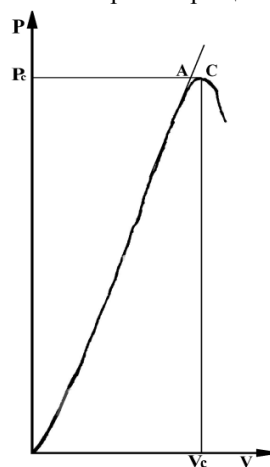


Рис.1. Диаграмма разрушения образца.

Обработка результатов испытаний позволила установить, что при температуре 293К величина критического коэффициента интенсивности напряжений КС составляет $141,3 \pm 5,2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$. При понижении температуры испытаний трещиностойкость образцов уменьшается в 1,5-2 раза (рис.2). Причем, наиболее сильное изменение величины КС происходит при температурах 213-233К. Исследование поверхностей излома образцов показывает, что понижение температуры испытаний приводит к снижению доли вязкого и возрастанию доли хрупкого разрушения.

Металлографический анализ показал, что трещиностойкость стали существенно зависит от структуры металла и характера распределения карбидных включений. При равномерном распределении мелких карбидов по всей металлической матрице наблюдаются наиболее высокие значения вязкости разрушения, полосчатая карбидность снижает трещиностойкость. Равномерное распределение крупных карбидов соответствует средним или близким к средним значениям трещиностойкости.

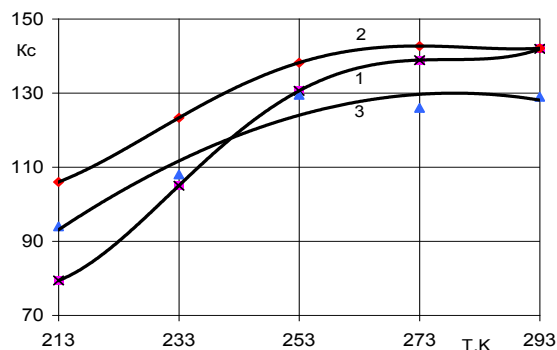


Рис.2. Зависимость трещиностойкости от температуры испытаний: 1 - исходный образец; 2 - образец с зоной упрочнения перпендикулярно надрезу; 3 - образец с зоной упрочнения параллельно надрезу.

Параметр КС является объемной характеристикой материала, поэтому он должен определяться на однородном материале. При наличии же упрочненных зон определение величины критического коэффициента интенсивности напряжений КС не совсем корректно. Поэтому исследовалось влияние параметров плазменного упрочнения на характер распространения трещины.

На основании испытания образцов с зоной плазменного упрочнения, расположенной перпендикулярно и параллельно инициирующей трещине установлено, что в результате упрочнения происходит ветвление траектории трещины. При этом трещина старается обойти упрочненную зону, развиваясь по зоне скоростного отпуска, расположенной между зоной термического воздействия и структурой основного металла. Эта зона обладает более низкой микротвердостью и дисперсной структурой высокого отпуска. Разрушение металла закаленной зоны происходит с образованием более гладкого и дисперсного микрорельефа, чем основной металл, за счет более высокой микротвердости и многократно увеличившейся плотности дислокаций. На изломах в зоне отпуска на фоне преобладающего квазискола имеются участки вязкого ямочного разрушения.

Наиболее ярко эффект ветвления траектории трещины проявляется при параллельном расположении зоны плазменного упрочнения относительно инициирующей трещины. С повышением погонной мощности плазменной струи существенно изменяется картина разрушения не происходит.

Сравнительные испытания упрочненных образцов в области отрицательных температур показали, что доля вязкого разрушения снижается, однако она оказывается больше, чем у исходных образцов.

ОСОБЕННОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

¹Памфилов Е.А. (pamfilov@bgita.ru), ²Пилюшина Г.А.

¹Брянский государственный университет, Брянск, Россия;

²Брянская государственная инженерно-технологическая академия, Брянск, Россия.

Рассмотрены вопросы изнашивания хромованадиевых сплавов в условиях ударно-абразивного нагружения. Выявлены основные закономерности изнашивания хромованадиевых сплавов, связанные с их структурным состоянием.

Ключевые слова: ударно-абразивное изнашивание, хромованадиевые сплавы, аустенитно-мартенситная матрица.

Причина преждевременного выхода из строя многих деталей машин, механизмов и инструмента дорожно-строительной и землеройной техники связана с упругопластической деформацией взаимодействующих поверхностей, сопровождающейся в ряде случаев внедрением твердых абразивных частиц, вызывающих в зоне удара отрыв частиц металла с поверхности соударения или её хрупкое выкрашивание.

Выводы

Таким образом, можно отметить, что применение упрочняющей обработки позволяет изменить процесс распространения трещины, увеличивая работу по ее распространению за счет ветвления траектории. Это способствует более длительному процессу распространения трещины и, тем самым, повышает стойкость материала инструмента, что является особенно актуальным при обработке древесины в условиях низких (отрицательных) температур.

[1] Памфилов Е.А., Петренко Н.М. К вопросу о механизме изнашивания дереворежущего инструмента // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. -1978. - № 3. - С.148.

[2] Сиваков В.В. Определение возможностей повышения износостойкости дереворежущего инструмента в условиях климатически низких температур// Актуальные проблемы лесного комплекса. -2013. -№ 37. -С.195-198.

[3] Соловьев В.В., Михайлова А.Р. К вопросу о прочности рамных пил //Лесной журнал. - 1982. - №1. -С.77-80.

[4] Памфилов Е.А., Пыриков П.Г., Заикин А.Н., Меркелов В.М. Обеспечение работоспособности рабочих органов и инструментов машин и оборудования лесного комплекса // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. -2010. -№ 3. - С.77.

[5] Сиваков В.В. Повышение износостойкости режущих рабочих органов лесозаготовительных машин и инструмента для резания мерзлой древесины. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. -Брянск, 2000.

[6] Сиваков В.В. К вопросу о влиянии температуры на трещиностойкость инструментальной стали 9ХФ // Новые материалы и технологии в машиностроении. -2009. - № 10. -С.100-102.

[7] Памфилов Е.А., Грядунов С.С., Сиваков В.В. Электрофизический способ упрочняющей обработки дереворежущего инструмента // Деревообрабатывающая промышленность. - 2000. - №1. -С.16-18.

[8] Памфилов Е.А., Грядунов С.С., Сиваков В.В. Повышение износостойкости дереворежущего инструмента методом комплексного упрочнения// Вестник машиностроения. -2000. - №3. -С.45-46.

Износостойкость этих деталей резко снижается в зимний период работы вследствие контактирования с мерзлым грунтом. Это приводит к сокращению объема выполняемых работ, простоям оборудования и значительным непроизводительным затратам, что снижает технико-экономическую эффективность использования указанной техники.

Решение рассматриваемой проблемы возможно путем применения высокоизносостойких материалов и использования эффективных упрочняющих технологий. В этой связи нами исследовались хромованадиевые сплавы с различным количеством карбидной фазы и матрицей соответствующей верхней и нижней границам диапазона содержания углерода, в котором наблюдается эффект композиционного упрочнения за счет объемного армирования матрицы сплавов карбидной фазой в виде дендритообразного каркаса, вследствие чего обеспечивается высокий комплекс механических и противоизносных свойств.

Испытание сплавов на изнашивание при ударе [1] проводилось с частотой соударения образцов с абразивной поверхностью 1 с, а энергию удара варьировали от 1 до 7 Дж/см².

Проведенные исследования позволили выявить особенности механизма изнашивания хромованадиевых сплавов, связанные с их структурным состоянием.

При ударном изнашивании высокотвердых однородных материалов наблюдается локальное воздействие абразивных частиц, приводящее к трещинообразованию с последующим скалыванием микрообъемов поверхностного слоя в момент соударения, что способствует протеканию износа путем микровыкрашивания.

При изнашивании гетерогенных материалов наличие в высокотвердой матрице хрупких включений упрочняющей фазы, например, карбидов, облегчает зарождение, развитие и слияние микротрещин. Структура материала, в котором карбиды равномерно распределены в вязкой матрице, выгодно отличается по сопротивлению изнашиванию. Здесь карбиды оказывают повышенное сопротивление внедрению зерен абразива, а вязкая матрица препятствует распространению микротрещин [2].

Преимущественным механизмом разрушения микрообъемов сплавов с мартенситной и аустенитно-мартенситной матрицами в условиях нормальных температур является квазискол, что подтверждается наличием фасеток квазискола, ступенек и ручьиного узора. Для поверхностей образцов сплавов с аустенитной матрицей характерны процессы пластического передеформирования микрообъемов основы и наличие отдельных небольших участков скола, соответствующих участкам тройной эвтектики, что свидетельствует о смешанном характере разрушения [3].

При понижении температуры испытаний образцов сплавов с мартенситной и аустенитно-мартенситной матрицами наряду с квазисколом

появляются участки скола, возрастает количество и протяженность микротрещин, распространяющихся вглубь материала. Для сплавов с аустенитной матрицей понижение температуры испытаний приводит к сглаживанию микрорельефа поверхности [4].

Для выявления механизма разрушения сплавов на микроуровне при испытаниях образцов на усталость и ударный изгиб и оценки влияния низких температур проводились фактографические исследования изломов ударных образцов исследуемых материалов.

Фактографический анализ изломов выявил механизмы разрушения, которые по принципиальным положениям оказались сходными с механизмами разрушения микрообъемов материалов при ударном изнашивании. Разрушение на микроуровне в обоих случаях носит в значительной степени хрупкий и квазихрупкий характер.

Выявленная аналогия структурного развития микротрещин при различных видах нагружения, характер разрушения микрообъемов сплавов при испытаниях на усталость, ударный излом и ударно-абразивное изнашивание позволяют для качественной оценки исследуемых материалов сопротивляться распространению микротрещин, использовать характеристику трещиностойкости K_c [5].

Перспективы применения сплавов открывают широкие возможности их использования в качестве наплавочных материалов. Для наплавки изготавливали стержневые электроды, отливая прутки в песчано-глинистые формы и покрывая их обмазкой фтористо-кальциевого типа. С целью оценки эффективности применения сплавов в качестве наплавочных материалов их испытание на изнашивание проводилось совместно с наплавками, выпускаемых промышленностью.

На основании результатов проведенных исследований установлены оптимальные для различных условий изнашивания структуры хромованадиевых сплавов и разработаны практические рекомендации по их применению для повышения износостойкости деталей рабочих органов и ходовой части строительных, дорожных и землеройных машин.

Таким образом, наибольшей износостойкостью при энергиях удара 4 Дж/см² и более обладают сплавы и наплавки с аустенитной матрицей и содержанием карбидной фазы 20...22 %, причем с увеличением энергии удара до 7 Дж/см² их преимущество по этому показателю по сравнению с другими материалами возрастает. Для работы в условиях ударно-абразивного воздействия при энергиях удара до 4 Дж/см² можно рекомендовать сплавы с мартенситно-аустенитной основой. Понижение температуры испытаний до 213 К незначительно влияет на износостойкость сплавов с аустенитной и мартенситно-аустенитной матрицами.

[1] ГОСТ 23.212-82. Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытаний материалов на изнашивание при ударе в условиях низких температур/Е.А. Памфилов, В.А. Ковальчук, С.С. Грядунов и др. – М.: Изд-во стандартов, 1982

[2] Памфилов Е.А. Оптимизация упрочняющих технологий и их реализация с целью существенного повышения износостой-

кости штампового и дереворежущего инструмента: дисс. докт. техн. наук - Брянск, 1988 - 350с.

[3] Сильман Г. И., Памфилов Е.А., Грядунов С.С. Повышение износостойкости техники, эксплуатируемой в условиях действия климатически низких температур//Тяжелое машиностроение -2001, №9, 22-27.

[4] Памфилов Е.А., Грядунов С.С., Пилюшина Г.А. Методические основы оценки работоспособности рабочих органов строительных и дорожных машин//Вестник БГТУ-2009, №4, 37-42.

[5] МР 244-87. Обеспечение износостойкости изделий. Повышение долговечности поверхностей, изнашиваемых в условиях низких температур, методами наплавки. / Е. А. Памфилов, С. С. Грядунов и др. М.: ВНИИНМАШ, 1987. 23 с.

ОЦЕНКА СМАЗЫВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТСМ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ АБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ

Панайоти В.А. (lek00@mail.ru)

Московский технологический университет (МИРЭА), Москва, Россия.

В работе исследовалась смазывающая способность разработанной композиции твердого смазочного материала. Оценку проводили по коэффициенту абразивного резания. Представлены результаты зависимости коэффициента от режимов шлифования. Применение смазки способствует снижению коэффициента абразивного резания в 1,6 – 2 раза.

Ключевые слова: твердый смазочный материал, шлифование, сталь, коэффициент абразивного резания.

В современном производстве при шлифовании труднообрабатываемых материалов активно используются твердые смазочные материалы (ТСМ). Эффективность применения твердых смазок требует рассмотрения механизма воздействия смазки на процесс шлифования при взаимодействии абразивного круга и обрабатываемой поверхности [1-4]. Очевидно, что наиболее значительное влияние оказывает снижение сил трения в процессе обработки. Изучению смазывающей способности ТСМ на примере разработанной композиции на основе гексагонального нитрада бора [3] и посвящена данная работа.

В качестве изучаемого показателя процесса взаимодействия шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью принят коэффициент абразивного резания f_a , который определяется как отношение между составляющими силы резания: нормальной P_z и тангенциальной P_v .

Нормальная составляющая силы резания характеризует усилие внедрения зерен абразива в обрабатываемый материал, а тангенциальная составляющая определяет усилие, затраченное на микрорезание, упругую и пластическую деформацию металла и на внешнее трение. Уменьшение этой составляющей свидетельствует об улучшении условий шлифования, в том числе и о снижении работы трения [4]. Влияние режимов резания при шлифовании быстрорежущей стали Р9Ф5 эльборовым кругом ЛО8 С1 100% С10 на коэффициент абразивного резания представлено на рис.1.

При увеличении поперечной подачи от 0,01 до 0,04 мм/дв. ход в условиях смазывания круга коэффициент абразивного резания возрастает с 0,15 до 0,18, т.е. в 1,2 раза (см. рис. 1а). При шлифовании без применения ТСМ значение его увеличивается, соответственно, с 0,28 до 0,31. При смазывании режущей поверхности круга наблюдается резкое снижение коэффициента абразивного резания (в 1,9–1,7 раза).

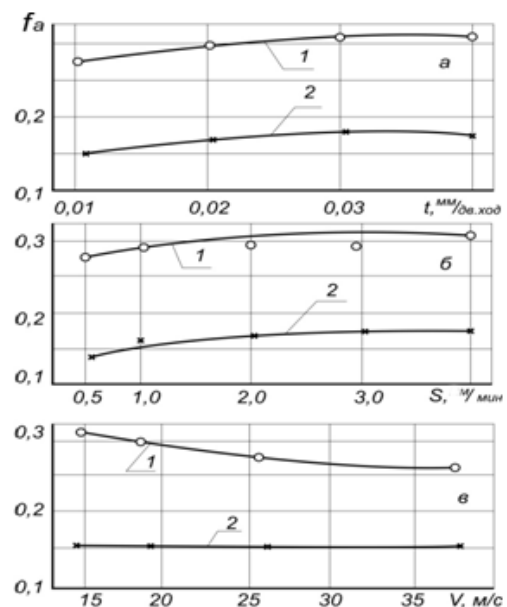


Рис. 1. Изменение коэффициента абразивного резания от поперечной (а) и продольной (б) подачи и скорости резания (в): 1 – без ТСМ; 2 – с ТСМ. а – $V=19$ м/с; $S=1$ м/мин; б – $V=19$ м/с; $t=0,02$ мм/дв. ход; в – $S=1$ м/с; $t=0,02$ мм/дв. ход

Закономерности влияния продольной подачи на коэффициент абразивного резания представлен на рис. 1б. Видно, что применение твердой смазки приводит к значительному снижению коэффициента абразивного резания во всем диапазоне изменения продольной подачи.

Учитывая, что продольная и поперечная подача в разной степени влияют на коэффициент абразивного резания, проведен сравнительный анализ его изменения при повышении интенсивности шлифования от 70 до 140 мм³/мин. Прирост интенсивности шлифования может быть достигнут за счёт увеличения значения одной из подач: либо продольной, либо поперечной. Результаты экспериментального исследования показали, что увеличение продольной подачи является целесообразнее для более полного использования режущих

свойств эльборовых кругов как при обработке с нанесением смазки, так и в обычных условиях.

Коэффициент абразивного резания при шлифовании со смазкой с увеличением скорости круга практически не изменяется (см. рис. 1в) и составляет около 0,16. При обработке с применением ТСМ коэффициент абразивного резания при увеличении скорости уменьшается с 0,32 до 0,26. Необходимо отметить, что наибольшее снижение коэффициента абразивного резания наблюдается при использовании на низких скоростях шлифования.

В результате исследования показано, что смазывание рабочей поверхности круга способствует значительному снижению сил трения при его взаимодействии с обрабатываемым материалом, а значит и приводит к резкому улучшению условий шлифования. Это объясняется хорошей смазы-

вающей способностью исследуемой композиции твердой смазки.

[1] Панайоти В.А. Исследование геометрии рельефа режущей поверхности эльборового круга при шлифовании с твердой смазкой. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2016. №1(315).С.67-71.

[2] Панайоти В.А. Влияние твердых смазок на фазовый состав шлифованной поверхности быстрорежущих сталей / В.А. Панайоти. *Научные труды IV Международная конференция "Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении"*. ИМАШ РАН. - М.: Издательский дом "Спектр", 2015. – С. 189-190.

[3] Корнаев А.В. Роль нанотехнологий в развитии гидродинамической теории смазки /А.В. Корнаев, Л.А. Савин, Ю.С. Степанов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2013. № 6 (302). – С. 69-74.

[4] Попов С.А. и др. Алмазно-абразивная обработка металлов и твердых сплавов.-М.Машиностроение,1977.263

ПРИМЕНЕНИЕ МИЦЕЛЛЯРНОЙ ПРОТИВОИЗНОСНОЙ НАНОПРИСАДКИ НА ОСНОВЕ ДИСЕЛЕНИДА МОЛИБДЕНА В СМАЗОЧНОМ МАСЛЕ СУДОВЫХ ДВС

¹Перекрестов А.П., ¹Свекольников С.А. (sergey080206@yandex.ru), ¹Чанчиков В.А.

¹Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия.

В работе рассматриваются вопросы повышения износостойкости трибосопряжений судовых ДВС за счёт усовершенствования смазочной среды. Особое внимание уделяется трибосопряжению – опоры коленчатых валов судовых ДВС. Проведены трибологические исследования присадки на основе диселенида молибдена, которая повышает триботехнические и эксплуатационные характеристики смазочной среды и по своим характеристикам превосходит базовое смазочное масло.

Ключевые слова: трибосопряжение, судовой ДВС, подшипник скольжения, противоизносная присадка.

Введение

Высокий износ главных двигателей препятствует обеспечению нормальных сроков эксплуатации судна при навигациях и неоправданно снижает срок эксплуатации до очередной переборки. Износ подшипников в большей степени влияет на мощностные и экологические показатели двигателя, что особенно важно в связи с все возрастающими экологическими требованиями.

В связи с этим, повышение интенсивности изнашивания пары трения «шейка вала – вкладыш подшипника» является весьма актуальной задачей, поскольку износостойкость этих узлов трения частично определяет ресурс работы судовых двигателей.

Материалы и методы

Применение противоизносных присадок в картерной системе смазки судовых дизельных двигателей пока еще слабо изучены.

Сегодня широко применяются различные трибологические составы (рис. 1). Эффективность применения каждого из них зависит от многих факторов – концентрации в базовом смазочном масле, условий теплонапряженности пары трения, относительного контактного давления. Это требует от трибологического состава создания на



Рис. 1. Эффективность по снижению трения и изнашивания для типичных трибологических составов, распространенных на отечественном рынке присадок-добавок

поверхности базового металла устойчивых плакирующих структур.

Наиболее активно такие структуры создаются в результате хемосорбционных процессов, которые проходят при участии поверхностно-активных веществ, создающих устойчивые связи с базовой трибологической поверхностью. Общие тенденции в создании таких присадок в качестве модификаторов трения на основе твердосмазочных порошков MoS_2 и MoS_3 были описаны в статье [1]. Эти тенденции заключаются в максимальном измельчении твердой фазы до наноразмерного уров-

ня и стабилизации ее поверхностно-активными веществами. Этим достигается отсутствие коагуляции твердых частиц в крупные агломераты, что немаловажно при ее растворении в объеме смазочного масла.

Поэтому при создании эффективной противоизносной присадки группой авторов решалась задача получения коллоидного раствора с тонкоизмельченной фазой твердого вещества. Усовершенствования состава присадки [2] заключались в дополнении базового твердого ядра частицами порошка диселенида молибдена MoSe_2 , в результате чего, гетерогенная смазочному маслу структура твердого ядра присадки приобретает ярко выраженные твердосмазочные свойства. Диселенид молибдена способен заполнять отдельные микронеровности, остающиеся, как правило, без должной смазки, то есть граничная пленка перекрывает их по всей площади соприкосновения.

Результаты

Данная противоизносная присадка в добавлении 1 об. % к смазочному маслу МС-20 по ГОСТ 21743-76 была подвергнута испытаниям на машине трения СМТ-1 по схеме испытания «колодка-ролик». В сравнительных испытаниях кроме указанного состава присадки участвовало масло МС-20 по ГОСТ 21743-76 как база сравнения и два образца присадки по [4]. Присадки различались по концентрации – в первом случае объемное содержание в базовом масле МС-20 составляло 0,5%, во втором – 1,0%. Таким образом, было проведено 24 шага испытаний (рис. 2), время каждого составляло не менее 2 ч.

В результате трибологических испытаний выявлена улучшенная смазочная способность присадки на основе комплексной формулы твердого ядра $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{MoSe}_2$ [3] по сравнению с чистым маслом и своими противоизносными аналогами по [2].

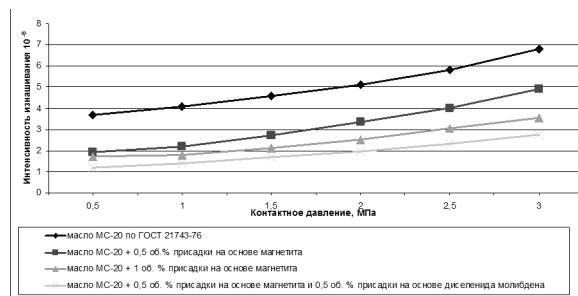


Рис. 2. Результаты противоизносных испытаний

Выводы

Отсюда можно сделать вывод, что диселенид молибдена, измельченный до уровня 100 нм и менее создает на поверхности базового черного металла некое подобие защитной пленки, которая за относительно малое время прирабатывается и прочно удерживается в зоне контакта. Положительная адгезия твердосмазочного вещества на поверхности трения играет большую роль в снижении не только интенсивности изнашивания в течение длительного периода, но и снижает пусковые моменты трения при запуске сопряжения в работу. При испытаниях указанная разница с чистым маслом составляла более чем 50%.

Перечисленные достоинства разработанной присадки на основе $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{MoSe}_2$ [3] дают возможность рекомендовать ее в качестве добавки к базовым смазочным маслам судового назначения, а высокая химическая стабильность состава позволяет применять ее и с присадочными композициями.

[1] Паренаго О.Н. Наноразмерные структуры в углеводородных смазочных материалах / О.Н. Паренаго, В.Н. Бакунин, Г.Н. Кузьмина // Журнал прикладной химии. – №5. – 2003. – С. 10-16.

[2] Патент № 2276681 РФ, МПК С10L 1/18 (2006.01) Противоизносная присадка / Перекрестов А.П., Сычева А.А. - № 2004132806/04, заявл. 10.11.2004; опубл. 20.05.2006, Бюл. № 14. – 5 с.

[3] Патент № 2570643 РФ, МПК С10М 169/04 (2006.01) Противоизносная присадка / Перекрестов А.П., Дроздов Ю.Н. - № 2014130314/04, заявл. 22.07.2014; опубл. 10.12.2015, Бюл. № 34. – 5 с.

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ДИСПЕРГАЦИИ МОДИФИКАТОРА ТРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДИСЕЛЕНИДА МОЛИБДЕНА НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОТИВОИЗНОСНЫХ ПРИСАДОК

¹Перекрестов А.П., ¹Гужвенко И.Н. (ivan.3124@yandex.ru), ¹Чанчиков В.А.

¹Астраханский государственный технический университет, Астрахань, Россия.

В статье приведены сведения о результатах противоизносных испытаний смазочных композиций, в состав которых входит присадка на основе слоистого модификатора трения - диселенида молибдена. Исследовалась зависимость противоизносных свойств смазочной композиции "жидкое масло + модификатор трения" от степени измельчения твердой фазы присадки.

Ключевые слова: противоизносная присадка, смазочная композиция, модификатор трения, дисперсность, диселенид молибдена

Эффективность слоистых (сульфиды, графит, селениды, силициды) и минеральных (серпентиниты) модификаторов трения зависит в немалой сте-

пени, от степени измельчения твердой фазы [1], в особенности тех соединений, которые получены

искусственным путем. Одним из таких соединений выступает диселенид молибдена MoSe_2 [2].

Выработка диселенида молибдена происходит только искусственным путем [3], что предопределяет сложные условия его последующего синтеза в качестве твердосмазочной среды, добавляемой в состав смазочного масла. По этой причине, авторами была поставлена задача качественно синтеза тонкодисперсного порошка диселенида молибдена, отдельные частицы которого стабилизируются введением MoSe_2 в качестве твердой фазы в раствор жирной ненасыщенной кислоты. Указанный раствор состоял из смеси двух кислот - олеиновой $\text{C}_{18}\text{H}_{34}\text{O}_2$ и стеариновой $\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$ в пропорции 1:2. Диселенид молибдена вносился в указанный раствор как 1/10 часть по массовому соотношению со смесью кислот. Обе кислоты выступали в качестве стабилизирующих ПАВ от слипания твердых частиц MoSe_2 , стеариновая выступала кроме того, как ПАВ, расширяющая температурный диапазон действия противоизносной присадки с 80°C до 250°C - по сравнению с чистой олеиновой кислотой. Тем самым, расширился и диапазон применимости противоизносной присадки указанного состава в узлах трения. Конечный размер частиц диселенида молибдена предполагалось получить в пределах 250-500 нм. Указанное требование удовлетворяет применимости противоизносной присадки в картерных системах смазки, прежде всего, двигателей различного назначения. Обосновано это, тем, что частицы MoSe_2 размером менее 0,25-0,5 мкм могут потерять даже под действием применяемых ПАВ свойства взаимного отталкивания и слипнуться, что приведет к дальнейшему выпадению твердой фазы присадки в осадок. В то же время частицы размером более 5-10 мкм элементарно могут быть уловлены фильтрами тонкой очистки смазочной системы и не проявить себя в деле снижения интенсивности изнашивания узла трения. Поэтому от величины размеров частиц зависит как возможность использования противоизносной присадки в стандартной смазочной системе, так и ее конечная трибологическая эффективность.

Для решения указанных задач раствор компонентов вышеуказанной рецептуры был подвергнут диспергации в серийной роторно-пульсационной машине РПУ-0,8-55А-2,2 при частоте вращения смесительного ротора до 2900 об/мин. Периоды диспергации составляли пять значений - от 0,5 до 2,5 ч с шагом дискретности 0,5 ч. Образцы растворов присадки были, кроме того, подвергнуты ультразвуковому измельчению с частотой 43кГц в специальной ванне в течении 20 ч. После проведенных действий 10 образцов растворов противоизносной присадки (то есть 5 образцов только после измельчения на РПУ и 5 образцов дополнительно обработанных ультразвуковым полем) были смешаны в пропорции 1,0 об. % с маслом МС-20 (база сравнения) и испытаны на серийной машине трения СМТ-1. Результаты противоизносных испытаний по схеме "колодка-

цилиндр" с образцами из серого чугуна, используемого для заливки цилиндрических гильз судового назначения приведены на рис. 1.

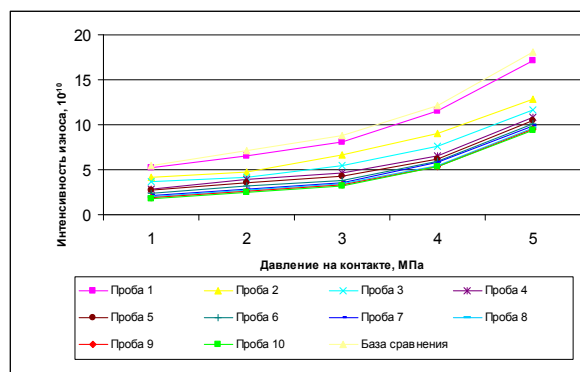


Рис. 1. Зависимость интенсивности изнашивания модельной пары трения из серого чугуна от времени обработки раствора присадки (образцы №1-5 не обработаны ультразвуком, в отличие от образцов №6-10)

Очевидно, что с увеличением времени диспергации улучшаются трибологические параметры воздействия противоизносной присадки на модельный узел трения. Возможной причиной этому является фазовое изменение размеров частиц твердой фазы присадки - MoSe_2 - с увеличением времени измельчения размер частиц стремиться к меньшим значениям - до 0,5-1,0 мкм, что не препятствует слоистому механизму воздействия присадки на поверхность трения, но и не дает возможности преждевременно коагулировать частицам твердой фазы в более крупные агломераты.

Выводы

1. Механизм воздействия модификатора трения зависит в большой степени от его типа.
2. Слоистые модификаторы трения имеют лучшие технологические свойства для выработки на их базе противоизносных присадок.
3. Для использования слоистого модификатора трения типа диселенида молибдена в системе смазки картерного двигателя необходимо соответствие размеров частиц твердой фазы 0,25-1,0 мкм.
4. Трибологическая эффективность противоизносных присадок на основе MoSe_2 по результатам полученным в ходе противоизносных испытаний в большой степени зависит от времени измельчения твердой фазы, наилучшие свойствами обладают растворы, измельчаемые за период 2-2,5 ч, однако наряду с этим и ультразвуковая обработка растворов позволяет повысить их трибологическую эффективность.

[1] Вашенок А.В., Казарезов В.В., Таловина И.В., Костенко В.В. Серпентиниты в триботехнике // Аналитические идеи, методы, технологии. - 2002. - №1. - с. 43-50.

[2] Марченко Е.А. Использование диселенидов тугоплавких металлов для обеспечения стабильности работы узлов трения / Е.А. Марченко, Т.А. Лобова // Вестник научно-технического развития. - 2009. - №5(21). - с. 16-21.

[3] Марченко Е.А. О механизме изнашивания диселенида молибдена / Е.А. Марченко // Трение и износ. - 2000. - Т.21. - №4. - с. 438-443.

ФРЕТТИНГ И ФРЕТТИНГ-УСТАЛОСТЬ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ МАЛОПОДВИЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ГТД И ГТУ

Петухов А.Н. (petukhov.an@mail.ru)

Центральный институт авиационного моторостроения, Москва, Россия.

Рассмотрены основные результаты, полученные автором, позволяющие успешно решать проблемы фреттинга и фреттинг-усталости в высоконагруженных малоподвижных соединениях ГТД и ГТУ.

Ключевые слова: фреттинг, фреттинг-усталость, фреттинг-износ, амплитуда относительных перемещений, величина давления в зоне контакта, частота колебаний, число циклов нагружения, сила трения в зоне контакта.

Предложенный А. Вёлером метод испытаний на усталость металлических материалов и полученные им впервые, результаты систематических испытаний, получили признание и распространение ещё во второй половине девятнадцатого века. Однако лишь в 1911 г. Е.М.Еден и В.Н. Роуз обратили внимание на образцы, которые разрушались не в сечении, где действовали σ_{max} , а по месту крепления в испытательных установках. В 1927 г. Г.А. Томлинсон, исследуя особенности повреждения и характер разрушения таких образцов, назвал внешний вид зоны разрушения фреттинг-коррозией, а, воспроизводя такие повреждения на столике микроскопа, установил, что для появления процесса фреттинг-коррозии достаточна величина относительных перемещений в зоне контакта сопряжённых деталей, составляющая $\sim 100 \text{ \AA}$.

Дальнейшие исследования показали, что повреждения типа фреттинг снижают предел выносливости детали от 1,2 до 10 раз [1-3]. Из практики эксплуатации ГТД и ГТУ следует, что без решения проблемы фреттинга нельзя повысить надёжность современных ГТД и ЭУ, а также обеспечить ресурс деталей как в области многоциклового (МнЦУ), так и малоциклового усталости (МЦУ) малоподвижных соединений.

В ЦИАМ им. П.И. Баранова по инициативе академика УССР Серенсена С.В. с 1966 г. в секторе «Сопrotивление усталости конструкционных материалов и деталей ГТД» начались исследования проблемы фреттинга.

С конца 80-х годов проблемой фреттинга начали заниматься в УГАТУ на кафедре «Технология машиностроения» под научно-методическим руководством д.т.н. профессора Смыслова А.М. при участии доцента Селиванова К.С.

В статье приводятся некоторые результаты комплексных исследований, полученные в ЦИАМ, связанные с изучением механизма фреттинга и фреттинг-усталости конструкционных материалов и замковых соединений лопаток компрессоров ГТД, подверженных в эксплуатации фреттингу и фреттинг-усталости.

Принципиальное отличие выполненных исследований от известных заключается в том, что изучение механизма фреттинга не ограничивалось испытаниями образцов и моделей замковых соединений на фреттинг-усталость натуральных деталей или их моделей при нормальной и эксплуатацион-

ных температурах при нагрузках, характерных для многоциклового (МнЦУ) и малоциклового усталости (МЦУ). Комплексные работы включали металлографические и рентгеноструктурные исследования зон контакта и разрушений объектов, повреждённых фреттингом и фреттинг-усталостью.

Кроме того, в ЦИАМ впервые были выполнены уникальные исследования методом тензометрирования напряженно деформированного состояния (НДС) в зоне контакта рабочих поверхностей сопряжённых деталей (контактных граней хвостовиков и пазов диска).

Эти исследования показали, что при совместном действии эксплуатационных нагрузок (статистических, циклических и вибрационных напряжений) в поверхностном слое зоны контакта сопряжённых деталей на глубине до сотен мкм возникают знакопеременные деформации, соизмеримые по величине с деформациями, измеряемыми в наиболее напряжённых сечениях лопатки, находящихся вне зоны контакта сопряжённых деталей.

Анализ полученных результатов позволил впервые оценить напряжённость хвостовиков в зоне контакта от силовых и геометрических факторов, конструктивных особенностей сопряжения диска и хвостовика, получить зависимости [1...4,9,12], которые необходимы при проектировании замковых соединений с учётом влияния фреттинга и для оценки предела выносливости соединений.

В работе [9] приведена модель механизма разрушения материала от фреттинг-усталости в зоне контакта деталей малоподвижных соединений: вид образования типичных повреждений: каверн (*a*), подслоиных трещин (*b*) и трещин по границам контакта - очагам усталостных разрушений.

По результатам систематических исследований получены функциональные зависимости НДС от ряда факторов:

- конструктивных (особенностей сопряжения: вала и втулки, хвостовик - диск), силовых и технологических, позволяющих на этапе проектирования оценить величины пределов выносливости с учётом фреттинга;
- научно обоснован и внедрён ряд конструктивных и технологических методов, направленных на повышение предела выносливости малоподвижных соединений с учётом фреттинг-усталости;

малоподвижных соединений, изготовленных из различных конструкционных материалов [8-12];

- разработан расчётно-экспериментальный метод оценки пределов фреттинг-выносливости малоподвижных соединений с учётом выше перечисленных факторов и температуры испытаний.

Исследования механизма фреттинга [4,6,9,12] и анализ статистически достоверных результатов испытаний на фреттинг-усталость малоподвижных соединений позволили:

1) установить и ранжировать параметры процесса фреттинга, влияющие на предел выносливости конструкционных материалов, применяемых в современных ГТД [4,9,12];

2) выявить (в зависимости от природы материала) степень повреждения фреттингом зон контакта деталей от основных параметров процесса: величины амплитуды A_p - относительных перемещений поверхностей контакта; величины давления $-p$; длительности процесса $-N^{ФР}$ и др. [4,9,12]

3) предложить оптимальные конструкции малоподвижных соединений с учётом НДС: лопатка - диск; вал - втулка; болт - фланец, подверженных фреттингу, и применяемых конструкционных материалов;

4) показать, что возможность применения принципа суперпозиции повреждений для фреттинг-усталости ограничена и зависит: от параметров процесса фреттинга, свойств образующихся при фреттинге окислов материалов сопряжённых пар, а также от свойств поверхностного слоя материала сформированного в процессе изготовления детали;

5) разработать и внедрить комплекс мероприятий, включая современные физические методы нанесения защитных покрытий на поверхности контакта: шликерного; вакуумно-плазменного; ионного модифицирования (легирования) и др. [12].

6) Разработаны рекомендации, которые вошли в «Руководства для конструкторов»; ОСТы и «Методические рекомендации» МР 217-86. Госстандарт» М. 1986г. 19с.

[1] Петухов А.Н. Несущая способность деталей при фреттинг - коррозии. Испытания авиационных двигателей. Меж. вуз. сборник № 8. г. Уфа, УАИ, 1980, с.28-34.

[2] Петухов А.Н. Прогнозирование характеристик сопротивления усталости конструкционных материалов с учётом влияния эксплуатационных повреждений фреттингом. Механическая усталость металлов. VI Международный Коллоквиум, г. Киев, «Наукова Думка», 1983, с.381-386.

[3] Петухов А.Н. Метод оценки предела выносливости деталей при фреттинг-коррозии. В сб.: Проблемы динамики и прочности в двигателестроении. Вып. 3. М.: 1985 (Тр. ЦИАМ №1109), с. 225-236.

[4] Петухов А.Н. Усталость замковых соединений лопаток компрессора. Труды ЦИАМ, №1213, М.: 1987, 36 с.

[5] Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей ГТД. М.: Машиностроение, 1993, 240с.

[6] Petukhov A.N. Fretting and fretting-fatigue of materials and components. «Condition monitoring 94». Edited by M.N. Jones. Universiti College of Swansea Proceedings of an International Conference on Condition on Monitoring held at. University of Wales, U.K. 21st-25th March, 1994. Pineridge press. Swansea U.K. p.694-704.

[7] Петухов А.Н. О механизме фреттинга и фреттинг-усталости в малоподвижных соединениях деталей машин. Конверсия в машиностроении - Conversion in machine building of Russia. 2002, №4, с.42-47.

[8] Петухов А.Н. Механизм фреттинга и фреттинг - усталость высоконагруженных малоподвижных соединений ГТД и ЭУ. Вопросы авиационной науки и техники. Серия: Авиационное двигателестроение. М. ЦИАМ. 2007г. (ЦИАМ /Труды №1338), 210с.

[10] Петухов А.Н. Фреттинг и фреттинг-усталость в высоконагруженных малоподвижных соединениях. VI Международный симпозиум по трибофатике (ISTF - 2010) 25 октября -1 ноября 2010 г. г. Минск, БГУ, Ч.1 с.343-346.

[11] Petukhov A.N. Physicomechanical Aspects of Fretting and Fretting Fatigue of Metallic Stiff Joints. RUSSIAN METALLURGY (METALLY) Vol. 2011 № 4. P.370-375.

[12] Петухов А.Н., Селиванов К.С., Смыслов А.М. «Фреттинг и фреттинг - усталость высоконагруженных малоподвижных соединений газотурбинных двигателей и энергетических установок» М.: «Машиностроение» 2012г. 376 с.

РАЗРАБОТКА ЛИТИЕВЫХ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ДОБАВКОЙ ПОЛИТРИФТОРХЛОРЕТИЛЕНА И ДИФЕНИЛАМИНА

¹Пинчук В.Г., ²Короткевич С.В. (korotsv@tut.by), ²Бобович С.О., ¹Кравченко В.В.

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель, Беларусь;

²РУП Гомельэнерго, Гомель, Беларусь.

На основе Литол-24 и ЦИАТИМ-201 разработаны пластичные смазочные композиции с оптимальным составом присадок-наполнителей политрифторхлорэтилена и дифениламина. Проведён комплексный анализ триботехнических свойств с привлечением различных методов испытаний. Показана триботехническая эффективность разработанных смазочных композиций.

Ключевые слова: литиевые смазки, критическая нагрузка, нагрузка сваривания, индекс задира, политрифторхлорэтилен, энергосбережение.

Цель – повышение триботехнических свойств пластичных смазочных материалов (ПСМ), загущенных стеаратом лития.

Материалы и методы. В качестве объектов исследований использовались пластичные смазоч-

ные материалы производства до 1990 г. и в настоящее время, а именно: ЦИАТИМ-201 (ГОСТ 6264-74), Литол-24 (ГОСТ 21150-75); Литол-24 (ГОСТ 21150-87) производства ОАО «Завод Горного воска», ООО «Газпромнефть-СМ». В качест-

ве антифрикционной присадки наполнителя для вышеперечисленных ПСМ использовали политрифторхлорэтилен (Фт-3М) и антиокислительную присадку. Присадки использовались в оптимальных концентрациях. Испытание антифрикционных свойств разработанных ПСМ проводили на машине типа АЕ-5 по схеме палец-диск и СМТ-1 по схеме сегмент-ролик. Оценка противозносных и противозадирных свойств ПСМ осуществлялась с использованием СМТ-1 и четырёхшариковой машины трения при ступенчатом увеличении нагрузки. Прочностные свойства граничного смазочного слоя (ГСС) и кинетику его формирования и срабатывания оценивали с использованием метода электрофизического зондирования (МЭЗ) [1]. Кинетику упрочнения и разрушения поверхностного слоя металла оценивали и использованием метода ферромагнитного резонанса (ФМР) [2].

Результаты и их обсуждение. В результате оценки противозадирных свойств базовых ПСМ (Литол-24 и ЦИАТИМ-201) производства до 1990 г. и производства в настоящее время ОАО «Завод Горного воска» экспериментально установлено снижение почти на порядок нагрузки задира, а именно, с 1000 Н до 100 Н. Добавка присадки наполнителя Фт-3М в базовые ПСМ производства ОАО «Завод Горного воска» не приводит к увеличению их триботехнических свойств. Добавка присадки наполнителя Фт-3М в базовые ПСМ производства ООО «Газпромнефть-СМ» приводит к существенному увеличению их триботехнических свойств.

Нагрузка сваривания для Литол-24 составляет 1382 Н и 1470 Н для разработанной композиции с добавкой присадки наполнителя Фт-3М и ДФА (рис. 1). Критическая нагрузка, которую выдерживает хемоморбированный слой разработанной композиции, составляет 1,8 ГПа. Противозносные свойства для разработанной смазочной композиции в диапазоне нагрузок 80-126 кН увеличиваются в 4,6 раза. Индекс задира увеличивается в 2,3 по сравнению с базовой смазкой. Оценка противозносных свойств базовой смазочной композиции и разработанной смазочной композиции на ее ос-

нове при стационарной нагрузке 200 и 400 Н в течение 3600 с полностью подтверждает полученные результаты. Методом ферромагнитного резонанса установлено, что длительность цикла изменения прочностных свойств поверхности металла с использованием разработанной смазочной композиции увеличивается, примерно, в 4 раза по сравнению с трением в смазке Циатим-201.

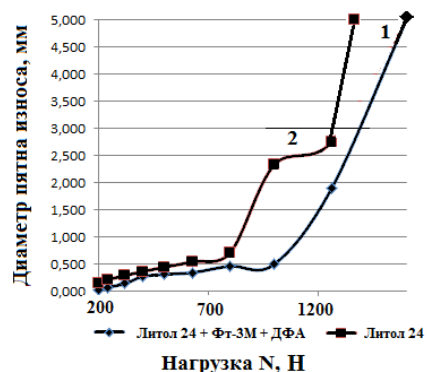


Рис. 1. Зависимость диаметра пятна износа от нагрузки для смазочных сред: 1 – Литол-24+ Фт-3М +ДФА; 2 – Литол-24.

Выводы. Использование разработанных смазочных составов способствует: повышению надёжности и долговечности эксплуатации подшипников качения в узлах энергетического оборудования, так как увеличивает срок межремонтных работ; снижению энергопотребления электрических двигателей при набивке их подшипников, как минимум на 2 %. Энергосбережение от внедрения разработанного смазочного состава за одни сутки работы электрического двигателя типа 4А225М6У3 составляет 20, 76 кВт.

[1] Короткевич С.В., Пинчук В.Г., Бобович С.О.. Разработка критерия оценки смазочной способности пластичных смазочных материалов и масел при граничном трении // Тяжёлое машиностроение. – 2014. – № 5. – С. 39-45.

[2] Пинчук В.Г., Короткевич С.В. Кинетика упрочнения и разрушения поверхности металлов при трении // LAP Lambert Academic Publishing. – Saarbrücken : LAP, 2014. – 180 с.

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГРУНТОВЫХ НАСОСОВ ЗЕМСНАРЯДОВ

Погодаев Л. И., Ежов Ю. Е., Кузьмин В. Н.

ООО «ВМПАВТО»

Предложена модель гидроабразивной эрозии материалов деталей, вытекающая из общей структурно-энергетической модели изнашивания с учетом наблюдаемой на практике исключительно высокой скорости изнашивания деталей гидромашин, например, деталей грунтовых насосов, когда скорости местного изнашивания $v_{изн}$ достигают 0,2...0,6 мм/ч.

Ключевые слова: эрозия материалов, энергетическая модель износа, структура потока, грунтовой насос, скорость потока, наплавка, гидроабразивное изнашивание.

Результаты исследований влияния структуры потока на износ рабочих колес центробежных насосов позволяют выделить три гидродинамические ситуации и соответствующие им уровни изнашивания:

I - слабовихревое течение жидкости при высоких гидравлических к. п. д. $\eta_r = 0,72 \dots 0,68$: малоинтенсивное, в основном общее, изнашивание со скоростями $v_{изн} \leq 0,012$ мм/ч;

$$v_{изнI} \sim \Delta\eta_k \sim \frac{J_k}{m} \sim \sim \eta_r^{-1} \sim \left(\frac{H_\phi}{u_2} \right)^{-(1,0..1,4)} \sim (S_{B_\Sigma} \omega_B)^{5,5}, \quad (1)$$

$\Delta\eta_k$ - гидравлические потери, связанные со сменяющим влиянием корпуса; J_k/m - интенсивность осевого вихря; m - число лопастей рабочего колеса; H_ϕ - фактический напор; u_2 - линейная скорость на внешнем ободе колеса; S_{B_Σ} и ω_B - общая площадь и приведенная угловая скорость вихревой зоны на выходе из рабочего колеса.

II - течение жидкости с развитой вихревой структурой при $\eta_r = 0,68 \dots 0,40$, интенсивном местном изнашивании со скоростями $v_{изн} \sim 0,012 \dots 0,06$ мм/ч и значительными гидравлическими потерями, связанными с вихреобразованием $\Delta\eta_v$; уменьшение абсолютной скорости схода жидкости с выходных кромок лопастей колеса c_{2u} и рост локальных скоростей вихревых образований интенсивностью J_v , в частности: на границе вихревой зоны с транзитным потоком жидкости;

$$v_{изнII} \sim \Delta\eta_v \sim J_v^3 \sim \sim \eta_r^{-2,14} \sim \left(\frac{H_\phi}{u_2} \right)^{-3} \sim (S_{B_\Sigma} \omega_B)^{2,8..3,0}, \quad (2)$$

III - поток с предельно развитой вихревой структурой при $\eta_r \leq 0,40$ и весьма интенсивным местным изнашиванием со скоростями в пределах от 0,06 до 0,6 мм/ч; наименьшее значение скорости c_{2u} при максимальной относительной площади вихревой зоны;

$$v_{изнIII} \sim \Delta\eta_v \sim J_v \sim \sim \eta_r^{-3,9} \sim \left(\frac{H_\phi}{u_2} \right)^{-5,5} \sim (S_{B_\Sigma} \omega_B)^{1,0..1,4}, \quad (3)$$

Энергетический масштабный уровень внешнего воздействия при изнашивании определяется размерами вихревой области B_Σ , а интенсивность изнашивания - скоростью прокручивания жидкости v_v , вовлеченной в локальные вихревые движения в пределах S_{B_Σ} (1-3).

Сравнительные испытания сталей, чугуна и наплавочных материалов при ГДАИ и УДАИ на стендах и в условиях эксплуатации грунтовых насосов на крупнозернистом песке показали, что ресурс рабочих колес и облицовок насосов можно увеличить в три (насос ЗГМ-2М) ...шесть (испытания на стендах) раз. Наибольший эффект от применения износостойких наплавов может быть достигнут лишь при условии получения гидравлически гладких наплавленных поверхностей, обеспечивающих при их обтекании безвихревую структуру потока [1, 2].

[1] Картышов А. В., Пенкин Н. С., Погодаев Л. И. Износостойкость деталей земснарядов. - Л.: Машиностроение, 1972. - 160 с.

[2] Погодаев Л. И., Голубев Н. Ф. Теория и практика прогнозирования износостойкости и долговечности материалов и деталей машин. - СПб: СПГУВК, 1997. - 415 с.

[3] Погодаев Л. И., Кузьмин А. А. Эрозия материалов и судовых технических средств в неоднородных жидких и газообразных средах. - СПб.: СПГУВК, 2004. - 379 с.

[4] Погодаев Л. И., Кузьмин В. Н. Структурно-энергетические модели надежности материалов и деталей машин. - Академия транспорта РФ, 2006. - 608 с.

[5] Ежов Ю. Е., Погодаев Л. И., Фролов Ю. В. Восстановление деталей земснарядов износостойкими наплавками. // Материалы 12-й Международной конф. ч. 1. — СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2010. — С. 72-76.

[6] Погодаев Л. И., Ежов Ю. Е., Донских Д. Ф. Повышение эффективности работы земснарядов путем согласования комплекса грунтопровод - насос - двигатель // Трение, износ, смазка. - 2011. - Т. 14. - № 48. - С. 15-17.

УДК 544.77.022

РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ОРГАНОБЕНТОНИТА. ВЛИЯНИЕ СТРОЕНИЯ АДСОРБЦИОННЫХ СЛОЕВ

¹Покидько Б.В., ¹Рощин М.Н., ²Абринова Э.С., ²Симакова Г.А.

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

²Московский технический университет, Институт тонких химических технологий, Москва, Россия.

Исследовано влияние строения адсорбционных слоев и соотношения компонентов на реологию бентонитовых смазочных композиций на основе минеральных масел. Показано, что тиксотропные структуры формируются в результате ex-situ и in-situ реакции катионного модификатора – диалкилдиметиламмоний хлорида (ДАДМАХ) с отрицательно заряженными частицами монтмориллонита, при этом дисперсионный состав и реологические свойства смазочных композиций на основе органобентонита существенно меняются в зависимости от соотношения компонентов и строения адсорбционного слоя. Выяв-

лено существенное влияние когезионных взаимодействий в слоях ПАВ на дисперсность частиц и структурно-механические характеристики полученных композиций.

Ключевые слова: смазочные композиции, монтмориллонит, органоимодификация, РФА, реологические кривые.

Бентонитовые смазки, на основе минеральных масел и органоимодифицированных глинистых частиц (органобентонит, органогекторит и пр.) хорошо известны со второй половины 20-го века. Частицы в таких композициях одновременно выполняют функцию загустителей (структурообразователей) и эффективных присадок [1, 2]. Практически во всех случаях в качестве органических модификаторов, используемых для придания глинистым частицам гидрофобности, применяются соединения типа галогенидов (хлорид, бромид) либо метилсульфатов ($\text{CH}_3\text{OSO}_2\text{O}-$) замещенных четвертичных аммониевых катионов типа диалкилдиметиламмония. Алкильные радикалы в молекуле в зависимости от типа относятся к насыщенным радикалам фракции C14-C18, либо к индивидуальным соединениям.

К основным структурным характеристикам бентонитов можно отнести: состав обменных катионов, катионная обменная емкость, распределение заряда по слоям. В зависимости от структуры минерала, содержания модификатора и технологии получения частиц изменяются их дисперсионные характеристики, и структурно-механические свойства смазочных композиций.

Объекты, методы и методики

Были исследованы смазочные композиции на основе минеральных масел (И12А, И20 и др.), жидкого парафина, бентонита Даш-Салахлинского месторождения (ОАО «НПК Бентонит») и лабораторных образцов органобентонита (рис. 1), а также промышленно выпускаемый продукт Bentone 910 (Elementis Specialties). Для получения органоимодифицированных форм бентонита использовался хлорид диалкилдиметиламмония (ДАДМАХ, ОАО «НИИПАВ» (Волгодонск)).

Смазочные композиции получали по схемам «in situ» и «ex situ» (рис. 1) с использованием верхнеприводной мешалки, высокоскоростного эмульгатора Polytrone турбулентного типа и/или ультразвукового диспергатора УЗДН-1. Реологические исследования проводились на ротационных вискозиметрах с цилиндрическими воспринимающими элементами: РПЭ Полимер 1М (Т1-В1, диапазон скоростей сдвига $0,34 - 700 \text{ c}^{-1}$, CSR режим), Brookfield HADV-E, SSA адаптер, камера 13R и шпиндели S21, S31 и S25, $0,13 - 93 \text{ c}^{-1}$, режим CSR, реометр Brookfield R/S plus (CC25, $0,129 - 1291 \text{ c}^{-1}$, режимы CSR и CSS). Коллоидную стабильность определяли по ГОСТ 7142-75 (аппарат марки АКС-20).

Краткое описание результатов и выводов

В докладе представлены результаты реологических исследований, а также приведены некоторые трибологические характеристики полученных смазочных композиций. Показано, что в случае композиций, полученных способом ex-situ устойчивые тиксотропные структуры формируются в

системах с избытком катионного модификатора, а также в случае органобентонитов с кристаллическими структурами с малой степенью упорядоченности. В случае in-situ композиций создаются условия для формирования смешанных ламеллярных структур при содержании модификатора близком к величине катионной обменной емкости бентонитовой глины.

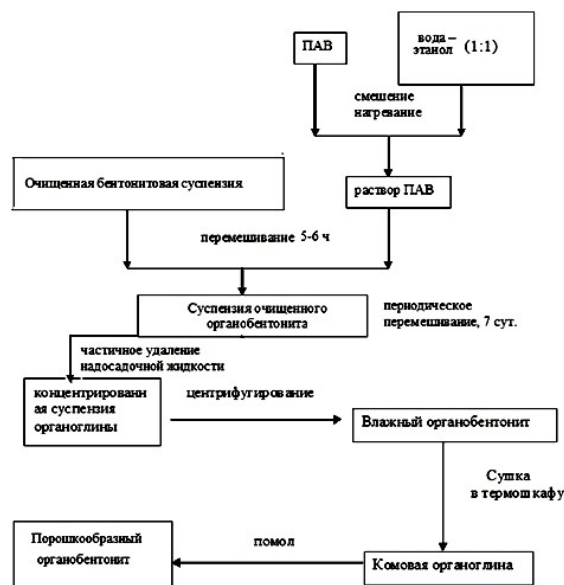


Рис. 1. Лабораторная схема получения органоимодифицированного бентонита.

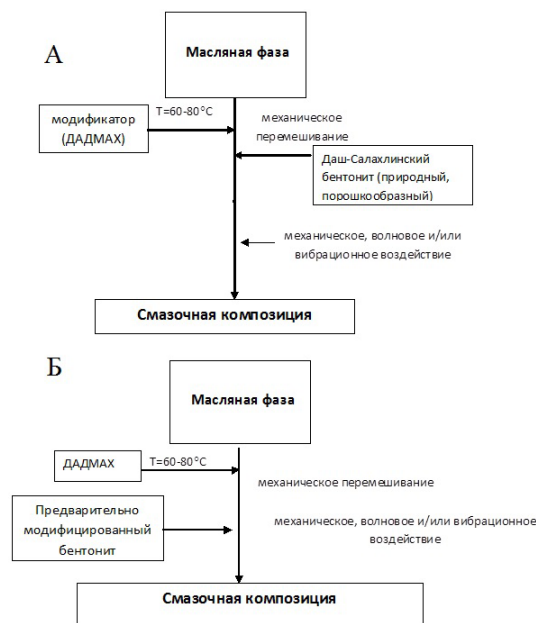


Рис. 2. Лабораторная схема получения смазочных композиций на основе органоимодифицированного бентонита методами «in situ» (А) и «ex-situ» (Б).

[1] Yu. L. Ishchuk. Lubricating grease. Manufacturing technology. New age international publisher. 2005. 248 p. ISBN 978-81-224-2648-9.

ПОВЫШЕНИЕ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ ЧЕРВЯЧНЫХ ПЕРЕДАЧ ПОДБОРОМ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

^{1,2}Поляков С.А., ²Лычагин В.В., ²Захаров М.Н., ²Гончаров С.Ю., ¹Куксенова Л.И.

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия;

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрено влияние добавки «Стрибойл» к минеральному смазочному материалу на нагрузочную способность червячных передач, определяемую по максимуму КПД.

Ключевые слова: червячная передача; нагрузочная способность; смазочные материалы.

Задача данной работы – показать рост прирабатываемости и повышение несущей способности червячных передач (ЧП) путем подбора смазочных материалов [1]. В процессе приработки редукторов по мере роста пятна контакта производились замеры КПД. Он определялся по соотношению моментов на быстроходном и тихоходном валах редуктора. Зависимость КПД от тормозного момента (на тихоходном валу) по мере наработки показана на рис. 1. Макроприработка позволяет повысить параметры технического состояния редуктора до номинальных, однако это требует длительной наработки. Для сравнения проводились испытания редуктора, приработанного на минеральном масле до уровня пятна контакта 25% (наработка 80 часов), с введением (после достижения заданного уровня приработанности) добавки «Стрибойл». Значения КПД снимались как в процессе нагружения, так и в процессе разгрузки, что отражено на графике. Можно заметить, что значения КПД в процессе разгрузки получились выше, что указывает на адаптивное последствие в [2]. Введение пленкообразующей добавки позволяет добиться более высоких технических параметров, в особенности после нагружения выше номинального момента, что указывает на появление у редуктора нового свойства – адаптивности. Использование адаптивности путем введения пленкообразующих добавок в смазочные материалы может повысить стандартные параметры технического состояния редукторов, в частности, в наших испытаниях момент на тихоходном валу, соответствующий максимуму КПД, на 30% превышает стандартный номинальный момент для рассматриваемого редуктора, а КПД существенно превышает 80% (стандарт 78%), как это видно из рис. 2. Наиболее заметно повышение антифрикционных свойств и следующего за ним роста нагрузочной способности и снижение коэффициента динамичности проявляется при использовании в процессе приработки наномодифицированной добавки «Стрибойл».

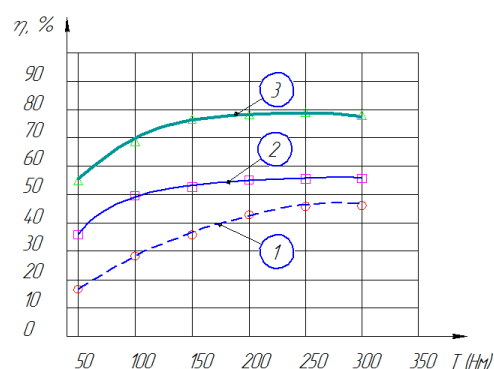


Рис. 1. Зависимость КПД от тормозного момента по мере наработки для минерального масла; 1 - 80 часов; 2 - 150 часов; 3 - 180 часов.

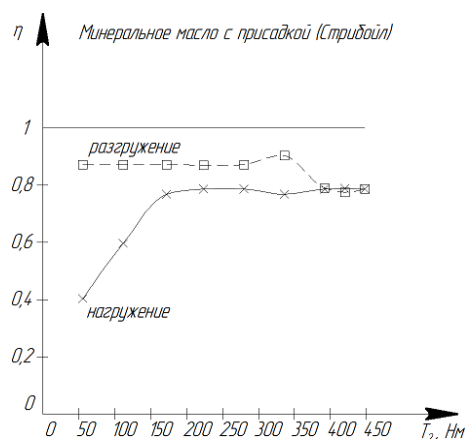


Рис. 2. Зависимость КПД от тормозного момента при наработке 80 часов после введения добавки «Стрибойл».

[1] Повышение энергоэффективности и надежности червячных передач оптимизацией подбора смазочных материалов по ускоренным испытаниям / С.А. Поляков, М.Н. Захаров, В.В. Лычагин, С.Ю. Гончаров // Вестник машиностроения 2015 №1 С.18-25.

[2] Поляков С.А., Захаров М.Н., Гончаров С.Ю., Лычагин В.В., Скобелев М.М. Учет влияния пленкообразующих и демпфирующих свойств смазочных материалов при проектировании червячных передач. // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование», издатель ФГБОУ ВПО «МГТУ им. Н.Э. Баумана», №12, декабрь 2014, с. 4-11.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДИКИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВАКУУМЕ

Прожега М.В. (prmaksim@gmail.com), Смирнов Н.И., Смирнов Н.Н.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

В работе представлен обзор основных методик для испытаний смазочных материалов в условиях вакуума. Методики и испытательное оборудование разделены на испытания натуральных механизмов и на модельные опыты. Представлены результаты испытаний пластичных смазок для работы в условиях космоса.

Ключевые слова: пластичная смазка, испытания на трение и износ, трение.

Предмет исследования. Представленная работа посвящена обзору методик и оборудования для испытаний смазочных материалов и пар трения в условиях вакуума.

Проблема. Экспериментальные исследования смазочных материалов в вакууме имеют ряд особенностей: ограниченность в размерах испытательного узла, необходимость учета испаряемости смазочного материала при испытаниях, экранирование или вывод из камеры подвижных элементов, ограничение в выборе измерительных датчиков.

Целью представленной работы является поиск новых методик для экспериментальных исследований смазочных материалов в условиях вакуума.

Результаты исследований. Смазочные материалы в условиях вакуума испытывают как на натуральных механизмах, так и на моделях.

В качестве примера испытаний смазочных материалов на натуральных механизмах можно привести работу [1], в которой представлены результаты испытаний роликово-винтового механизма платформы для позиционирования двигателя спутника ARTEMIS. Схема испытательного стенда представлена на рис. 1.

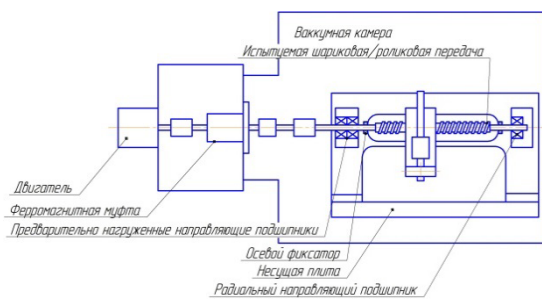


Рис.1. Схема стенда для испытаний роликово-винтового механизма в вакууме Европейской лаборатории космической трибологии.

К испытаниям натуральных механизмов также можно отнести стенд для испытаний осевого шарикоподшипника в вакууме. Для создания дополнительной нагрузки на шарики нижнюю обойму устанавливают с эксцентриситетом от 0 до 3,06 мм [2].

Среди вакуумных модельных стендов широко используют следующие:

- четырехшариковая машина,
- стенд «палец-диск»,
- спирально орбитальный трибометр.

Принципиальная схема испытательного узла спирально орбитального трибометра приведена на рис.2. Шарик под нагрузкой между подвижной и неподвижной плоскими поверхностями вращается по спиралевидной траектории. В конце траектории шарик контактирует с направляющей поверхностью, возвращающей его на первоначальный диаметр. Датчик силы, установленный на линии направляющей, измеряет силу, с которой шарик действует на плоскость при движении. Она пропорциональна силе трения. На большей части пути шарик совершает чистое качение. Однако, когда шарик контактирует с направляющей поверхностью, происходит качение, верчение и поворот вокруг оси. Это наиболее трибологически нагруженный участок пути трения, получивший название «скраб» (scrab). Здесь и наблюдается наиболее значительная деградация смазочного материала.

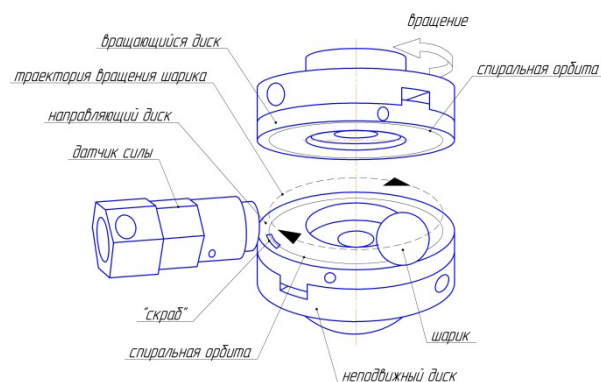


Рис.2. Кинематическая схема спирально орбитального трибометра.

[1] Falkner M., Nitschko T., Supper, L., Traxler, G., Zemann, J., and Roberts, E., "Roller Screw Lifetime under Oscillatory Motion: From Dry to Liquid Lubrication," 10th European Space Mechanisms and Tribology Symposium (ESMATS), San Sebastian, Spain, Sept. 24–26, pp. 297–301.

[2] Jones W.R. Jr, Jansen M. J. Lubrication for space applications. NASA/CR – 2005-213424. NASA Center for Aerospace information. 2005, 38 pages.

Триботехнические исследования в режиме "безыносного трения"

¹Прокопенко А.К. (prokopenkoak@mail.ru), ²Голубев А.П. (apgolubev@mail.ru)

¹ Московский государственный университет дизайна и технологий, Москва, Россия;

² Московский государственный университет туризма и сервиса, Москва, Россия.

Более 50 лет назад сформировалось научное направление по изучению и внедрению "эффекта безыносности". Для лабораторных триботехнических исследований в режиме "безыносного" трения были разработаны оригинальные методики и приборы.

Ключевые слова: триботехнические исследования, трение, смазочные материалы, металлоплакирование, "безыносное трение", приборы для испытания на трение и износ.

Для исследования "эффекта безыносности" в Московском технологическом институте в 80-х годах прошлого века была организована проблемная научная лаборатория «Избирательный перенос и водородный износ». Сложность, трудоемкость и необходимость проведения высокоточных испытаний материалов на трение и износ потребовало создание нового класса испытательной техники.

Для проведения исследований были разработаны оригинальные методики триботехнических испытаний и приборы, которые легли в основу межгосударственного стандарта по испытанию материалов при трении и изнашивании – ГОСТ 23-216. Данные методики успешно применяются при контроле качества конструкционных и смазочных материалов, при проведении научно-исследовательских работ по определению лучших сочетаний этих материалов и сред, определению оптимального соотношения компонентов смазочных материалов и их концентраций, оценки эффективности действия присадок, вводимых для иницирования режима металлоплакирования при трении.

Отличительной особенностью этих методик является применение испытываемых образцов с небольшими рабочими поверхностями (2 - 16 мм²), что позволяет проводить испытания при больших удельных нагрузках, малом тепловыделении. Это позволило максимально избежать влияния конструктивных факторов и вязкости смазочной среды.

Возможность непрерывной регистрации основных параметров трения (суммарного линейного износа образцов, момента трения, температуры образцов и смазочных материалов) позволяет проводить сравнительные испытания с минимальными затратами времени и изучать процесс пленкообразования непосредственно в зоне трения образцов.

По сравнению с другими разработанные методы испытаний имеют следующие преимущества:

- компактность испытательных приборов, простота их обслуживания;
- хорошая воспроизводимость результатов испытаний;
- возможность проведения испытаний в широком диапазоне нагрузок при малой теплонпряженности образцов;
- быстрота проведения испытаний.

Разработанные методы распространяется на металлические и неметаллические материалы.

Процесс пленкообразования при триботехнических исследованиях металлоплакирующих явлений на поверхностях носит ярко выраженный динамический характер. Поэтому во время испытаний необходимо непрерывно с высокой точностью регистрировать все основные параметры процесса трения: величину изнашивания образцов, момент трения, температуру образцов и смазочной среды.

Кроме того, необходимо учитывать, что сдерживание в режиме металлоплакирования процесса изнашивания и быстрый выход на установившийся режим трения существенно сокращают период приработки испытываемых образцов.

Учитывая перечисленные особенности проведения исследования конструкционных и смазочных материалов при трении в режиме пленкообразования, были усовершенствованы существующие и разработаны новые методики для триботехнических испытаний, позволяющие определять оптимальные сочетания трущихся конструкционных материалов и соотношения составляющих компонентов смазочных и рабочих сред, оценки их эффективности.

Творческому коллективу была поставлена цель - разработка автоматизированного комплекса для триботехнических испытаний, основные требования к которому - обеспечение повышения эффективности и достоверности результатов испытаний, расширение функциональных возможностей за счет максимального приближения условий испытаний к реальным условиям функционирования узлов трения аппаратов, машин и механизмов. При этом исключилось использование дорогостоящего оборудования из-за длительного периода его окупаемости полностью [1].

При создании комплекса были решены основные задачи:

- предусмотрена возможность бесступенчатого изменения скорости скольжения;
- осуществлена полная автоматизация процессов управления комплексом и последующей обработки регистрируемой информации;
- компактность, мобильность, простота конструкции, невысокая стоимость.

В качестве программно-управляемых определены следующие параметры:

- скорость относительного перемещения испытуемых образцов;
- усилие нормального нагружения трибосопряжения;
- температура смазочной среды в камере трения.

В качестве программно-регистрируемых параметров предложено применить:

- линейный износ трибосопряжения;
- момент трения;
- усилие нормального нагружения;
- температура поверхности испытуемых образцов.

Использование новых приборов и методик позволило ученым в кратчайшее время разработать новые металлоплакирующие конструкционные и смазочные материалы для повышения срока службы рабочего инструмента, деталей машин и технологического оборудования различных отраслей народного хозяйства.

Работы проводились совместно с учеными Польши, Болгарии, Германии, Монголии, Украины, Казахстана, Белоруссии и ряда других стран.

Комплексные исследования явления самопроизвольного формирования на трущихся поверхностях деталей компрессоров бытовых холодильников поверхностного слоя, обладающего противозносными и антифрикционными свойствами, обеспечивающего практическую безызносность узлов трения, позволили раскрыть механизм этого явления, найти методы управления происходящими процессами и реализовать на практике режим металлоплакирования в узлах трения различных машин и механизмов [2,3].

На сегодняшний день научными сотрудниками вузов вместе с учеными АН РФ проводится исследование по разработке технологий формирования рабочих поверхностей инструмента, деталей машин и технологического оборудования различных производств, основанных на современных представлениях о процессах фрикционного взаимодействия в режиме металлоплакирования [4].

Ежегодно творческий коллектив представляет полученные результаты научных исследований и практического внедрения на международных и всероссийских научно-технических конференциях, на зарубежных и отечественных выставках. Показанные результаты неизменно получают высокую оценку научного сообщества, награждены многими медалями и дипломами.

[1] Прокопенко А.К., Голубев А.П. Модернизация автоматизированного мобильного комплекса для испытаний материалов механических систем в режиме металлоплакирования. Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2012. Т. 8. № 3. С. 37-45.

[2] Голубев А.К., Прокопенко А.К., Беляев В.И. Теоретические основы повышения ресурса оборудования и режущего инструмента предприятий легкой промышленности плакирующими нанотехнологиями/ ФГБОУВПО «МГУДТ», г. Москва – 2014, 97 с.

[3] Корнеев А.А., Прокопенко А.К., Голубев А.П., Терешкин С.А. Финишная антифрикционная обработка деталей узлов трения машин. /Монография/ ФГБОУВПО «МГУДТ», г. Москва – 2015, 98 с.

[4] Перспективные методы повышения срока службы деталей оборудования и инструмента на предприятиях легкой промышленности и сферы обслуживания. Прокопенко А.К., Беляев В.И., Голубев А.П., Голубев О.П., Тюфтяев А.С., Мордынский В.Б./ Сервис в России и за рубежом, М., 2014, №1 (48), стр. 113-122.

РАЗРАБОТКА И ОПЫТНО - ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ МАСЕЛ ДЛЯ ВИНТОВЫХ КОМПРЕССОРОВ

Пузырьков Д.Ф., Саранцева С.А., Корнилова О.П.

ХТЦ УАИ, Уфа, Россия.

Сформулированы технические требования к маслу для винтовых компрессоров. Представлены результаты исследований по разработке отечественного масла. Приведены результаты сравнительных лабораторных испытаний с зарубежными аналогами, а так же результаты промышленных испытаний масла на компрессоре ф. Atlas Copco.

Ключевые слова: компрессорное масло, винтовые компрессоры, трибологические свойства, лабораторные исследования, опытно-промышленные испытания.

Введение

Современные винтовые воздушные компрессоры с впрыском масла характеризуются высокой производительностью и минимальными энергозатратами по сравнению с другими типами компрессоров. Кроме того, им присущи компактные размеры, высокая надежность, низкий уровень шума при работе, высокая чистота сжатого газа на выходе, а также возможность длительной непрерывной работы [1].

Компрессорное масло подается в рабочую полость винтового компрессора для того, чтобы

уменьшить перетечки нагнетаемого газа через внутренние зазоры между роторами, производить смазку винтового зацепления роторов, а также для отвода тепла возникающего при сжатии газа.

Известно, что компрессорное масло испытывает высокие нагрузки при эксплуатации винтового компрессора, и должно обладать целым рядом необходимых свойств, а именно: устойчивостью к старению, высокой гидрофобностью, очень низкой склонностью к пенообразованию, высокими антикоррозионными свойствами, минимальным образованием отложений, высокой температурой вос-

пламенения, и способностью уменьшать износ трущихся деталей (в том числе подшипниковых узлов, обеспечивающих прецизионное вращение винтовых (роторных) пар).

При длительной работе винтового компрессора, верхний температурный предел работы масел составляет 80...90 °С, кратковременно температура может повышаться до 120°С.

Одним из ведущих мировых производителей компрессорного оборудования – является компания «Atlas Copco» (Бельгия). Помимо компрессорных масел собственной разработки, компания «Atlas Copco» одобрила и допустила к применению ряд масел других зарубежных производителей. По сути допуск производителя компрессора – это конкретный стандарт качества компрессорного масла, для которого определены все параметры, которые производитель компрессора считает обязательными при использовании такого масла в своем компрессоре.

Масла для винтовых компрессоров зарубежного производства, как правило, имеют высокую цену, достигающую до тысячи и более рублей за литр.

Учитывая все вышесказанное, специалистам лаборатории ХТЦ УАИ была поставлена задача разработки отечественного масла для винтовых компрессоров. Масло должно обеспечивать ресурс наработки не менее 2000 часов в среднем режиме работы и позволять продлить интервал замены вплоть до 4000 часов при условии периодического контроля состояния масла. Средним режимом работы компрессора, согласно ГОСТ 28549.3-90 (ISO 6743-3А) [2] называется режим при котором температура сжатого воздуха в компрессоре и среды воздух/масло достигает 100°С включительно, давление сжатого воздуха на выходе компрессора составляет 800-1500кПа (8-15 бар) или второй вариант, при котором температура сжатого воздуха в компрессоре и среды воздух/масло на выходе достигает 100-110°С, а давление на выходе не более 800 кПа (8 бар).

В качестве ориентира было выбрано одно из лучших на сегодняшний день масло «Atlas Copco Roto-inject fluid» на минеральной основе с увеличенным сроком эксплуатации, гарантирующем 2000 часов нормальной работы компрессора, и достигающем 4000 часов при среднем режиме работы и периодическом контроле состояния масла.

Результаты лабораторных исследований

В ходе проведенных исследований в лаборатории, на базе всех компонентов производимых в России, было разработано масло на минеральной основе для винтовых компрессоров работающих в условиях среднего режима.

Масло заливалось в винтовой компрессор марки «GA – 30С FF» производства фирмы «Atlas Copco». Компрессор стационарно установлен в специальном помещении с относительно постоянными параметрами окружающей среды. В его комплектации имеется блок предварительной осушки входного воздуха, что несколько облегчает

условия работы компрессорного масла, т.е. создает ему более «мягкие» условия работы, что сказывается в первую очередь на интервале его замены.

Результаты промышленных испытаний

Опытно-промышленные испытания разработанного масла проводились и проводятся в настоящее время на предприятии ООО «НПП МДМ» (г. Уфа) с 2011 года. В течение всего периода испытаний отбирались пробы работающего в компрессоре масла и анализировались восемь показателей качества.

Следует отметить, что параллельно испытания проводятся на компрессоре фирмы «АВАС» (Италия) марки «formula E2208», который также находится на предприятии ООО «НПП МДМ». Этот компрессор предусматривает работу масла в среднем режиме, но его принципиальное отличие от компрессора «GA-30С FF» в отсутствии блока предварительной осушки входного воздуха. По данным фирмы «Atlas Copco» эффективность удаления влаги из воздуха с помощью этого блока доходит до 99%. Отсутствие блока осушки накладывает повышенные требования на компрессорное масло по части отделения воды. Однако, несмотря на это разработанное масло проработало 2000 часов при сохранении основных контролируемых показателей в пределах нормы. Испытания в компрессоре «АВАС formula E2208» продолжаются и в настоящее время.

За время работы компрессора на разработанном масле значения контролируемых показателей качества соответствовали требованиям, установленным нормативно – технической документацией.

Качество масла изменилось незначительно: увеличилась вязкость при 40°С и при 100°С, (значения показателя укладываются в рамки технических требований, заложенных при разработке) остальные показатели, такие как, температура вспышки в открытом тигле, температура застывания, противоизносные и др. практически не изменились.

Прирост вязкости масла в процессе эксплуатации объясняется тем, что при активном контакте масла с воздухом в присутствии воды, обуславливающей влажность атмосферного воздуха, интенсивно протекают процессы окисления масла.

Разработанное масло обеспечивает требования по ресурсу 2000 часов, заложенные при разработке, и сохраняет свою работоспособность по прошествии 4000 часов работы.

Согласно стандартам DIN ISO 5106 и ISO/DP 6521 были составлены общие рекомендации по применению и периоду замены разработанного компрессорного масла.

Помимо критериев перечисленных в начале статьи, необходимо также учитывать следующие обстоятельства, влияющие на работу компрессора:

- продолжительная работа масла при температуре превышающей 90°С вдвое укорачивает период между сменами масла;
- рекомендуемые интервалы замены масла:
- 1000 часов для передвижных компрессоров;

- 2000...3000 часов для стационарных компрессоров при обычных условиях;

- до 4000 часов при мониторинге состояния масла.

Согласно ГОСТ 28549.3-90 (ISO 6743-3A), разработанное компрессорное масло можно классифицировать как: L-DAN 46 - где L обозначает класс масел (смазочные материалы, промышленные масла и родственные продукты); DAN – воздушные компрессоры с интенсивной подачей масла (лопастные и винтовые компрессоры), работающие в среднем режиме; 46 – это класс вязкости по ISO 3448.

В настоящий момент опытно-промышленные испытания по определению ресурса масла продолжаются, в компрессор залита вторая партия масла.

Выводы:

1. Разработано отечественное масло для винтовых компрессоров в соответствии с заложенными требованиями, а именно для среднего режима работы. Проведены сравнительные лабораторные испытания разработанного масла с импортным компрессорным маслом «Atlas Copco Roto-inject fluid», рекомендованным производителем компрессоров. Проведенные испытания показали, что разработанное масло не уступает по своим характеристикам рекомендованному импортному компрессорному маслу.

2. Проведены опытно-промышленные испытания разработанного масла в течение 4000 часов. В период проведения испытаний отслеживалось изменение основных показателей качества работающего масла. Основные показатели масла соответствуют требованиям нормативно-технической документации.

3. Разработанное масло может быть рекомендовано для использования в винтовых маслозаполненных воздушных компрессорах работающих в среднем режиме (рабочая температура масла до 100⁰С и давление на выходе до 8 бар). Минимальный ресурс работы масла составляет 2000 часов, а при наличии контроля состояния масла, его можно продлить до 4000 часов.

4. В настоящее время с фирмой «Atlas Copco» ведутся переговоры о проведении испытаний разработанного масла для винтовых компрессоров за рубежом, с целью получения допуска к применению в винтовых компрессорах производства «Atlas Copco».

[1] Анисимов И.Г., Бадыштова К.М. и др. Топлива, смазочные материалы, технические жидкости. Ассортимент и применение: Справочник под ред. В.М. Школьникова. Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Издательский центр «Техинформ», 1999. – 596 с., ил.
[2] ГОСТ 28549.3-90 Смазочные материалы, промышленные масла и родственные продукты. (Класс L). Классификация. Группа D (компрессоры).

ПРИМЕНЕНИЕ ТВЕРДЫХ СМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ В БОЛТОВЫХ И ЗАКЛЕПОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ

¹Пучков В.Н. (puchkov.v.n@bk.ru), ²Дунаев В.В

¹Институт машиноведения РАН, Москва, Россия;

²МГТУ им. Н.Э. Баумана, Россия.

Задача создания надежных болтовых и заклепочных соединений листовых материалов весьма актуальна для авиации и иных отраслей современного машиностроения. По условиям работы такие соединения должны обеспечивать прочность и неподвижность соединяемых деталей. Отсутствие проскальзывания между соединяемыми деталями повышает ресурс и надежность соединения благодаря исключению явлений износа, фреттинг-коррозии и усталости материалов.

Ключевые слова: твердые смазочные материалы, коэффициенты трения, неподвижные соединения, болты, заклепки, фреттинг-коррозия, усталость.

Введение

Конструкционные материалы, особенно алюминиевые и титановые сплавы, в условиях сухого трения без специальных средств защиты легко схватываются, вызывая катастрофический износ и разрушение контактирующих деталей. Устранение схватывания возможно при правильном использовании методов защиты контактирующих поверхностей. Защитные свойства поверхностных слоев, зависящие от химико-технологических особенностей их образования и других факторов, связанных с условиями контактного взаимодействия поверх-

ностей, изучаются с целью установления пределов их применимости в каждом конкретном случае. Особый интерес в связи с этим представляет исследование несущей способности различных поверхностных слоев в условиях тяжело нагруженного контакта [1,2].

Материалы и методы

Для уменьшения проскальзывания между соединяемыми деталями получает распространение безззорная постановка болтов и болт-заклепок в отверстие, однако при отсутствии защитного поверхностного слоя вероятность воз-

никновения фреттинг-коррозии в этом случае полностью не исключается [3]. Для предотвращения фреттинг-коррозии в плоском стыке и для снижения усилия постановки крепежа в отверстие применяются твердые смазочные покрытия (ТСП). При посадке болта или болт-заклепки в отверстие с натягом возникают высокие контактные давления и деформации, что существенно затрудняет смазывание. Отсутствие смазки при посадке с натягом приводит к ряду нежелательных последствий, таких, как повышение усилия постановки, образование стружки перед заходной частью болта и как следствие — снижение натяга, вероятность образования очагов схватывания и др.

Для обеспечения надлежащей смазки при посадке с натягом исследуются условия, при которых ТСП, нанесенное на контактирующие детали, перестает поступать в зону контакта, вызывая увеличение трения и износа. В настоящей работе исследуются трение и несущая способность ТСП, применяемых в плоском стыке и при постановке болтов и болт-заклепок в отверстие с натягом.

Для изучения плоского стыка используется прибор для оценки несущей способности ТСП [1, 2]. Подробное описание методики оценки несущей способности ТСП приведено в этих же работах.

Результаты и их обсуждение

Разработанная модель процесса потери несущей способности ТСП в тяжело нагруженном контакте сфера-плоскость успешно используется для изучения условий смазывания при постановке болта в отверстие с натягом. Качественная картина развития твердосмазочного клина во входной зоне при постановке болта в отверстие с натягом остается прежней. Условия деформации материала основы в плоскости симметрии сферы, совпадающей с направлением скольжения, соответствуют условиям деформации в любом радиальном сечении заходной части болта при его запрессовке в отверстие.

Определены коэффициенты трения и несущая способность ТСП, применяемых в реальных

изделиях в комбинации с материалами, получившими широкое распространение в современной технике. Испытаны ТСП на основе MoS_2 , получившие широкое распространение для смазки болтовых и заклепочных соединений, нанесенные различными способами на основы из титанового сплава ОТ4-1, стали 1Х18Н9Т и алюминиевого сплава Д16.

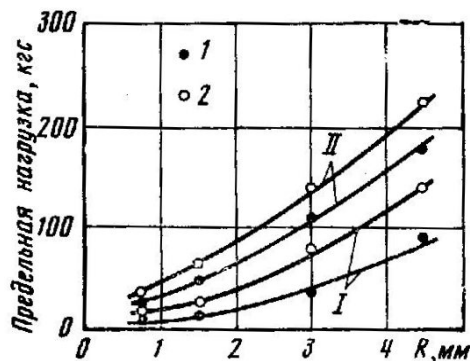


Рис. 1. Зависимость несущей способности ТСП от материала основы, радиуса сферы и толщины покрытия. Материал основы: I — Д16; II — 1Х18Н9Т. Толщина покрытия: 1 — 5 мкм; 2 — 25 мкм

На рис.1 показано влияние на несущую способность ТСП материала основы, толщины покрытия и радиуса индентора. Смазку наносили кистью, толщина покрытия составляла 5 и 25 мкм. Для более твердой основы (1Х18Н9Т) несущая способность ТСП выше. Налицо повышение несущей способности с увеличением толщины слоя ТСП.

[1] В.Н.Пучков, Ю.Н.Дроздов, В.В.Дунаев, Н.Б.Гиматдинов. Трение и несущая способность твердых смазочных покрытий, применяемых в болтовых и заклепочных соединениях. Исследование смазочных материалов при трении. ИМАШ РАН. Изд-во "Наука". М: 1981. с.119-124.

[2] Ю.Н.Дроздов, В.Г.Павлов, В.Н.Пучков. Трение и износ в экстремальных условиях. — М.: "Машиностроение" — 1986. С.223.

[3] В.В.Дунаев, В.Н.Пучков. Прочность и износ элементов болтовых соединений в условиях фреттинга. Изд-во "Инновационное машиностроение", "Сборка в машиностроении, приборостроении", №4 (189) с. 38-44. 2016.

РАСЧЁТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НОМИНАЛЬНО НЕПОДВИЖНЫХ ШЕРОХОВАТЫХ СТЫКОВ МЕТОДОМ 3-Х МЕРНОГО КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рачишкин А.А. (rachishkinandr@ya.ru), Сутягин О.В., Болотов А.Н., Измайлов В.В.

Тверской государственный технический университет, Тверь, Россия.

Предлагается использование метода 3-х мерного компьютерного моделирования для расчёта теплопроводности номинально неподвижных шероховатых стыков. Описываются преимущества такого подхода.

Ключевые слова: теплопроводность, шероховатая поверхность, покрытия, компьютерное моделирование.

Современное развитие информационной техники позволяет решать широкий круг инженерных задач, требующих больших вычислительных ресурсов. Одной из них является расчёт теплопро-

водности шероховатых стыков методом 3-х мерного компьютерного моделирования.

Цель. Создание современного инструмента, изменяющего существующие методики расчёта

теплопроводности шероховатых стыков за счёт разработки компьютерной программы имитационного моделирования контактного взаимодействия шероховатых поверхностей и применения аналитического решения для расчёта теплопроводности единичного пятна контакта, в том числе и имеющего покрытие.

Преимущества. Данный подход способен с высокой достоверностью прогнозировать теплопроводность контактирующих технических поверхностей. Целенаправленное изменение параметров, определяющих морфологию моделируемых поверхностей, позволяет регулировать теплопроводность шероховатых стыков. Возможно моделирование поверхностей, имеющих полное или частичное покрытие. Подробно моделируется геометрия и напряжённо-деформированное состояние каждой микронеровности. Вместе с тонкой регулировкой входных параметров компьютерная программа представляет удобный и функциональный инструмент, позволяющий оптимизировать решение технических задач по расчёту теплопроводности номинально неподвижных шероховатых стыков.

Математический аппарат построен на аналитическом решении для расчёта теплопроводности единичного пятна контакта, в том числе и имеющего покрытие [1]. Ключевой особенностью алгоритма является моделирование различных ситуаций контактного взаимодействия каждой микронеровности на поверхности: упругий или упругопластический контакт, наличие и характеристики покрытия. Это позволяет более точно определять ρ_i – радиус единичного пятна контакта, определяющего его термическое сопротивление. Программа рассчитывает термическое сопротивление каждой неровности вступившей в контакт – R_{nmi} , по формуле:

$$R_{nmi} = R_{0mi} \left(\frac{1 - k_t}{1 + k_t} \right) \left(\frac{1 + k_t \exp\left(-\frac{4\delta}{\pi\rho_i}\right)}{1 - k_t \exp\left(-\frac{4\delta}{\pi\rho_i}\right)} \right), \quad (1)$$

где $R_{0mi} = \frac{1}{4\lambda_2\rho_i}$ – термическое сопротивление единичного пятна контакта для полупространства без покрытия, $k_t = \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2}$, λ_1, λ_2 – теплопроводность покрытия и полупространства соответственно, δ – толщина покрытия. Число пятен фактического контакта равно числу вступивших в контакт с покрытием микронеровностей n_r . Суммарную величину термического сопротивления фактических пятен контакта R_{nm} можно записать в виде:

$$\frac{1}{R_{nm}} = \sum_{i=1}^{n_r} \frac{1}{R_{nmi}}. \quad (2)$$

На основании этого разрабатывается программная реализация расчёта теплопроводности контактирующих стыков.

Тестирование результатов имитационного моделирования проводится с помощью их сопоставления с экспериментальными данными, представленными в работах [2] и [3].

Результат. В ходе тестирования выявлена хорошая сходимость результатов имитационного моделирования с экспериментальными данными, что позволяет судить о состоятельности разработанного метода.

[1] Сутягин О.В. Контакт шероховатых тел с твёрдосмазочными покрытиями./ О.В. Сутягин, А.Н. Болотов, М.В. Васильев - Тверь: Тверской государственный технический университет, 2014. 124с.

[2] Thomas T.R. Correlations for Thermal Contact Conductance In Vacuo / T.R. Thomas, S. D. Probert // J. Heat Transfer 94(3), Aug 01, 1972, p 276-280.

[3] Сутягин О.В. Исследование термического сопротивления шероховатого контакта с покрытиями./ О.В. Сутягин, А.Н. Болотов, А.А. Рачишкин, Э.А.Деменков // Поликомтриб-2015: Тезисы докладов международной научно-технической конференции. - Гомель: ИММС НАНБ, 2015. С.107.

ДИСПЕРСНЫЕ ЧАСТИЦЫ КАК ЛОКАЛЬНЫЕ ТРЕХМЕРНЫЕ НЕСПЛОШНОСТИ В ОБЪЕМЕ МАТРИЦЫ ИЗ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ

¹Рогов В.Е. (rogov54v@mail.ru), ²Бохоева Л.А.

¹Байкальский институт природопользования СО РАН, Улан-Удэ, Россия;

²Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления Улан-Удэ, Россия.

В статье описывается новый механизм взаимодействия дисперсных частиц наполнителя (10-100мкм) не зависимо от типа и формы в объеме матрицы политетрафторэтилена (ПТФЭ), основанный на усадочных напряжениях возникающих вокруг наполнителей за счет различных коэффициентов тепловых расширений полимера и наполнителей. Наличие высоких температур в поверхностных слоях композита в зоне трибоконтакта создают условия для вращения частиц вокруг своей оси в полимерном гнезде. Проворачива-

ние частиц до оптимального положения в плоскости контакта позволяет увеличить фактическую площадь контакта и тем самым повысить износостойкость.

Ключевые слова: дисперсные частицы, политетрафторэтилен, фторопласт, дефекты, усадочные напряжения, износостойкость.

Наполнение политетрафторэтилена (ПТФЭ) дисперсными наполнителями, позволяет существенно изменить ряд эксплуатационных свойств самого полимера. Прежде всего, это повышение износостойкости в 1000 и более раз без значительного изменения коэффициента трения, и сопротивление ползучести или деформированию под нагрузкой примерно в 10 раз. Из анализа технической литературы (особенно из изобретений и патентов) можно заключить, что в качестве наполнителя для ПТФЭ может быть использован любой дисперсный материал различной формы и размера, способный выдержать температуру спекания ПТФЭ. При этом, нет единого мнения, по размерам и количественному содержанию дисперсных наполнителей в данных композициях. Большинство исследователей считают, что оптимальный размер частиц наполнителя, составляет 10–50 мкм. При этом установлено, что с изменением содержания наполнителя, интенсивность изнашивания композита проходит через минимум, который составляет 10–35 об. %. По сравнению с другими полимерами ПТФЭ имеет высокую вязкость расплава (1010Па·с) при температуре спекания (633–643 К), перерабатывается методами порошковой металлургии. Также он обладает рядом уникальных свойств: низкой поверхностной энергией, минимальной адгезия для всех твердых тел, высоким коэффициентом теплового линейного расширения, аномально низким среди конструкционных материалов коэффициентом трения (0,04-0,05 по стали без смазки), прекрасными изоляционными свойствами [1].

В настоящее время нет научной теории объясняющей повышение износостойких свойств данного полимера при наполнении его дисперсными наполнителями. Предполагается, что повышение износостойких свойств композита с матрицей из ПТФЭ происходит за счет одного из следующих параметров: значительного увеличения степени кристалличности полимера и межслойного расстояния в аморфной фазе матрицы; наполнителя, выступающего в качестве искусственных зародышей в процессе кристаллизации; изменения структуры выраженной в измельчении кристаллической фазы в процессе спекания; в коренной реорганизации структуры полимера, т.е. в трансформации ленточной структуры в сферолитную. В работе [2] представлен новый взгляд на механизм взаимодействия наполнителя с матрицей, за счет различных коэффициентов тепловых расширений полимера и наполнителей.

В данной работе проведены экспериментальные работы на макроуровне. Во фторопластовый образец заложили стальной шарик диаметром 5 – 10 мм и спрессовали при соответствующем давлении. После спекания разрезали его и освободили

шарик, но шарик в гнездо не садится даже после выдержки при комнатной температуре. То есть происходит изменение размеров гнезда шарика в сторону уменьшения. Это свидетельствует о наличии в полимерной матрице усадочных напряжений вокруг шарика. Данный процесс на микроуровне можно представить в следующем виде: в спрессованном композите, промежутки между частицами наполнителя заполняются деформированными гранулами полимера, который образует непрерывную объемную граничную фазу. Монолитизация полимерных гранул ПТФЭ происходит в процессе нагрева и термообработки за счет образования когезионных связей и диффузионных процессов, возникающих между частицами. Образовавшаяся полимерная масса в виде расплава окружает частицы наполнителя. При охлаждении, вокруг каждой частицы наполнителя осуществляются процессы структурирования - кристаллизация полимера и его усадки. Поскольку коэффициенты теплового расширения полимера и наполнителя значительно отличаются, возникают усадочные сжимающие напряжения в матрице не только в приграничных межфазных областях, но и в объеме связующего, находящегося между частицами наполнителя. Полученные в работе результаты подтверждаются данными работы [3]. Автор [3] показал, что изделия из ПТФЭ с алмазными частицами могут использоваться в качестве абразивного шлифовального инструмента за счет их прочного закрепления в матрице композита.

При трении в контакте с металлической поверхностью, температура в поверхностных слоях композитов на основе ПТФЭ достигает более 300 °С. Такая температура естественно приводит к значительному снижению усадочных напряжений полимера вокруг частиц. Практическое отсутствие сжимающих напряжений в матрице вокруг частиц наполнителя приводит к их вращению вокруг своей оси в полимерных гнездах под воздействием скользящего контакта с движущимся металлическим контртелом. Поворачивание частиц длится до тех пор, пока они не установятся в плоскости контакта на грань с наибольшей площадью поверхности. В поверхностном слое композита находится достаточно большое количество частиц наполнителя, и их поворот на грань с наибольшей площадью поверхности способствует увеличению фактической площади трибоконтакта, поэтому увеличивается износостойкие свойства композитов на основе ПТФЭ. При трении любых металлополимерных сопряжений, на металлических поверхностях наблюдается самопроизвольное формирование полимерной пленки переноса на контактной металлической поверхности. После непродолжительной эксплуатации на металлической поверхности образуется также пленка фторопла-

ста-4 независимо от типа наполнителя. Образование пленки переноса происходит за счет различных механизмов адгезионного взаимодействия, возникающего при контакте полимера с металлом. По мере наполнения дисперсными частицами ПТФЭ наблюдается изменение размеров и форм продуктов износа до хлопьевидных миллиметровых частиц для чистого ПТФЭ и до микронных частиц для наполненного композита с максимальной износостойкостью.

Наиболее интенсивное изнашивание композита наблюдается в начальный период эксплуатации. Отделению частиц износа предшествует деформация поверхностных микрообъемов полимерного композита под воздействием эксплуатационного нагружения. Деформация поверхностных микрообъемов композита происходит на поверхностях повернутых частиц наполнителя. По-

сле превышения предела передеформирования наблюдается процесс отделения микронных частиц износа. Для подтверждения данного факта поворота частиц наполнителя еще раз вернемся к работе [3], где изделия с алмазными частицами работают в качестве абразивного шлифовального инструмента только при использовании охлаждающей жидкостью. При повышении температуры в зоне контакта абразивные свойства композиционного материала исчезают.

[1] Паншин Ю.А., Малкевич С.Г., Дунаевская Ц.С. Фторопласты.-Л.: Химия.- 1978.- 232с.

[2] Рогов В.Е Исследование взаимодействия дисперсных наполнителей с политетрафторэтиленом в композитах// Научное обозрение.-2016, №5, 166-168.

[3] Шиц Е.Ю Создание инструментальных алмазосодержащих материалов на полиолефиновых матрицах с заданным комплексом свойств : дис. . д-р тех наук: 05.16.09. 2015.

ВЛИЯНИЕ МАКРО- И МИКРОСТРУКТУРЫ СПЕЧЕННЫХ СПЛАВОВ Al-Sn НА ИХ ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ ПРИ СУХОМ ТРЕНИИ

¹Русин Н.М., ^{1,2}Скоренцев А.Л. (skoralexan@mail.ru), ¹Мишин И.П.

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия;

²Томский политехнический университет, Томск, Россия.

В работе исследованы триботехнические свойства спеченных и подвергнутых последующей обработке методом равноканального углового прессования (РКУП) сплавов Al-Sn при испытании на трение без смазки по схеме «палец-диск». Установлено, что РКУП обработка способствует повышению износостойкости КМ Al-Sn. Максимальный ее эффект достигается в случае деформирования маршрутом А.

Ключевые слова: сухое трение, сплавы Al-Sn, интенсивность изнашивания, деформационная обработка.

Введение. Вкладыши с покрытием из сплавов Al-Sn широко используются в подшипниках скольжения уже много лет [1, 2]. В процессе работы поверхность подшипников нагревается, олово выдавливается и размазывается, образуя плёнку, защищающую поверхности пары трения от схватывания. Самосмазывание тем эффективнее, чем выше объёмное содержание олова в покрытии, но при этом снижается несущая способность нанесённого слоя и поэтому концентрация Sn (C_{Sn}) ограничивается $\approx 20\%$ (ГОСТ 14113-78).

Используя для их получения методы порошковой металлургии, можно увеличить C_{Sn} и при этом сохранить несущую способность сплава [3]. Указанный эффект достигается за счёт сохранения непрерывности алюминиевой матрицы при спекании. Исследование структуры спечённых сплавов показало, что связанность их матрицы (число контактов на одну частицу < 2) теряется только при содержании олова $> 50\%$.

Трибологические свойства сплавов Al-Sn с таким высоким содержанием металла-смазки исследованы мало. Поэтому целью настоящей работы было изучить поведение спечённых из смеси порошков Al (АСД-4) и Sn олова (ПО 2) сплавов с

различным содержанием мягкой фазы в условиях сухого трения по стали с использованием схемы испытаний «палец-диск».

Результаты и их обсуждение. Интенсивность изнашивания спечённых сплавов Al-Sn в зависимости от содержания олова показана на рис. 1. Видно, что износостойкость сплавов с оловом $> 50\%$ резко ухудшается, равно как и чистого олова. Однако если сравнивать с чистым алюминием, то положительное влияние олова на его износостойкость очевидно, особенно при повышенных давлениях. В интервале концентраций $10\div 30\%$ Sn интенсивность изнашивания сплавов (I_h) практически не менялась, а затем понижалась до минимума у образцов с $35\div 40\%$ олова, алюминиевый каркас которых оставался ещё достаточно связанным, несмотря на повышенное содержание Sn.

Коэффициент трения (μ) спечённых сплавов при низких прикладываемых давлениях ≤ 1 МПа с повышением C_{Sn} также медленно снижался и не зависел от состава при больших давлениях ($0,2$ и $0,1$ при $P = 3$ и 5 МПа, соответственно).

Установлено, что коэффициент трения чистого олова меняется с нагрузкой аналогично. Такое поведение μ возможно, если его величину опреде-

ляет сила трения, зависящая от сопротивления сдвигу мягкого металла в тонком поверхностном слое. Поскольку напряжение сдвига у Sn и чистого Al близко, то и их сопротивление перемещающимся неровностям контртела примерно равное и не зависит от величины нормального давления (удельная сила трения $\approx 0,5$ МПа). Однако алюминий склонен к упрочнению, поэтому глубина деформированного слоя у него меньше, чем у олова, что и обуславливает разное значение их I_h при одинаковых условиях трения.

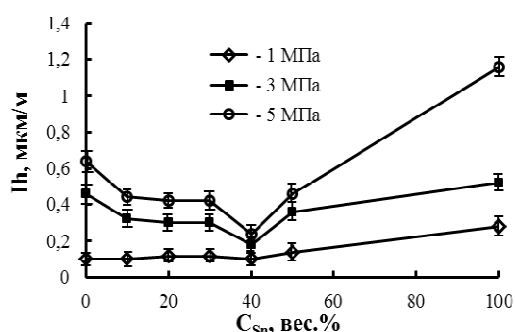


Рис. 1. Влияние олова на интенсивность изнашивания спечённых композитов Al-Sn.

Исследования поверхностей трения показали, что на стальном контртеле формируется слой из перенесённого с поверхности образцов материала. В случае образцов из чистого олова намазанный слой почти сплошной. В случае сплава Al-Sn слой переноса состоит из дискретных частиц, близких по составу образцам. Частицы более твёрдые, чем материал образцов и интенсивно деформируют их поверхность. Вследствие такой многократной деформации на поверхности трения образцов формируется тонкий слой, представляющий собой смесь частиц оксидных плёнок с материалом основы. Он хорошо предотвращает схватывание между контртелами, и скорость его разрушения определяет интенсивность изнашивания спечённых образцов при сухом трении. Присутствие олова в слое способствует его пластификации и понижению величины I_h (рис. 1).

Составляющие композит Al-Sn фазы после спекания имеют низкую твёрдость. Чтобы уменьшить глубину внедрения в них поверхностных неровностей контртела нужно повысить твёрдость матрицы. С этой целью спечённые образцы были подвергнуты равноканальному угловому прессованию (РКУП). В результате обработки прочность алюминиевой матрицы возросла более чем в 3 раза. Упрочнение обусловлено измельчением (суб)зёрненной структуры алюминия, средний размер элементов которой после РКУП был менее 500 нм (рис. 2).

РКУП проводили маршрутами С и А, при этом прочность образцов равного состава практически была одинаковой. Однако макроструктура их в первом случае после каждого чётного прессования восстанавливалась практически до исходной, тогда как в случае маршрута А она приобретала слоистый вид (рис. 3). Если поверхность с такой структурой использовать в качестве поверхности трения, и направление скольжения сделать

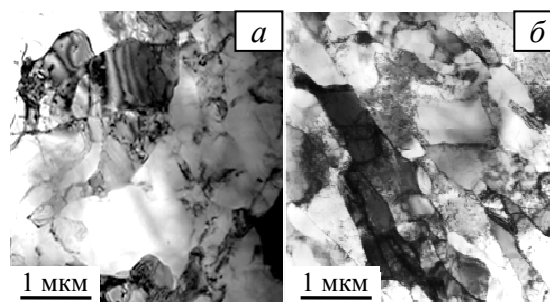


Рис. 2. Микроструктура КМ Al-30 Sn после 4-х РКУП маршрутами С (а) и А (б).

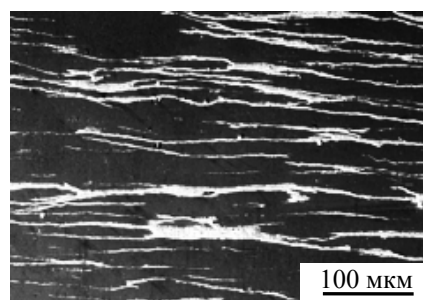


Рис. 3. Структура сплава Al-40 Sn в плоскости течения после 2-х РКУП маршрутом А.

перпендикулярным слоям, то расстояние между источниками твёрдой смазки резко сократится.

Интенсивность изнашивания обработанных методом РКУП образцов в зависимости от их состава меняется аналогично как на рис. 1, но по абсолютному значению уменьшилась на 30-40%. Минимальное значение I_h также приходится на состав с 40% Sn. При этом износостойкость образцов обработанных по маршруту А оказалась выше на 15-20%, чем после РКУП маршрутом С (табл. 1).

Причина меньшего I_h у обработанных по маршруту А образцов была установлена при исследовании структуры их подповерхностного слоя трения. Видно, что зёрна матрицы, ставшие тонкими после маршрута А, способны под влиянием сил трения изгибаться на большую глубину, благодаря чему содержание олова на поверхности трения увеличивается, и интенсивность разрушения поверхностного смешанного слоя снижается.

Таблица 1. Интенсивность изнашивания КМ Al-40Sn после 2-х РКУП маршрутами А и С

Число РКУП, N	Интенсивность изнашивания, I_h (мкм/м)					
	РКУП(А)			РКУП(С)		
	1 МПа	3 МПа	5 МПа	1 МПа	3 МПа	5 МПа
0	0,10	0,18	0,24	0,10	0,18	0,24
1	0,10	0,18	0,22	0,10	0,18	0,22
2	0,08	0,14	0,16	0,10	0,16	0,20
2*	0,10	0,16	0,24	-	-	-
3	0,10	0,14	0,18	0,12	0,18	0,22
4	0,10	0,14	0,18	0,12	0,18	0,20

*волокна направлены вдоль направления скольжения

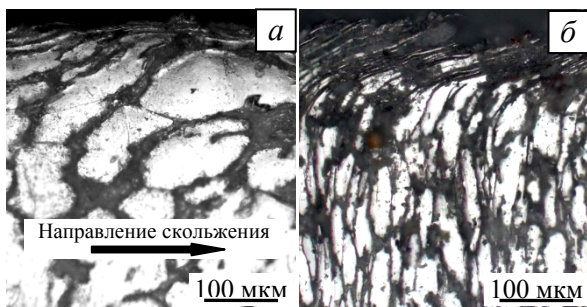


Рис. 4. Структура приповерхностного слоя трения КМ Al-40Sn. Маршрут РКУП: С(а) и А(б).

Выводы:

1. Спекание позволяет получать композиты Al-Sn с большим содержанием олова, и, как следствие, с лучшим сопротивлением изнашиванию при сухом трении.

2. РКУП обработка способствует повышению износостойкости КМ Al-Sn. Максимальный ее эффект достигается в случае обработки маршрутом А.

Работа выполнена в рамках проекта СО РАН (программа III.23.2.4) при частичном финансировании по проектам РФФИ № 16-08-00603 и №16-38-00236.

- [1] Буше Н.А. и др. Подшипники из алюминиевых сплавов. – М.: Транспорт. – 1974
 [2] Abed E.J. Study of Solidification and Mechanical Properties of Al-Sn Casting Alloys // Asian Transaction on Engineering. – 2012 (02), № 3, 89–98
 [3] Русин Н.М., Скоренцев А.Л. Способ получения износостойкого антифрикционного сплава // Патент RU 2552208. – опубл. 10.06.2015

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДЕТЕРГЕНТОВ С ДИАЛКИЛДИТИОФОСФАТОМ ЦИНКА

^{1,2}Самусенко В.Д. (samusenkovd@gmail.com), ²Доценко А.И., ¹Зеленская М.Н.

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

²Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия.

В статье приведены результаты исследования температурной стойкости растворов детергентов (сульфонатов и фенолятов кальция) и диалкилдитиофосфата цинка. Добавление детергентов в раствор с диалкилдитиофосфатом цинка приводит к снижению коэффициента трения во всем интервале исследуемых температур, а также к уменьшению высокотемпературных отложений на деталях узла трения.

Ключевые слова: диалкилдитиофосфат цинка, присадки, детергенты, температурная стойкость, коэффициент трения, взаимодействие присадок.

Введение

Исследование взаимодействия присадок является важной задачей для создания оптимальных составов смазочных материалов. Полученные экспериментальные данные имеют не однозначный характер. В зависимости от используемых методов испытаний смешивание различных типов присадок даёт как синергетический, так и антагонистический эффекты [1,2].

Материалы и методы

В данном исследовании использовался температурный метод [3], который позволяет проследить за образованием и разрушением граничного слоя в широком диапазоне температур. Испытания проводились на четырехшариковой машине трения КТ-2, в которой с целью предотвратить заметный фрикционный нагрев, реализована малая скорость скольжения в узле трения, а нагрев трущихся образцов и окружающего их слоя масла осуществляется от внешнего источника тепла. Образцы – шарики из стали 100Cr6 диаметром 7,94 мм. Осевая нагрузка 107,8 Н, контактная нагрузка на один шар равна 44,2 Н, а давление в контакте верхнего и каждого из нижних шариков (по Герцу) составляет примерно 2,1 ГПа. Скорость скольжения на

поверхности контакта равна 0,24 мм/сек. Диапазон исследованных температур 30-300°C, Температура узла трения ступенчато повышалась от внешнего источника тепла со скоростью 5°C в минуту. Коэффициент трения оценивался через каждые 10-20°C. Продолжительность опыта при каждой температуре составляла 60 с.

В качестве базового масла использовалось полиальфаолефиновое масло (ПАО-4). Используемые присадки перечислены в табл. 1. Концентрации детергентов подобраны таким образом, чтобы у растворов было щелочное число равное 6 мгКОН/г.

Таблица 1. Присадки.

Присадка	Тип присадки
ДФ-11 (диалкилдитиофосфат цинка)	противоизносная, антиокислительная
А (фенатная на продукте фенолформальдегидной конденсации, щ.ч. = 204 мгКОН/г)	детергент
Б (высокощелочной фенолят кальция щ.ч. = 286 мгКОН/г)	детергент
В (среднещелочной сульфонат кальция, щ.ч. = 150 мгКОН/г)	детергент
Г (высокощелочной сульфонат кальция, щ.ч. = 400 мгКОН/г)	детергент

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний приведены на рис. 1. Так диалкилдитиофосфат цинка не образует на поверхности антифрикционного граничного слоя при невысоких объёмных температурах. Разложение присадки происходит после 210°C, что приводит к снижению коэффициента трения. В результате разложения присадки в растворе образуется взвесь, что приводит к выпадению присадки в осадок по достижению 300°C (рис. 2).

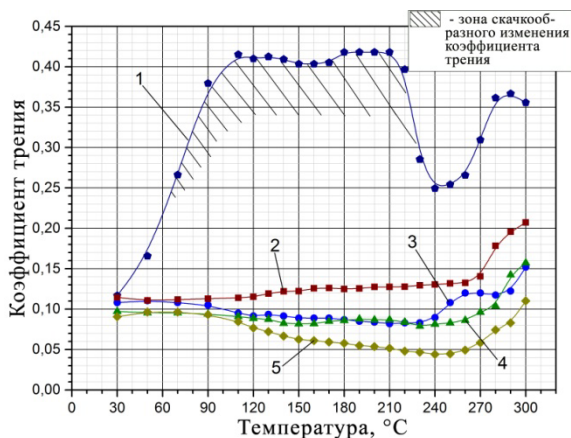


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения от температуры ДФ-11 в смеси с детергентами: 1 – ПАО-4+2%ДФ-11; 2 – ПАО-4+2%ДФ-11+2,2%В; 3 – ПАО-4+2%ДФ-11+3%А; 4 – ПАО-4+2%ДФ-11+ 4%В; 5 – ПАО-4+2%ДФ-11+1,5%Г.



Рис. 2. Чаша после испытания ПАО-4+2%ДФ-11.

Добавление детергентов в раствор ПАО-4+2%ДФ-11 приводит к снижению коэффициента трения во всем диапазоне температур. По всей видимости детергенты преобладают при формировании граничного слоя, что и даёт эффект снижения коэффициента трения. Однако для всех испытанных смесей характерен подъем коэффициента трения примерно после 230°C, что не характерно при испытании детергентов в отдельности, даже при меньших концентрациях. При испытании детергентов подъем коэффициента трения при высоких температурах не наблюдается совсем (рис. 3), либо наблюдается при более высокой температуре (рис. 4). По-видимому, это связано с разложением диалкилдитиофосфата цинка, активное разложение присадки приводит к образованию на поверхности смешанного граничного слоя с меньшим сопротивлением сдвигу.

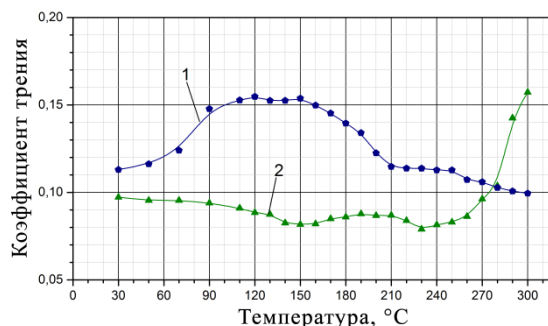


Рис. 3. Зависимость коэффициента трения от температуры: 1 – ПАО-4+1%В; 2 – ПАО-4+2%ДФ-11+ 4%В.

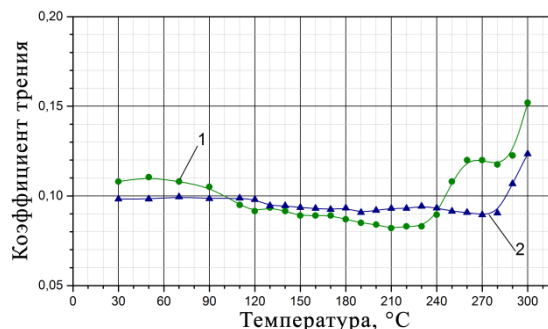


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от температуры: 1 – ПАО-4+1%А; 2 – ПАО-4+2%ДФ-11+3%А.

Таким образом, можно утверждать, что детергенты оказывают положительное влияние на антифрикционные свойства раствора, также добавление детергентов к диалкилдитиофосфату цинка предотвращает образование осадка и снижает количество высокотемпературных отложений (рис. 5). Однако следует учитывать, что детергенты увеличивают температуру начала разложения диалкилдитиофосфата цинка[4] и мешают адсорбции частиц диалкилдитиофосфата цинка на поверхности, что может негативно сказываться на противоизносных свойствах в реальных условиях эксплуатации.

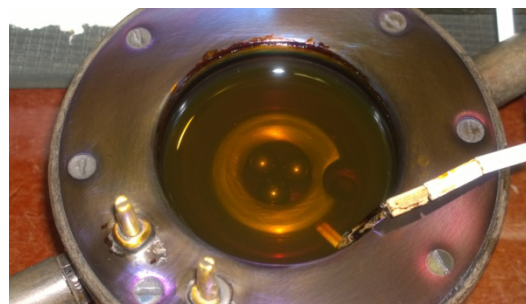


Рис. 5. Чаша после испытания ПАО-4+2%ДФ-11+ 4%В.

Между присадками по всей видимости происходит взаимодействие, как в объёме масла, так и на поверхности, однако нельзя однозначно утверждать о синергизме или антагонизме действия присадок. Исследования показали, что проявляется как то, так и другое. При этом детергенты выполняют непосредственно свою функцию, предотвращая при высоких температурах выпадение в осадок диалкилдитиофосфата цинка и образование высокотемпературных отложений.

- [1] Spikes H. A. Additive-additive and additive-surface interactions in lubrication //Lubrication Science. – 1989. – Т. 2. – №. 1. – С. 3-23.
[2] Willermet P. A. Some engine oil additives and their effects on antiwear film formation //Tribology Letters. – 1998. – Т. 5. – №. 1. – С. 41-47.

- [3] Матвеевский Р.М., Лашхи В.Л., Буяновский И.А. и др. Смазочные материалы. Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний. – М.: Машиностроение, 1989 – 192 с.
[4] Huq M. Z. et al. Thermal degradation behavior of zinc dialkyldithiophosphate in presence of catalyst and detergents in neutral oil //Tribology Letters. – 2005. – Т. 19. – №. 2. – С. 127-134.

ОЦЕНКА ПЛАСТИЧНОСТИ И ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ КОНТАКТНОГО НАГРУЖЕНИЯ

¹Сафонов Б.П. (boris_safonov@mail.ru), ¹Бегова А.В.

¹Новомосковский институт РХТУ им. Д.И. Менделеева, Новомосковск, Россия.

Рассматривается методика оценки пластичности в условиях контактного нагружения. Деформационное упрочнение оценивается по результатам металлографических и рентгенографических исследований образцов, отработанных по схеме скольжения и удара по абразивной поверхности. Получены значения коэффициентов упрочнения для сталей различных структурных классов.

Ключевые слова: трибосистема, пластичность, деформационное упрочнение, контактное нагружение, индентор.

Обобщенно, нагружение конструкционного материала можно свести к четырем компонентам: механическому, трибологическому, термическому и химическому. Как видно видов нагружения много, а механических свойств недостаточно. Поэтому для обоснованного выбора материалов необходима дополнительная информация о свойствах.

В связи с этим, целью эксперимента являлось разработка методики оценки пластичности стали в условиях контактного нагружения, которое осуществлялось внедрением шарикового индентора на твердомере Бринелля ТШ-2М.

Пластичность конструкционного материала является показателем надежности детали. Одной из характеристик пластичности является относительное удлинение δ при испытании металла на разрыв. В справочной литературе информация по пластичности приводится на основании результатов испытаний на растяжение по ГОСТ 1497-84 «Методы испытаний на растяжение». Однако, в ряде случаев разрушение материала происходит в условиях, отличных от условий нагружения разрывного образца (нагружение трущихся деталей машин, в частности: трение штока поршня о салниковую набивку и т.д.).

Представляло интерес исследование пластичности в условиях контактного напряженного состояния. В нашем случае оно реализовывалось в условиях нагружения шариковым индентором на твердомере Бринелля ТШ-2М.

Объектом исследования являлись металлические цилиндры из стали 40Х. Для подготовки к проведению эксперимента металлические цилиндры были расточены на токарном станке. После механической обработки образцов их подвергли термической обработке: закалке с последующим отпуском, отжигом. Термообработка проводилась в муфельных печах. После термической обработки образцы были зачищены от нагара и отшлифованы.

После того, как образцы были полностью готовы, на них была приложена нагрузка шариковым индентором диаметром 10 мм на твердомере ТШ-2М. В результате на поверхности цилиндрических шайб образовывались лунки (рис.1.а) и были пересчитаны значения твердости поверхностного слоя по отпечаткам индентора.

В программе Excel были посчитаны значения длины дуги лунки, относительного удлинения и наклепа.

При этом на каждом образце использовалась разная нагрузка для получения разной степени деформации: 500, 1000, 1500, 2000, 3000 (кгс). Отпечатки были сделаны таким образом, чтобы наплывы после нагрузки не заходили на другие отпечатки. Далее по методу Роквелла была измерена твердость материала в лунках, образовавшихся после измерения твердости по методу Бринелля (рис.1.б).

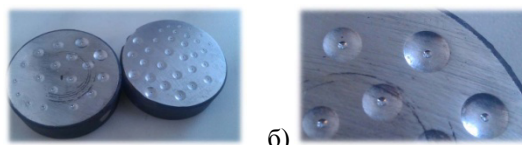


Рис.1. Экспериментальные образцы после нагружения индентором: а – на твердомере Бринелля, б – на твердомере Роквелла.

По результатам испытания были исследованы зависимости изменения твердости НВ и наклепа металла образцов в зависимости от нагрузки на индентор [1].

Исходя из анализа зависимостей, можно заключить, что относительная деформация поверхности для всех видов термообработки растет в зависимости от нагрузки, достигает определенного максимума и плавно снижается. Максимум наблюдается в диапазоне нагрузок от 1500 до 2000

кгс. Характер изменения наклепа в зависимости от нагрузки имеет такую же тенденцию.

Было проведено исследование деформационного упрочнения сталей в условиях контактного нагружения применительно к абразивному изнашиванию. Трибосистемы (ТС), реализующие абразивное изнашивание при скольжении и ударе, отличаются большим разнообразием технической реализации и высокой интенсивностью поверхностного разрушения элементов [2,3]. При трибологическом нагружении абразивом в поверхностном слое элемента ТС протекают два взаимно процесса: деформационное упрочнение, инициируемое механическим компонентом взаимодействия, и разупрочнение в результате тепловыделения на контакте. Анализ изменений СФС материала поверхности трения при взаимодействии с абразивом позволяет судить о доминирующем влиянии того или иного компонента взаимодействия и на этой основе формировать представления о механизме разрушения металла на контакте.

Для исследования деформационного упрочнения (наклепа) сталей были синтезированы модельные ТС, реализующие некоторые типичные случаи взаимодействия абразива и металла на контакте и включающие скольжение по абразивной поверхности и удар по слою абразива. В качестве меры наклепа приняты величины прироста твердости ΔHV или относительный прирост $\Delta HV/HV_0$.

Известно [4], что по глубине деформированного слоя твердость, остаточные напряжения и полуширина рентгеновской линии изменяются идентично. В этой связи нами предлагается оценивать наклеп металла по остаточным напряжениям, формирующимся на поверхности трения элементов ТС.

Рентгеновский метод анализа выбран в силу его универсальности и возможности проводить исследование стальных поверхностей различной топографии как с ориентированной шероховатостью, так и без нее.

Исследовали образцы из сталей 45, Д5(50ХН2МФ-Ш), 40Х13, Р18, 12Х18Н10Т, а также из армо-железа. С целью расширения диапазона изменения механических свойств стальные образцы подвергали закалке и отпуску при различных температурах. Изнашивание образцов осуществляли на лабораторных стендах, реализующих модельные ТС. Конструкция и аппаратное оформление стендов изложены в работах [5-7].

Рентгеновское исследование поверхности трения образцов проводили в кобальтовом излучении анода CoK_{α} (40 кВ, 3 мА). Для образцов из сталей перлитного, мартенситного, карбидного классов и из Fe-армо использовали линию интерференции α -Fe {211}, для образцов из сталей 12Х18Н10Т – γ -Fe {311}. Углы дифракции θ определяли на основании анализа дифрактометрических кривых образцов. Обсчет результатов рентгеновских исследований остаточных напряжений проводился в автоматическом режиме [8]. Соответствующая ориентация образцов ТС № 1 позво-

лила фиксировать продольные σ_x и поперечные σ_y остаточные напряжения, которые использовались для анализа. На образцах ТС № 2, 3 анализировались средние напряжения $\sigma_{ср}$.

Установлено, что для всех модельных ТС на поверхности изнашивания образцов формируются сжимающие остаточные напряжения, что свидетельствует о деформационной природе их возникновения. Следовательно, в формировании СФС поверхностных слоев для реализованных условий трибологического нагружения сталей абразивом механический компонент взаимодействия является доминирующим. Модуль остаточного напряжения растет с повышением твердости образцов; наибольшее напряжение зафиксировано на поверхности трения образцов из стали Р18 после закалки.

Для количественной оценки наклепа металла при нагружении абразивом по результатам рентгеновского анализа поверхностей изнашивания образцов проведено сопоставление прироста твердости и модуля остаточного напряжения на поверхности изнашивания.

Твердость измеряли на приборе Виккерса при нагрузке на пирамиду 0,25 Н. Для определения твердости стали в недеформированном состоянии HV_0 с поверхности образца снимали слой металла, модифицированного предшествующей механической обработкой. С этой целью проводили электролитическое полирование поверхности исследуемого образца на глубину ~ 100 мкм, после чего измеряли величину HV_0 . Установлено (рис.2), что между показателями $|\sigma_y|/HV_0$ и $\Delta HV/HV_0$ существует корреляционная связь ($\tau_{xy} = 0,76$), описываемая уравнением

$$|\sigma_y|/HV_0 = 0,66 + 1,87 \Delta HV/HV_0 \quad (1)$$

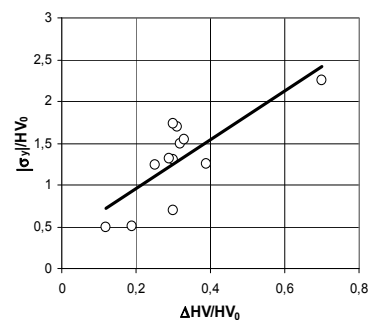


Рис.2. Корреляция характеристик наклепа металла $|\sigma_y|/HV_0$ и $\Delta HV/HV_0$ для образцов, исследованных в ТС № 1

Анализ склонности сталей к наклепу при трибологическом нагружении показывает, что для модельных ТС разной структуры закономерности деформационного упрочнения сталей имеют общие тенденции [9].

[1] Бегов П.Ю., Сафонов Б.П., Бегова А.В., Марценко К.Н. Исследование пластичности стали при деформации шариковым индентором. Труды НИ РХТУ им. Д.И. Менделеева. Серия: Инженерная механика, материаловедение и надежность оборудования / РХТУ им. Д.И. Менделеева, Московский институт. Новомосковск, 2012. Вып.№9(27) с.40-43.

[2] Хрущов М.М., Бабичев М.А. Исследование изнашивания металлов. Изд. АН СССР, 1960.

[3] Vogelpohl G./Forschung im Ingenieurwesen. 1969. Bd 35, №1. S. 1-6.

[4] Scholtes B., Macherauch E. // Z. Metallkunde. 1986. Bd 77, H. 5, S. 322-337.
 [5] Krause H., Welsch M. // Materialprüfung. 1988. Bd 30, №3, S. 64-68.
 [6] Сорокин Г.М., Сафонов Б.П. // Трение и износ. 1984. Т. 5, №5, С. 797-805.
 [7] Сорокин Г.М., Сафонов Б.П., Жаворонков В.В. // Зав. лаб. 1988, Т. 54. № 6. С. 80-82.

[8] Krause H., Mathias M. // Harterei Technische Mitteilungen. 1983. Bd 38, S. 129-135.
 [9] Сафонов Б.П. Научно-методические основы синтеза трибо-систем применительно к изнашиванию сталей абразивом. Дис. ... докт. техн. наук, М., РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина, 1991, 448 с.

РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ЗАДИРОСТОЙКОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИХ СКЛЕРОМЕТРИИ

¹Сачек Б.Я. (bsachek@mail.ru), ¹Мезрин А.М., ¹Муравьёва Т.И., ¹Столярова О.О.

¹Институт проблем механики РАН, Москва, Россия.

В работе представлены результаты триботехнических исследований опытных алюминиевых сплавов методом склерометрии, отобранных для возможной замены подшипниковых бронз. Изучена структура и химический состав трущихся поверхностей.

Ключевые слова: подшипниковые алюминиевые сплавы, твёрдость, склерометрия, износостойкость, металлография, вторичные структуры.

Цель работы состояла в повышении достоверности оценки задиристости экспериментальных алюминиевых сплавов на стадии их предварительного отбора для дальнейших триботехнических испытаний.

В работе представлены результаты исследования опытных экспериментальных алюминиевых сплавов, предполагаемых для возможной замены дорогостоящих бронз в узлах трения. Предварительный отбор сплавов осуществлялся методом склерометрии по критерию относительной сдвиговой прочности ($\tau/\sigma_{\text{мкр}}$), как более информативному по сравнению с контактным напряжением микро-резания ($\sigma_{\text{мкр}}$). Проведены триботехнические испытания выбранных сплавов по трёхпальчиковой схеме, имитирующей работу опорного подшипника скольжения. Результаты испытаний подтвердили принципиальную возможность использования этих сплавов в качестве заменителей бронзы. Показано влияние химического состава сплава на триботехнические свойства исследуемых сплавов. Изучена структура и химический состав поверхности, как исходных образцов, так и образцов после испытаний.

Материалы. В качестве объектов исследования были выбраны 13 сплавов системы Al-Si-Cu-Sn-Pb-Bi, выплавленные из материалов повышенной чистоты на основе алюминия А99 (ГОСТ11069-2001) с добавлением легирующих элементов. Медь М1 (ГОСТ 859-2001) в сплаве служит упрочнителем, олово О1 (ГОСТ 860-75) со свинцом С1 (ГОСТ 3778-98) и висмутом Ви1 (ГОСТ 10928-90) образуют мягкую фазовую составляющую, кремний Кр0 (ГОСТ2169-69) повышает литейные свойства.

Образцы. Образцы для контроля твердости и склерометрии были выполнены в виде пластин размером 20X70X10 мм, изготовленных из исследуемых экспериментальных алюминиевых сплавов.

Для триботехнических испытаний были подготовлены пальчиковые образцы (Ø6X6мм), которые в процессе эксперимента взаимодействовали с рабочей поверхностью контрообразца-диска из стали ШХ-15, твёрдостью HRC 60-62. Для сравнительной оценки триботехнических свойств были дополнительно сделаны пальчиковые образцы термообработанные при 400°C с остыванием с печью.

Склерометрия. Склерометрические исследования образцов опытной партии проводилось на трибометре УМТ-3 путём плавного внедрения сферического индентора радиусом 2 мм при его перемещении относительно плоской поверхности образца с одновременной непрерывной регистрацией как нормальных, так и сдвиговых усилий, что позволило точнее визуализировать момент перехода внешнего трения во внутреннее при скольжении индентора.

Результаты

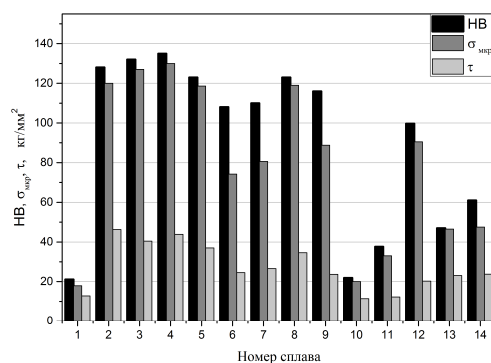


Рис. 1. Соотношения между твёрдостью HV, напряжением микро-резания $\sigma_{\text{мкр}}$ и сдвиговым сопротивлением τ исследуемых сплавов.

Полученные данные свидетельствуют о том, что сплавы №№6, 7, 9, 12 могут быть «дублёрами» бронзы БрО4Ц4С17 (сплав №14), как ближайшие к ней по триботехническим характеристикам.

С учётом вышеизложенных соображений для дальнейших триботехнических испытаний были отобраны образцы №№6, 7, 9, 12 с минимальным соотношением τ/σ , но достаточно твёрдые, которые при всех прочих равных условиях даже при полном отсутствии смазки с наибольшей вероятностью обеспечат сравнительно небольшой коэффициент трения в трибосопряжении и тем самым предотвратят его задиры.

Учитывая, что для подшипниковых сплавов особое значение имеет твёрдость и трещиностойкость при повышенных температурах, а режим трения образцов без смазки сопровождается достаточно быстрым нагревом испытываемой пары, что приводит к наволакиванию пластичного алюминиевого сплава на контробразец, сплавы №№1, 10, 11, 13, не содержащие медь, не подвергались износным испытаниям ввиду их низкой нагрузочной способности, тем более при повышенных температурах.

Триботехнические испытания. На рис. 2 представлены осреднённые данные высокотемпературного эксперимента ($T=100-125^{\circ}\text{C}$), выполненного на трибометре UMT-2 для выбранных сплавов.

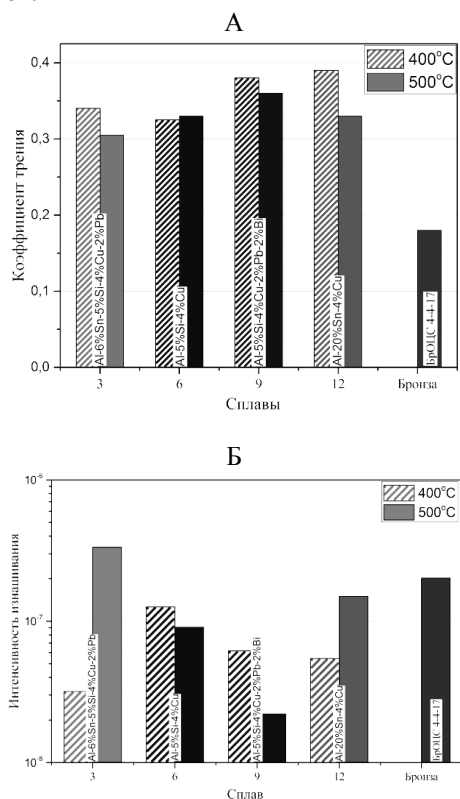


Рис. 2. Зависимость триботехнических характеристик (I, f) экспериментальных антифрикционных алюминиевых сплавов от их номинального состава и режима термообработки. а) – коэффициент трения, б) – интенсивность изнашивания.

Установлено, что в условиях сухого трения лучшими антифрикционными свойствами обладает бронза БрО4Ц4С17, у которой коэффициент трения по закалённой стали ШХ-15(HRC 60...62) не превышал $f \leq 0,17$ (см. рис. 2а), в то время как для испытываемых экспериментальных алюминиевых сплавов он находился в пределах $f=0,30...0,38$. С увеличением твёрдости с HB 55 до HB 100 он уменьшился с $f=0,4$ до $f=0,28$.

Микроскопические исследования показали, что после испытаний на поверхности пальчиковых образцов произошли значительные изменения.

На поверхности обнаружены жгутообразные включения, с высоким содержанием кислорода (который при повышении давления и температуры в контактной зоне адсорбируется на поверхность из окружающей среды), находящиеся, очевидно, в различных стадиях образования и разрушения. Также на поверхности находятся мелкие частицы подобного элементного состава. Можно предположить, что в процессе трения в зоне контакта поверхность окисляется, на ней образуются продукты износа в виде «оксидных нитей» - жгутиков, которые впоследствии разламываются на более мелкие частицы, являющиеся абразивом и способствующие образованию задира.

Выводы

1. По результатам склерометрирования образцов опытной партии экспериментальных сплавов можно констатировать, что удельное сдвиговое сопротивление наряду с контактным напряжением микрорезания могут быть использованы в качестве критериев потенциальной их задиростойкости.
2. В условиях высокотемпературных сравнительных испытаний отобранных сплавов (№№3, 6, 9, 12) наилучшую приработочную способность показала бронза БрО4Ц4С17, а наибольшую износостойкость – сплавы №6 и №9 после упрочняющего отжига.
3. В процессе трения зона контакта насыщается кислородом и углеродом, что приводит к образованию твердых частиц оксидов и карбидов. Эти частицы возможно играют роль абразива, способствующего изнашиванию и образованию задира на поверхности.

Работа проведена при поддержке гранта РФФ 14-19-01033.

[1] Б.Я. Сачек, А.М. Мезрин, Т.И. Муравьёва, О.О. Столярова, Д.Л. Загорский, Н.А. Белов, Исследование трибологических свойств антифрикционных алюминиевых сплавов с использованием метода склерометрии // Трение и износ – Том 36, №2, 2015, стр. 137-146.

[2] М. М. Хрушев. Современные методы испытания на микротвёрдость царапанием, их варианты, применение и перспективы использования // Трение, износ и микротвёрдость металлов. Избранные работы к 120-летию со дня рождения – Москва, 2012, 512с.

[3] Н.И. Богомолов, Ю.В. Безолок, Н.И. Есикова «Исследование влияния наклёпа на твёрдость царапанием» // Сб. Склерометрия – 1968 г., Москва, «Наука», стр. 57-64

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМОСТОЙКИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ

Седакова Е.Б. (elenasedakova2006@yandex.ru), Козырев Ю.П.

Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, Россия.

Расчетным и экспериментальным путем показано, что для надежной работы трибосопряжений при подборе термопластичных полимерных материалов для узлов трения необходимо учитывать их теплофизические свойства.

Ключевые слова: износ, износостойкость, полимер, температура стеклования.

Введение. Существует ряд термостойких полимерных материалов, которые в настоящее время применяются в качестве конструкционных. Это полиимиды (ПИ), полиэфирэфиркетоны (ПЭЭК), а так же политетрафторэтилен (ПТФЭ). Температуры плавления таких материалов находятся в пределах 300÷400°C [1], при этом их максимальные рабочие температуры достигают 250÷280°C. Однако, известно, что при испытании на трение и износ ПТФЭ имеет очень низкую износостойкость. Это может определяться его существенно более низкой температурой стеклования ниже -60°C. Поэтому вблизи поверхности трибоконтакта даже при комнатных температурах ПТФЭ находится в высокоэластическом состоянии. В процессе трения при определенном уровне температуры это может приводить к сильному адгезионному взаимодействию с шероховатой поверхностью стальных контртел. Аналогичным поведением отличаются и полиимиды. У этих материалов существует широкий температурный диапазон стеклования, до 300°C, в котором они сохраняют высокую эластичность [1, 2]. При этом подвижность участков их макромолекул также может способствовать их высокому износу [3]. Несколько другим поведением отличается ПЭЭК. Этот материал обладает высокими физико-механическими характеристиками, в том числе термостойкостью. Его температура плавления $t_{nl} = 334^\circ\text{C}$, а температура стеклования $t_{cm} = 143^\circ\text{C}$, при этом максимальная рабочая температура составляет 300 °C. В то же время модуль упругости при изгибе при достижении t_{cm} резко снижается, однако остается достаточно высоким по сравнению с другими термопластами [4]. Данная работа посвящена исследованию износостойкости ПЭЭК при температурах в зоне трения близких к t_{cm} с целью оценки работоспособности ПЭЭК в узлах трения.

Экспериментальная часть. Исследования трения и износа проводились на установке описанной в [5] по схеме кольцо-плоскость. Исследуемый полимерный образец изготавливался в виде пластины размером 20×25 мм и толщиной 5,7 мм. Путь трения L во всех экспериментах составлял 1000 м. Контроль температуры образца осуществлялся в центре боковой поверхности образца в конце каждого испытания с помощью инфракрасного термометра UT 302 С. Коэффициент трения f измерялся по величине тока электродвигателя.

Теоретическая часть. Примем, что на одной грани полимерного образца расположен источник энергии, имеющий площадь существенно меньшую площади одной грани образца. Тогда зона неравномерного нагрева будет занимать небольшой объем. Примем, что на всех гранях полимерного образца температура одинакова [6]. Тогда для упрощения расчета поверхностных температур рассмотрим модель, согласно которой в полимерном образце равномерно распределен источник тепла с постоянной мощностью на единицу объема, и суммарной мощностью P , выделяемой в трибоконтакте

$$P = (1 - Q)fpvS_H, \quad (1)$$

где Q - коэффициент распределения теплового потока; f - коэффициент трения; p - контактное давление; v - скорость скольжения; S_H - номинальная площадь контакта.

Величина Q определялась по формуле Шаррона [7]

$$Q = \frac{\sqrt{\lambda\rho c}}{\sqrt{\lambda\rho c} + \sqrt{\lambda_1\rho_1c_1}},$$

где λ и λ_1 - теплопроводность; ρ и ρ_1 - плотности; c и c_1 - теплоемкости металлического контртела и полимерного образца соответственно.

Если температура на каждой грани образца равна t_0 , то величину температурного напора Δt_0 найдем из выражения [6]

$$\Delta t_0 = t_0 - t_c = P \cdot \left(\frac{1}{\alpha S} + \frac{L_3 C}{V \lambda} \right), \quad (2)$$

где t_c - температура окружающей среды; V - объем образца; α - коэффициент теплоотдачи поверхности образца, величина которого определяется по критерию Нусельта; S - площадь поверхности, участвующей в теплоотдаче; λ - теплопроводность полимера; C - постоянная.

Справедливость соотношения (2) проверялась сравнением расчетных данных по нагреву образцов Δt_0 , с экспериментально измеренной поверхностной температурой Δt_0 .

При выполнении вышеперечисленных условий средняя температура на поверхности источника энергии \bar{t} [6]

$$\bar{t} = \frac{(1 - Q)\mu p v S_H \varphi}{\lambda L_{cp}} + t_0, \quad (3)$$

где $L_{cp} = \sqrt{L_1 L_2}$ - средняя длина стороны основания, φ - постоянная.

Таблица. Сравнение расчетных и экспериментально полученных значений Δt при различных P с параметрами износа

Параметр	Мощность сил трения P , Вт				
	0,09	0,11	0,14	0,26	0,32
f	0,24	0,19	0,10	0,3	0,3
$T_k = (\bar{t} + \Delta t_0 + t_c)$, °C	64,2	74,3	84,9	142,1	170,8
Коэфф. износа, $K=(\Delta V/FL)$	$7,6 \cdot 10^{-15}$	$1,0 \cdot 10^{-14}$	$4,1 \cdot 10^{-15}$	$2,0 \cdot 10^{-13}$	$6,4 \cdot 10^{-13}$
$\Delta t_э$, °C	8,1	11,1	12,8	25,5	—
Δt_0 , °C	9,2	11,3	14,0	27,3	33,4

* Примечание: ΔV -объемный износ образца, F -нагрузка, Н

Обсуждение результатов. Результаты экспериментальных исследований ПЭЭК приведены в табл. Из данных табл. следует, что при достижении в зоне трибоконтакта температуры близкой к t_{cm} резко возрастает износ ПЭЭК. При этом происходит периодическое схватывание поверхностей трения. Таким образом величина t_{cm} полимера определяет его работоспособность в узле трения. Кроме того, данные таблицы показывают, что соотношение (2) применимо для расчета поверхностной температуры, а соотношение (3) можно использовать для оценки температуры на трибоконтакте.

Выводы. 1. Из литературных источников предложены и обоснованы теоретические соотношения для расчета контактных температур полимерных узлов трения.
2. Применение полученных соотношений позволит оптимизировать выбор материалов для узлов трения с учетом их характеристик и размеров.
3. Получено подтверждение гипотезы о низкой износостойкости чистых полимеров, находящихся в высокоэластической области.

[1] Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов. М. Гос. изд. физ.-мат. литературы. 1959, 356 с.

[2] Бессонов М.И., Котон М.М., Кудрявцев В.В., Лайус Л.А. Полиимиды – класс термостойких полимеров. Л.: Наука, 1983. 328с.

[3] Булатов В.П., Седакова Е.Б., Козырев Ю.П., Губанова Г.Н., Мелешко Т.К., Кудрявцев В.В. Применение метода акустической эмиссии для оценки изнашивания полимерных композитов на основе полиимидов и политетрафторэтилена // Трение и износ. 2003. Т. 24. N. 1. С. 85-91.

[4] Адаменко Н.А., Казуров А.В., Зарщиков К.Ю., Седов Э.В. Исследование влияния наполнителя на трибомеханические свойства полиэфирэфиркетона. Известия ВолгГТУ. 2010. №4 (64). С. 52-54.

[5] Козырев Ю.П., Седакова Е.Б. Метод определения допустимых нагрузок при трении с использованием эмпирического закона изнашивания // Вестник машиностроения. 2007. N. 6. С. 44-46.

[6] Дульнев Г.Н., Семьяшкин Э.М. Теплообмен в электронных аппаратах. Л. Энергия. 1968. 366 с.

[7] Амосов А.П. Элементарные теплофизические модели трения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13, № 4(3) С. 656 – 662.

О МЕХАНИЗМЕ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ

Семенов М.Ю. (Shigona.podzhogin@yandex.ru), Фахуртдинов Р.С., Дин Кай Цзянь

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

Проведена оценка сопротивления контактной усталости поверхности подвергнутых химико-термической обработке зубчатых колес из теплостойких сталей в зависимости от эффективности защиты от схватывания. На основе расчетов влияния интенсивности трения на распределение приведенных напряжений обоснована гипотеза о существовании двух механизмов контактно-усталостного разрушения: поверхностного и подповерхностного, приоритет которых определяется условиями взаимодействия сопряженных поверхностей.

Ключевые слова: заедание, адгезия, контактная усталость, зубчатые колеса, химико-термическая обработка, теплопрочные стали.

Введение

Традиционными способами обеспечения сопротивления контактно-усталостному разрушению зубчатых колес авиационных, автомобильных и железнодорожных двигателей являются различные виды химико-термической обработки (ХТО): цементация, режэ: азотирование и нитроцементация. Одновременно высоконагруженные и высокоскоростные зубчатые передачи могут подвергаться

абразивному изнашиванию и его крайней форме: заеданию, расчет на которое, необоснованно не предусмотрен действующим ГОСТ 21354-87 [1].

Имеются две основные точки зрения на приоритетное место зарождения контактно-усталостных трещин: 1) на глубине слоя, ввиду превышения приведенными контактными напряжениями предела выносливости упрочненного слоя (М.М. Саверин [2], Р.Р. Гальпер,

Н.М. Рыжов [3], В.Н. Кудрявцев [1] и др.), и 2) на поверхности, чему способствуют ее локальные повреждения (С.В. Пинегин [4], Е.М. Морозов, Л.И. Куксенова [5] и др.).

Как известно, наиболее эффективно сопротивляются контактной выносливости цементованные, заеданию - азотированные. Важным преимуществом азотирования, которое проводится при более низких температурах, является возможность исключения трудоемкой операции зубошлифования, обязательного для цементованных колес, либо замена его более продуктивным зубохонингованием.

В этой связи целью настоящей работы является определение ведущего механизма контактно-усталостной повреждаемости зубчатых передач и, как следствие, оптимального способа поверхностного упрочнения деталей машин.

Материалы и методы

Объектами настоящего исследования явились цилиндрические эвольвентные прямозубые колеса авиационных двигателей из теплопрочных сталей мартенситного класса, таких как 16ХЗНВФМБ-Ш, 20ХЗМВФ-Ш и дисперсионно-твердеющей стали нового поколения 13ХЗНЗМ2ВФБ-Ш.

При проведении расчетов рассматривали совместное действие в зубчатом зацеплении высокой нормальной распределенной нагрузки p [Н/мм] и скоростей скольжения, вызывающих рост температуры контактирующих поверхностей.

Интегральную оценку напряженного состояния осуществляли по приведенным напряжениям $\sigma_{пр}$, которые рассчитывали исходя из соотношения [2]:

$$\sigma_{пр} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}, \quad (1)$$

где σ_i , τ_{ij} - соответственно нормальные и касательные контактные напряжения, которые определяли путем численного расчета методом конечных разностей на языке программирования Object Pascal в зависимости от коэффициента трения f , определение которого вызывает существенные затруднения. Так, при достижении температур вспышки в связи с полной утратой смазочным слоем своих свойств происходит интенсивный рост числа адгезионных связей, приводящий к схватыванию рабочих зубчатых колес и резкому возрастанию коэффициента трения. Согласно уравнению [6], общая работа сил трения: $A_{тр} = A_K + A_a$, где A_K - работа силы трения в отсутствие адгезии (по Кулону); A_a - сил адгезии. Отсюда мощность трения $W_{тр} = W_K + W_a$, где W_K и W_a - мощность трения по Кулону; - адгезии. Тогда $f = f_K + f_a$, где f_K и f_a - коэффициенты трения по Кулону, адгезии.

В свою очередь, рост коэффициента трения обуславливает дальнейшее увеличение касательных напряжений. Соответственно возрастает мгновенная температура взаимодействующих поверхностей ϑ , которую определяли численно [7], на основе решения уравнения теплопередачи:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2}, \quad (2)$$

где a - коэффициент температуропроводности; t -

время, в заданных граничных и начальных условиях. Использовали формулу для расчета доли атомов, образующих адгезионные связи за период мгновенного контакта сопряженных поверхностей, учитывающая энергию пластической деформации при адгезионном взаимодействии [7]:

$$N_a = K_a \frac{kT}{h} \exp\left(-\frac{(\sigma_1 + \sigma_2)S_k}{E_{mp} + E_{nd}}\right) \tau_k; \quad (3)$$

где k - постоянная Больцмана; σ_1, σ_2 - удельная работа силы поверхностного натяжения для материалов зубчатого колеса и шестерни; S_k - удельная площадь контакта; E_{mp} - свободная энергия вследствие работы силы трения; E_{nd} - свободная энергия, выделившаяся вследствие пластической деформации; T - температура на поверхности зацепления, определенная как сумма мгновенной температуры ϑ и приращения температуры, обусловленного пластической деформацией $\Delta\vartheta = E_{nd}/k$; h - постоянная Планка; τ_k - время существования контакта в зацеплении; K_a - коэффициент, отражающий количество атомов, на которых вероятны адгезионные связи:

$$K_a = (1 - K_1)(1 - K_2); \quad (4)$$

где K_1 и K_2 - объемные доли карбидной (карбонитридной) фазы на поверхности зубчатого колеса и шестерни соответственно. Величины K_1 и K_2 могут изменяться в пределах от 0 и до 100 %.

Учитывая площадь и время мгновенного контакта, а также долю атомов, на которых образуются адгезионные связи (с учетом разделения на два тепловых потока):

$$W_a = \frac{bLN_a\sigma}{\tau_k}, \quad (5)$$

где σ - поверхностная энергия образующейся границы раздела при срезе образовавшихся связей, которую определяли по формуле Гилмана. При контакте однородных материалов: $\sigma \approx \sigma_1 \approx \sigma_2$.

Даже при $f = 0,40$ приведенные контактные напряжения достигают своего максимума на некотором удалении от поверхности. При $f = 0,50$ максимальным является значение на поверхности.

Для зубчатой передачи из цементованной стали 16ХЗНВФМБ-Ш рассчитали значения температур (ϑ_s) в окрестности зоны трения и условные расчетные значения температур в точке контакта ($\vartheta_{тр}$), определенные как суммарный вклад нагрева от трения и пластической деформации. Так, в момент заедания ϑ_s составила 360 °С, а $\vartheta_{тр}$ - около 640 °С. Объемная температура масла ϑ_0 поддерживалась на уровне 250 °С. На основании полученных результатов оценили совокупный коэффициент трения в момент заедания:

$$f = f_K \frac{W_{mp}}{W_K} = f_K \frac{\vartheta_{mp} - \vartheta_0}{\vartheta_s - \vartheta_0} \approx 0,35.$$

(6)

Как показали расчеты уже при $f = 0,25$ приведенное напряжение на поверхности составляет около 85 % от максимального значения $\sigma_{пр}$ в слое,

а при $f=0,30 - 90 \%$.

Таким образом, в момент заедания приведенные напряжения на поверхности приближаются к максимальным. Достоверность полученных результатов подтверждается [8], согласно которому в момент заедания $f=0,3-0,5$.

Связь между нагревом поверхности и максимальной контактной повреждаемостью установлена также в работе [9].

Данная точка зрения соответствует экспериментальным данным [10]: в цементованных сталях при отсутствии общего поверхностного шелушения контактно-усталостное разрушение развивается под упрочненным слоем. Аналогичный цементации рост контактной выносливости наблюдается и при увеличении протяженности упрочненного слоя при насыщении теплопрочной стали азотом [11].

Выводы

1. При высоких значениях коэффициента трения, имеющих место в условиях, близких к сухому трению, зарождение контактно-усталостных трещин происходит на поверхности, а при нормальном смазывании - в подповерхностном слое.

2. При опасности сухого трения рекомендуется применять азотирование или сочетание цементации и финишного азотированием (комбинированная ХТО).

- [1] О методах оценки несущей способности цилиндрических зубчатых передач (окончание) / В.Н. Кудрявцев, Д.Н. Решетов, И.С. Кузьмин и др. // Вестн. машиностр. – 1989, № 10, 16-21.
- [2] Саверин М.М. Контактная прочность материалов в условиях одновременного действия нормальных и касательных нагрузок (ЦНИИТМАШ, кн. 2). - М.-Л.: Машгиз. - 1946.
- [3] Рыжов Н.М. Технологическое обеспечение сопротивления контактной усталости цементуемых зубчатых колес из теплоустойчивых сталей // МиТОМ. – 2010, № 7, 39-45.
- [4] Пинегин С.В. Контактная прочность и сопротивление качению. – М.: Машиностроение, 1969.
- [5] Герасимов С.А., Куксенова Л.И., Лаптева В.Г. Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. - 518 с.
- [6] Механизм граничной смазки и свойства граничного смазочного слоя / Б.В. Дерягин, Н.Н. Захаваева, В.В. Карасев и др. // ЖТФ. –1957 (5), 1076-1086.
- [7] Семенов М.Ю., Рыжов Н.М. Применение численных методов для анализа тепловых процессов в зубчатом зацеплении // Технология машиностроения. – 2012, № 4, 48–53.
- [8] Смазочные материалы: Антифрикционные и противоизносные свойства. Методы испытаний: Справочник - М.: Машиностроение, 1989.
- [9] Гурский Б.Э. Теоретические основы определения зон максимального местного износа зубьев цилиндрических эвольвентных передач: дис. ... д.т.н. – М., 1999. .
- [10] Литмен У.Е., Уайндер Р.Л. Распространение контактной усталости от источников поверхностного и подповерхностного происхождения: Пер. с англ. // Труды американского общества инженеров-механиков. Теоретические основы инженерных расчетов. – 1966 (88, D), № 3, 94-110.
- [11] Структура и контактная выносливость упрочненных слоев теплоустойчивой стали ВКС-7 после ионно-плазменного азотирования/ С.А. Герасимов, Л.И. Куксенова, М.Ю. Семенов и др. // Металлург. –2016, № 4, 77-81.

КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ БИСЕРНЫХ ДИСПЕРГАТОРОВ

Сербин В.М. (vmserbin@yandex.ru)

Северо-Кавказский федеральный университет, Ставрополь, Россия.

В материалах доклада рассматриваются вопросы повышения надежности и долговечности гуммированных дисков бисерных мельниц. Для этого используется комплексный подход: совершенствование свойств материала диска; изучение влияния внешних факторов на химическую стойкость и износостойкость резины; влияние резины на качество перерабатываемого продукта.

Ключевые слова: гуммированный диск, резина, химическая стойкость, износостойкость, температура, растворитель.

Цель. Повышение надежности и долговечности гуммированных дисков бисерных диспергаторов (мельниц).

Введение. В нашем предыдущем сообщении [1], рассматривались некоторые аспекты затронутой проблемы. При этом основное внимание уделялось результатам предварительных опытно-промышленных испытаний гуммированных дисков, которые выявили ряд проблемных вопросов, требующих более глубокого изучения, в том числе: - совершенствование свойств материала резинового покрытия; - изучение влияния температуры органических растворителей на химическую стойкость и физико-механические характеристики резины;

- установление возможности повторного использования гуммированных дисков; - изучение влияния эластомеров на качественные характеристики лакокрасочных материалов;

Результаты и их обсуждение. Как известно, химическая стойкость резин зависит, в первую очередь, от типа каучука и его химического строения. Наши исследования показали [2], что среди широкого класса стандартных резин, максимальную стойкость в среде углеводородов показала резина на основе бутадиен-нитрильного каучука (шифр БНКС-28). Однако хорошо известно, что химическая стойкость резин на основе этих каучуков резко повышается с увеличением числа акрилонитрильных звеньев (а. з.) [3]. Поэтому в каче-

стве альтернативы базовой смеси была предложена опытная резиновая смесь на основе каучука БНКС-40 (где цифра указывает на содержание а. з.).

Известно, что при переработке пигментной суспензии внутри рабочего цилиндра бисерной мельницы развивается достаточно высокая температура (60...70 °С). Данный фактор оказывает значительное влияние на реологию жидкой фазы, физико-механические характеристики резины и активность взаимодействия эластомеров и растворителей.

На рис. 1 показаны результаты сравнительных испытаний базовой и опытной резины в среде уайт-спирита в диапазоне температур 20...70 °С. Из графиков наглядно видно, что массопоглощение растворителя с ростом температуры повышается. При этом химическая стойкость резины на основе БНКС-40 во всем диапазоне температур примерно в два раза превосходит резину на основе БНКС-28, что подтверждает положительное влияние числа а. з. на этот показатель.

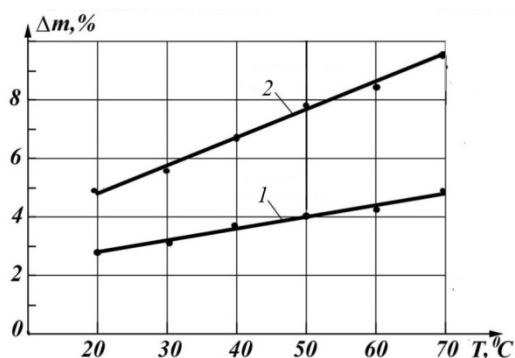


Рис. 1. Влияние температуры на кинетику массопоглощения уайт-спирита резиной на основе БНКС-40 (1) и БНКС-28 (2) (выдержка 72 ч.)

Помимо химической стойкости, содержание акрилонитрильных звеньев также влияет на физико-механические характеристики резины [3]. Среди этих показателей наиболее значительное влияние на гидроабразивную износостойкость резины оказывает ее эластичность [4].

В качестве объектов эксперимента использовались стандартные образцы (пятаки), которые выдерживались в течение 48 часов в среде органических растворителей в термостате при температуре 63 °С. Испытания на эластичность проводились по стандартной методике. Исходная эластичность опытной резины составила 34 условные единицы. В таблице 1 представлены результаты эксперимента.

Таблица 1. Влияние углеводородов на эластичность опытной резины

Растворитель	Эластичность, у. е.	
	После набухания	После восстановления
Керосин ТС	56	34
Уайт-спирит	56	34
Сольвент	68	34

Согласно представленным данным эластичность опытной резины после набухания увеличилась на 40...50 %, что, несомненно, является положительным фактором с точки зрения износостойкости резин.

Бисерные мельницы работают по так называемому «сезонному» режиму. Обычно сезон начинается в конце марта и заканчивается в конце октября, т.е. длится примерно 7 месяцев, что предполагает 3 – 4-х кратное набухание и восстановление резинового покрытия диска в течение всего срока службы. В этой связи закономерным является вопрос – как этот процесс влияет на внутреннюю структуру резины?

На рис. 2 показана кинетика набухания при температуре 63 °С в среде углеводородов и восстановления в воздушной среде опытной резины.

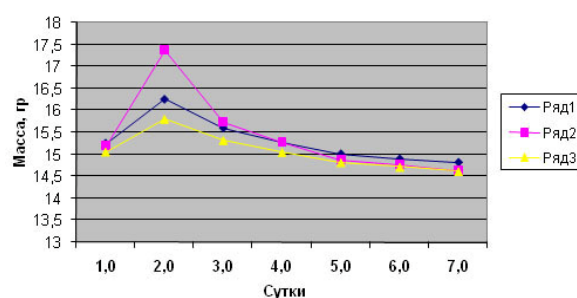


Рис. 2. Кинетика набухания (участок 1–2) и восстановления (участок 3–7) опытной резины в среде: уайт-спирита (ряд 1), сольвента (ряд 2) и керосина (ряд 3)

Согласно представленным данным, исходная масса образцов уменьшилась на 3...4 %, что свидетельствует о незначительном вымывании из структуры резины отдельных ингредиентов и полном восстановлении ее свойств. При повторных экспериментах масса исходных образцов не изменялась. Таким образом, гуммированные диски можно использовать неоднократно.

В процессе опытно-промышленных испытаний гуммированных дисков [1] отмечалась необходимость более глубокого исследования влияния эластомеров на качественные характеристики лакокрасочных материалов (ЛКМ), особенно светлых тонов. Необходимость этого исследования была связана с опасениями, что входящие в состав эластомерной композиции ингредиенты, и, прежде всего, технический углерод (сажа) будут экстрагироваться в пигментную суспензию и снижать ее качество (изменять цвет).

В качестве активных химических сред применялся готовая белая и желтая краска. Экстракция образцов проводилась внутри термостата при температуре 63 °С в течение 48 часов (до достижения равновесного набухания). Для того чтобы определить количество экстрагированного материала, образцы извлекались из термостата, промывались, сушились и выдерживались в течение 10 суток при температуре 20 °С.

Анализ результатов эксперимента показал, что вымывание резины в готовой краске составляет примерно 3...4 %, что объясняется пониженной

концентрацией растворителей в этих смесях. Визуальные наблюдения показали, что продукты экстракции в белой краске имеют вид тонкой светлоресничной пленки, при этом цвет краски не изменяется.

Суммарная масса резины, используемой для гуммирования дисков ротора бисерной мельницы типа МТ-140, составляет около 12 кг. Тогда в процессе эксплуатации из этой резины будет экстрагировано примерно 0,5 кг ингредиентов. Учитывая, что в сезонный период на этой мельнице перерабатывается около 200 тонн краски, говорить о снижении качества лакокрасочного материала некорректно. При повторном использовании дисков влиянием этого фактора на качество ЛКМ можно вообще пренебречь.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- повышенное содержание акрилонитрильных звеньев в составе бутадиен-нитрильных каучуков

положительно влияет на химическую стойкость резины, а также на ее эластичность;

- повторное использование гуммированных дисков в межсезонные периоды допускается;

- в процессе приготовления лакокрасочных материалов их качественные характеристики не изменяются.

[1] Сербин В.М. Оценка влияния углеводородных растворителей на триботехнические характеристики эластомеров / Трибология – машиностроению: Труды десятой юбилейной Всероссийской научно-технической конференции с участием иностранных специалистов. – М.: Издательство "Перо", 2014. – 120-121.

[2] Пенкин Н.С., Сербин В.М., Шнир О.Б. Повышение износостойкости рабочих органов бисерных диспергаторов методом гуммирования // Лакокрасочные материалы и их применение. – 2005, № 6, 17 – 20.

[3] Химическая энциклопедия: в 5 томах: т. 1 / Под ред. И.Л. Кнунянца. – М.: Советская энциклопедия. – 1980

[4] Гуммированные детали машин. 2-е изд. перераб. и доп. / Н.С. Пенкин, В.Г. Копченков, В.М. Сербин и др. под ред. Н.С. Пенкина. – М.: Машиностроение. – 2013

СПОСОБ СНИЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ТРЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПРИ ВЫТЯЖКЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО АЛЮМИНИЯ

Серезкин М.А. (pehobator@gmail.com), Лавриненко В.Ю., Ступников В.П., Мельников Э.Л., Ларина А.В.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия.

В статье рассмотрен способ снижения величины напряжений трения и коэффициента трения, возникающих во фланце заготовки при вытяжке деталей-полусфер из технически чистого алюминия за счёт использования покрытия, полученного финишной антифрикционной безабразивной обработкой (ФАБО), наносимого на рабочие поверхности матрицы и прижима.

Ключевые слова: вытяжка, покрытие, коэффициент трения, стойкость штампа.

Введение

При переработке нефти неизбежно возникает проблема хранения и транспортировки продуктов – лёгких углеводородов: бензинов, керосинов и т.д. При хранении они испаряются, образуя взрывоопасную газозвездную смесь. Это влечёт за собой опасность взрыва, а также потерю объёмов хранения продукта. В настоящее время эта проблема решается за счёт использования так называемых плавучих понтонов. Перспективной разработкой в этой области является использование в качестве плавучих понтонов пустотелых шариков. Плавающие в большом количестве (согласно проведённым исследованиям не менее 7 слоёв) по поверхности хранимого продукта, они практически полностью исключают её испарение и, как следствие, образование взрывоопасной газозвездной смеси [1].

Требования к деталям

Деталь – полусфера из материала АД1М ГОСТ 4784-97, диаметр 20–28мм, толщина исходной заготовки: 0,35мм, допустимое утонение при вытяжке 15-20%. При этом толщина торца должна

составлять 0,4мм, т.к. сборка изготовленных деталей в готовое изделие происходит с использованием лазерной сварки. Производительность линии должна составлять 9000 шаров в час. В качестве технологии изготовления полусферы была выбрана вытяжка сферическим пуансоном.

Особенности технологического процесса

По данным Д.А. Вайнтрауба, Э.Л. Мельникова и других исследователей вытяжка деталей из технически чистого алюминиевого сплава может сопровождаться налипанием штампуемого металла на поверхность штампа.

Налипание при обработке давлением – это фрагментарный процесс разрушения поверхностного слоя штампуемого материала вследствие образования локального сварного соединения (схватывания) между штампуемым материалом и штампом сопровождающийся вырывом частиц штампуемого металла. Вырванные частицы остаются на поверхности штампа. Процесс имеет лавинообразный характер, с каждой новой штампуемой деталью, на участке произошедшего схватывания суммарный объём вырванных частиц увели-

чивается. Это приводит к браку штампуемого изделия – изготовленное изделие не будет соответствовать требованиям чертежа. Это негативно влияет на эксплуатационные свойства изготавливаемой детали, ухудшается внешний вид.

Поскольку при налипании происходит разрушение поверхностного слоя штампуемого материала, значит, напряжения в поверхностном слое превышают предел прочности. Одной из возможных причин этого повышения являются дополнительные напряжения, возникающие от действия сил трения во фланце заготовки. Суммарное действие меридиональных и тангенциальных напряжений возникающих во фланце заготовки при вытяжке, а также дополнительных напряжений от действия сил трения приводит к разрушению материала заготовки. Дополнительные напряжения от действия сил трения могут являться суммой напряжений при сухом трении, напряжений трения в слое смазочного материала, напряжения трения модифицированного слоя, напряжения среза на участках схватывания и касательных напряжений.

Разработка пути решения проблемы

Снизить величину одной из составляющих дополнительных напряжений от действия сил трения – напряжений трения можно за счёт покрытия полученного методом финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО). Покрытие, получаемое с помощью ФАБО, наносится на чистовую обработанную поверхность инструмента путём натирания её латунным, бронзовым или медным карандашом (стерженьем) с использованием специальной технологической среды. Физика процесса ФАБО сходна с физикой схватывания металлов при трении – местное соединение двух твёрдых тел под действием молекулярных сил. При этом образуются металлические связи в зонах непосредственного контакта поверхностей. В местах схватывания исчезает граница между соприкасающимися телами, происходит сращивание разноименных металлов [2]. Опыт применения покрытия показал, что усилие при вытяжке снижается на 5% [3].

Экспериментальная проверка

Для проверки предложенного решения было решено воспользоваться методикой представленной в статьях [4]. Для определения напряжений трения и коэффициент трения проводили вытяжку полос из материала АД1М, толщиной 0,4мм, шириной 20мм в кольцевую матрицу диаметром 67мм с радиусом скругления 1мм. Диаметр пуансона 65мм с радиусом скругления 1 мм. Длину заготовок выбирали следующим образом: длина первой заготовки была больше диаметра прижима (115мм), а длина второй равной диаметру прижима (100мм).

Силу прижима Q_1 для первой заготовки рассчитывали по формуле $Q_1 = S_{нач} q$, где $S_{нач}$ – начальная площадь заготовки под прижимом, q – удельное давление прижима, для алюминиевых сплавов принимается равным 0,8–1,2МПа.

Для второй заготовки сила прижима $Q_2 = Q_1/2$. Это сделано для того, чтобы в определённый мо-

мент вытяжки создать давление прижима равным давлению прижима в первом случае нагружения. Поскольку длина второй заготовки равна диаметру прижима, то в процессе вытяжки, площадь заготовки под прижимом будет уменьшаться, а давление прижима расти. Для первой заготовки, поскольку её длина больше чем диаметр прижима, площадь заготовки под прижимом при вытяжке меняться не будет.

Для сравнения величины напряжений трения при вытяжке образцов из технически чистого алюминиевого сплава с покрытием ФАБО и без него на участок матрицы и прижима было нанесено покрытие ФАБО. Чтобы исключить влияние смазочного материала вытяжку образцов проводили без использования смазочного материала. Поверхности инструментов, находящихся в контакте с деформируемыми образцами и сами образцы обезжиривались.

Эксперимент проводили на универсальной гидравлической машине для статических испытаний «Instron», модель серии DX. Точность измерения нагрузки составляет $\pm 0,5\%$ от измеренного значения.

На рис. 1 показаны графики зависимости силы вытяжки образцов и давление под прижимом. Построив зависимость давления прижима на заготовку от перемещения пуансона при вытяжке, получим график, представленный на рис. 1б, из которого видно, что графики пересекаются в точке, равной перемещению пуансона h_p . В этой точке для двух случаев вытяжки будет наблюдаться равенство различных параметров кроме коэффициента трения и напряжений трения.

Напряжения трения $\tau_{тр}$ рассчитываются по формуле $\tau_{тр} = (P_1 - P_2) / S_{кон}$, где $S_{кон}$ – площадь заготовки под прижимом при перемещении пуансона на величину, при которой давление на заготовки под прижимом будет одинаковым – точка h_p на рис. 1б. P_1, P_2 – усилие при вытяжке первой и второй заготовки при том же перемещении пуансона h_p – рис. 1а.

Коэффициент трения рассчитывается по формуле $\mu_{тр} = \tau_{тр} / p$, где p – давление на заготовку под прижимом.

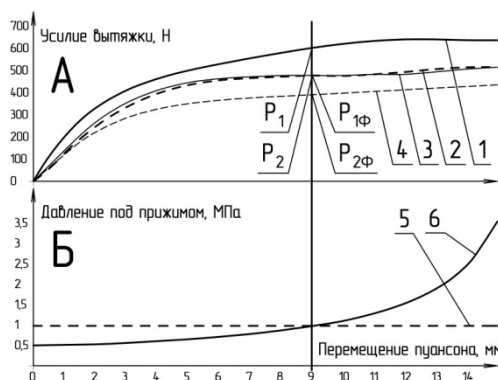


Рис. 1. Сила вытяжки образцов (а) и давление под прижимом (б): 1 – для образца длиной 115мм без ФАБО; 2 – для образца длиной 100мм без ФАБО; 3 – для образца длиной 115мм с ФАБО; 4 – для образца длиной 100мм с ФАБО; 5 – для образцов длиной 115мм; 6 – для образцов длиной 100мм.

Эксперимент показал, что напряжения трения и коэффициент трения будут иметь следующие значения: без ФАБО: $\tau_{тр}=0,386$ МПа, $\mu_{тр}=0,4$; с ФАБО: $\tau_{тр}=0,261$ МПа, $\mu_{тр}=0,27$.

Выводы

1. Применение покрытия полученного ФАБО позволяет снизить величину напряжений трения и коэффициента трения на 32,5%. Таким образом, нанесение покрытия ФАБО, является перспективным способом, позволяющим снизить трение при вытяжке деталей-полусфер из технически чистого алюминия.

2. Снижение величины напряжений трения приводит к уменьшению напряжений возникающих в поверхностном слое фланца заготовки при вытяжке, что уменьшит вероятность наступления процесса схватывания и повысит стойкость штампа.

Поскольку причиной схватывания при трении являются не только касательные напряжения тре-

ния, а также, например, сродство материалов, вопрос схватывания при вытяжке листовых материалов требует дальнейшего изучения.

[1] Рябинин В.П. Некоторые проблемы эксплуатационной надежности вертикальных стальных цилиндрических резервуаров с понтонами с учетом налипаемости хранимого продукта / В.П. Рябинин, И.Э. Лукьянова // Нефтегазовое дело [Электронный ресурс] – Уфа: УГНТУ, 2006. – Режим доступа: [//www.ogbus.ru/authors/Ryabinin/Ryabinin_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Ryabinin/Ryabinin_1.pdf), свободный.

[2] Гаркунов Д.Н. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин). - 5-е изд., перераб. и доп. изд. - М.: Издательство МСХА, 2002. - 632 с.

[3] Серёжкин М.А., Мельников Э.Л. Влияние финишного антифрикционного безабразивного покрытия на усилие формоизменения при вытяжке деталей из сплава АМг6БМ. Инженерный журнал: наука и инновации, 2015, вып. 10. URL: <http://engjournal.ru/catalog/mesc/fte/1438.html>

[4] Абрамов А.Н., Шолом В.Ю., Гизатуллин Р.И. Методика оценки напряжения трения и коэффициента трения при листовой штамповке // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2012. №11. С. 46-48.

ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗАКАЛЁННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПОДВЕРГНУТЫХ НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕМУ ВЫГЛАЖИВАНИЮ

¹Скоробогатов А.С., ¹Кузнецов В.П. (v.p.kuznetcov@urfu.ru),
²Столяров В.В., ²Малютин К.В.

¹Уральский федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

²Институт машиноведения им.А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия

В работе представлен сравнительный анализ трибологических свойств поверхностей термоупрочнённых сталей 20X и 20X13 после наноструктурирующего выглаживания и твёрдого точения. Показано существенное снижение интенсивности изнашивания корундом поверхностей после выглаживания относительно точения при испытании на трибометре всухую и со смазкой.

Ключевые слова: наноструктурирующее выглаживание, чистовое твёрдое точение, трибометрия, поверхностный слой.

Введение

Известно, что наноструктурные материалы проявляют особые физико-механические и трибологические свойства по сравнению с обычными поликристаллами [1].

Наноструктурирующее выглаживание (НСВ) – технология повышения физико-механических и трибологических свойств поверхностей деталей путём формирования «естественного» покрытия с наноразмерной зеренной структурой и сглаживания шероховатости за счёт интенсивной пластической деформации сжатия и простого сдвига. Наноструктурирующее выглаживание реализуется в качестве финишной обработки деталей на обрабатывающих центрах и позволяет получать готовые высокоресурсные изделия за один установ [2].

В настоящее время твёрдое чистовое точение позволяет обеспечить высокий уровень физико-механических и трибологических свойств без дополнительной финишной обработки. Однако возможность наноструктурирования поверхностей после чистового твёрдого точения за один установ

заготовки позволяет обеспечить существенно более высокий уровень физико-механических свойств [3].

Целью данной работы является исследование и сравнительный анализ интенсивности изнашивания, микротвёрдости и шероховатости поверхностей после наноструктурирующего выглаживания и чистового твёрдого точения.

Материалы и методы

Для исследования изготавливались образцы в форме диска размерами Ø 60 x 12 мм из стали 20X (HRC 55) и 20X13 (HRC 48). Образцы подвергались закалке и низкому отпуску для получения исходной структуры α -мартенсита.

Чистовое точение поверхности диска и наноструктурирующее выглаживание дорожки шириной 10 мм производились на токарном станке KNUTH V-Turn 410. Выглаживание стали 20X и 20X13 выполнялось полусферическим индентором радиусом 2 мм, соответственно, из ультрамелкодисперсного кубического нитрида бора DBN с нагрузкой 220 Н и поликристаллического синтетиче-

ского алмаза PCD с нагрузкой 340 Н. Указанные нагрузки обеспечивали контактные давления сжатия, соответственно, 4,3 ГПа и 3,2 ГПа. Обработка выполнялась инструментом с жидкостной термоэлектрической теплоотводящей системой [4-5] со скоростью 35 м/мин и подачей 0,025 мм/об.

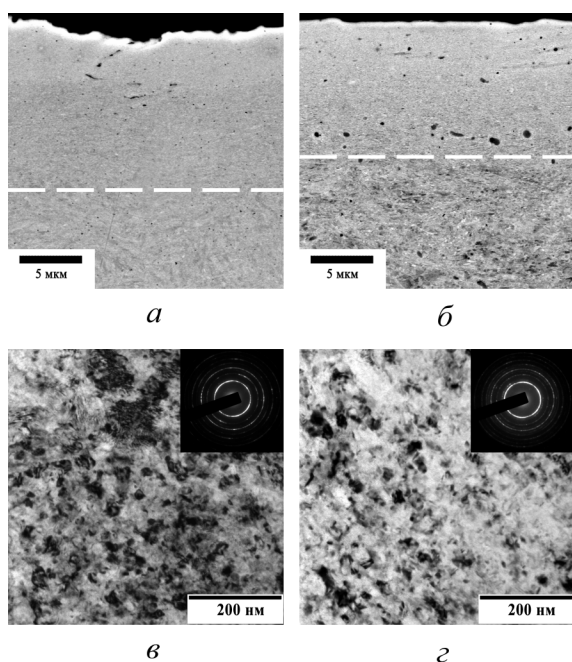


Рис. 1. Сканирующая *а, б* и просвечивающая *в, г* электронная микроскопия поверхности дорожки после наноструктурирующего выглаживания: *а* и *в* – сталь 20X; *б* и *г* – сталь 20X13

После наноструктурирующего выглаживания толщина наноструктурированного слоя составляла 9...11 мкм и 7...8 мкм, соответственно, для стали 20X и 20X13 (рис. 1, *а* и *б*). Размеры нанокристаллитов находились в диапазоне 5...70 нм (рис. 1, *в* и *г*).

Трибологические исследования проводились на установке Tribometer CSM по схеме «шар-плоскость». В качестве контртела использовался полусферический индентор Ø 6 мм из корунда (Al₂O₃). Испытания выполнялись на скорости 0,1 м/с при нагрузке 5 Н всухую и со смазкой индустриальным маслом И-20. Ширина и глубина дорожки износа после испытания определялись на профилемере НОММЕЛ-ЕТАМИС Т8000. Линейная интенсивность изнашивания *I* рассчитывалась по формуле (1):

$$I = \frac{h}{L}, \quad (1)$$

где *h* – глубина дорожки износа; *L* – путь трения.

Шероховатость измерялась на 3D-профилемере WYCO NT1000, микротвёрдость – на микротвердомере Leica VMHT. Исследование структуры поверхности выполнялось на электронных микроскопах AURIGA CrossBeam и JEM 2100.

Результаты и обсуждение

Существенное повышение трибологических свойств обеспечивается при наноструктурирующем выглаживании стали 20X13 (рис. 2). Так, при трибологическом испытании всухую интенсивность изнашивания наноструктурированной поверхности снижается на 48%, при испытании со смазкой – на 68% по сравнению с поверхностью после чистового точения. В то же время, снижение интенсивности изнашивания наноструктурированной поверхности стали 20X при испытании всухую составляет 28%, при испытании со смазкой – 4%. Снижение интенсивности изнашивания связано с повышением микротвёрдости и уменьшением шероховатости наноструктурированной поверхности.

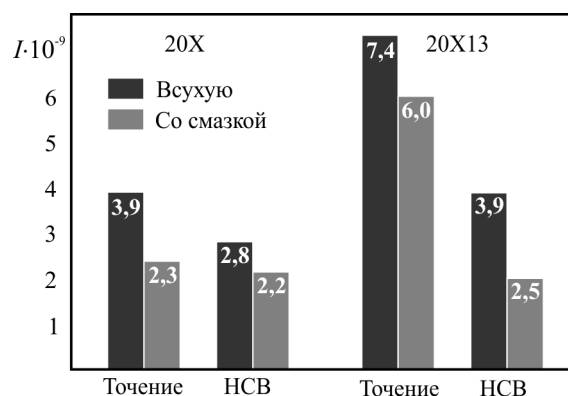


Рис. 2. Интенсивность изнашивания поверхности после чистового твёрдого точения и наноструктурирующего выглаживания

Полученные результаты хорошо согласуются с данными трибологических испытаний стали 20X после наноструктурирующего выглаживания с силой 200 Н на скорости 8,5 м/мин [6]. Интенсивность изнашивания при трении по корунду всухую составляла $3,1 \cdot 10^{-6}$.

Таблица 1. Параметры исследуемых поверхностей и результаты трибологических испытаний

Сталь	Обработка поверхности	Микротвёрдость HV _{0,25}	Шероховатость Ra, мкм	Смазка	Параметры износа			
					Ширина дорожки <i>w</i> · 10 ³ , м	Глубина дорожки <i>h</i> · 10 ⁶ , м	Путь трения <i>L</i> , м	Линейная интенсивность изнашивания <i>I</i> · 10 ⁹
20X	Твёрдое точение	900–950	0,3–0,35	без смазки	0,2	<1	254,4	3,9
				масло И-20	0,3	1,1	471,6	2,3
	НСВ	1350–1400	0,18–0,22	без смазки	0,1	<1	351,6	2,8
				масло И-20	0,15	0,9	398,4	2,2
20X13	Твёрдое точение	550–600	0,3–0,35	без смазки	1,5	4,9	660	7,4
				масло И-20	0,25	1,4	232,2	6,02
	НСВ	1200–1250	0,18–0,22	без смазки	0,1	<1	254,4	3,9
				масло И-20	0,1	<1	399	2,5

Выводы

Наноструктурирующее выглаживание термоупрочнённых мартенситных сталей формирует поверхностный слой с размерами зерен 5...70 нм толщиной 7...11 мкм, который обеспечивает микротвёрдость HV0,25 1200...1400, шероховатость Ra=0,18...0,22 и снижение интенсивности изнашивания до 70% в сравнении с твёрдым точением.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 15-08-01511 А.

- [1] Столяров В.В. Трибологическое поведение наноструктурных и крупнозернистых металлических материалов // Известия вузов. Черная металлургия. – 2015 (58), № 8, 25-30
- [2] Kuznetsov V.P., Tarasov S.Yu. and Dmitriev A.I. // J. of Mater. Process. Techn. – 2015 (217), 327-335
- [3] Кузнецов В.П., Горгоц В.Г., Скоробогатов А.С., Юровских А. // Труды IV Международной научно-технической конференции «Теплофизические и технологические аспекты повышения эффективности машиностроительного производства» (Резниковские чтения), (Тольятти, 27-29 мая 2015 г.): в 2 ч. – 2015, Ч.1, 273-279
- [4] Kuznetsov V.P., Skorobogatov A.S. and Gorgots V.G. // Appl. Mech. and Mater. – 2015 (770), 449-455
- [5] Kuznetsov V.P., Skorobogatov A.S., Gorgots V.G., Yourovskih A.S. // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016 (124), 012127
- [6] Кузнецов В.П. Теоретическое обоснование и реализация наноструктурирующего выглаживания при обработке прецизионных деталей из конструкционных сталей // Дис. док. техн. наук. – 2013

ВОЛОЧЕНИЕ ЛАТУННЫХ ЗАГОТОВОК ИНСТРУМЕНТОМ С РЕГУЛЯРНОЙ МИКРОГЕОМЕТРИЕЙ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Скоромнов В.М. (skoromnov_mami@mail.ru), Филина Н.А., Высокос М.И.

Государственный гуманитарно-технологический университет, Орехово-Зуево, Россия.

В работе приведены результаты экспериментальных исследований волочения латунных цилиндрических профилей и показана зависимость усилия волочения от параметров регулярной микрогеометрии.

Ключевые слова: волочение, микрогеометрия поверхности, латунь марки ЛС-59.

В работе [1] выполнено сравнительное исследование эффективности комбинированного волочения сплошных цилиндрических профилей из конструкционной стали инструментом с иррегулярным (ИМР) и регулярным (РМР) микрорельефом поверхности.

Используя полученные результаты, были проведены дополнительные экспериментальные исследования по оценке технологических возможностей при волочении заготовок из цветных сплавов.

Для этого в качестве экспериментальных образцов-заготовок применялись цилиндрические штоки из латуни марки ЛС-59 (твёрдость по Бринеллю 1430 МПа) номинальной длиной 140 мм.

Образцы-заготовки обрабатывались с точностью до 0,02 мм и исходной шероховатостью поверхности Ra₃ = 0,6 – 1,2 мкм.

Опытные деформирующие волокна (фильеры) с углом переднего и заднего конуса 5°±1° и шириной калибрующей ленточки 5 мм изготавливали из стали марки 9ХС (твёрдость после термообработки 58-61 HRC), диаметр рабочего канала 20^{+0,03} мм.

ИМР формировали шлифованием с высотой максимального микровыступа H_{max} = 7 – 17 мкм. РМР формировали на аналогичном ИМР алмазным выглаживателем радиусом 1,5 мм в виде однозаконных винтовых канавок с шагом (Ш_к) 0,5 и 1 мм и глубиной (Г_к) 4-10 мкм. При этом за нулевые параметры РМР (Ш_к = Г_к = 0) условно принимали параметры ИМР. Скорость волочения 1 м / мин,

технологическая смазка в виде смеси солидола и мелкодисперсного порошка дисульфида молибдена. Номинальный натяг пластического деформирования i_н варьировался в диапазоне 0,1 - 0,5 мм через 0,1 мм.

На рис. 1 – 3 представлены графические зависимости удельного усилия волочения q_д от фактического натяга пластического деформирования i_ф, характера и параметров РМР воздействующей поверхности волок.

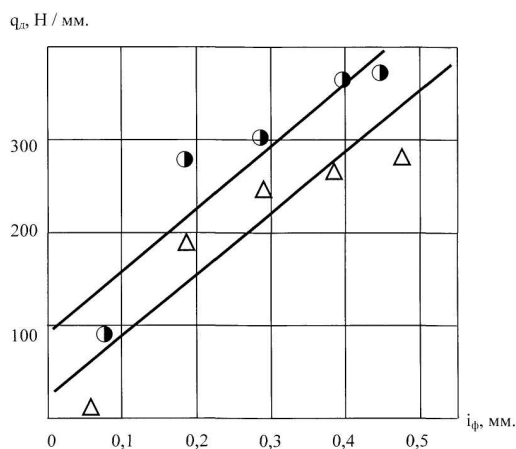


Рис. 1. Зависимость удельного усилия редуцирования (волочения) от фактического натяга пластического деформирования, характера и параметров РМР:
● – обработка фильерой с ИМР (Г_к = Ш_к = 0);
△ – обработка фильерой с РМР (Г_к = 10 мкм, Ш_к = 0,5 мм)

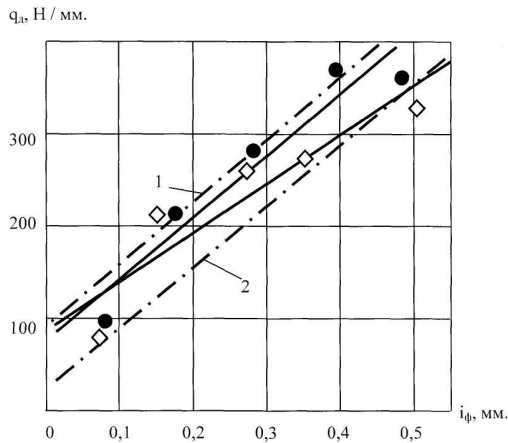


Рис. 2. Зависимость удельного усилия волочения от фактического натяга пластического деформирования, характера и параметров РМР:

- – обработка фильерой с РМР ($\Gamma_k = 5 \text{ мкм}$, $\text{Ш}_k = 1 \text{ мм}$);
- ◇ – обработка фильерой с РМР ($\Gamma_k = 10 \text{ мкм}$, $\text{Ш}_k = 1 \text{ мм}$);
- 1 – обработка фильерой с ИМР ($\Gamma_k = \text{Ш}_k = 0$);
- 2 – обработка фильерой с РМР ($\Gamma_k = 10 \text{ мкм}$, $\text{Ш}_k = 0,5 \text{ мм}$)

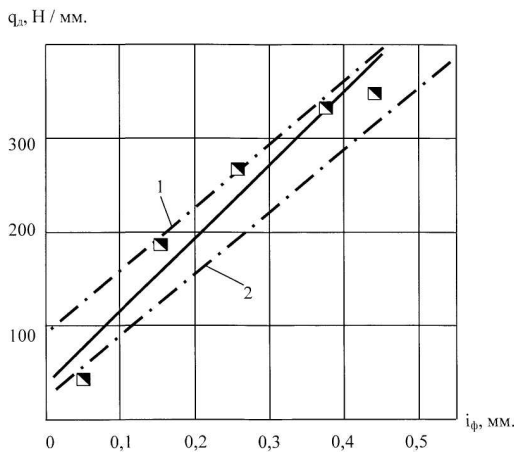


Рис.3. Зависимость удельного усилия волочения от фактического натяга пластического деформирования, характера и параметров РМР:

- – обработка фильерой с РМР ($\Gamma_k = 4 \text{ мкм}$, $\text{Ш}_k = 0,5 \text{ мм}$);
- 1 – обработка фильерой с ИМР ($\Gamma_k = \text{Ш}_k = 0$);
- 2 – обработка фильерой с РМР ($\Gamma_k = 10 \text{ мкм}$, $\text{Ш}_k = 0,5 \text{ мм}$)

Аналитически силовую динамику обработки можно в первом приближении представить в виде системы линейных выражений (Н / мм):

$$\begin{cases} q_d (\Gamma_k = \text{Ш}_k = 0) = 98,82 + 655,78 \cdot i_\phi; \\ q_d (\Gamma_k = 4 \text{ мкм}, \text{Ш}_k = 0,5 \text{ мм}) = 43,42 + 769,55 \cdot i_\phi; \\ q_d (\Gamma_k = 10 \text{ мкм}, \text{Ш}_k = 0,5 \text{ мм}) = 29,5 + 616,64 \cdot i_\phi; \\ q_d (\Gamma_k = 5 \text{ мкм}, \text{Ш}_k = 1 \text{ мм}) = 80,34 + 654,18 \cdot i_\phi; \\ q_d (\Gamma_k = 10 \text{ мкм}, \text{Ш}_k = 1 \text{ мм}) = 94,52 + 513,46 \cdot i_\phi; \end{cases}$$

Для оценки эффекта по снижению усилия волочения за счет РМР введем величину его относительного изменения (%):

$$\Delta q_d = \left(\frac{q_d (\text{ИМР}) - q_d (\text{РМР})}{q_d (\text{ИМР})} \right) \cdot 100\%;$$

Где $q_d (\text{ИМР})$ и $q_d (\text{РМР})$ – соответственно удельное усилие волочения инструментом с ИМР и РМР

при фиксированном значении i_ϕ , рассчитанные по соответствующим выражениям системы.

Из анализа зависимости (рис.4) РМР с параметрами $\Gamma_k=10 \text{ мкм}$, $\text{Ш}_k=0,5 \text{ мм}$ обеспечивает еще более существенное снижение усилия обработки, а при РМР с параметрами $\Gamma_k=10 \text{ мкм}$, $\text{Ш}_k=1 \text{ мм}$ эффект по снижению усилия имеет тенденцию к увеличению по мере увеличения степени деформации i_ϕ . Это объясняется более высокими антифрикционными свойствами латуней по сравнению с конструкционными сталями.

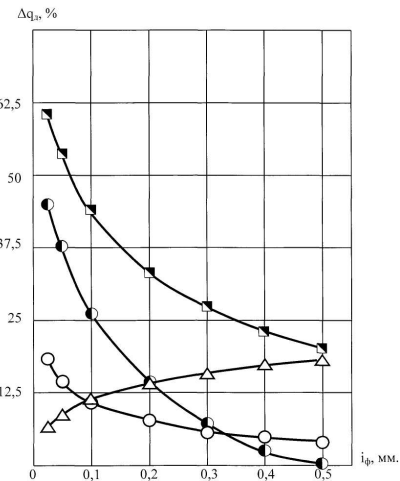


Рис.4. Зависимость относительного изменения усилия обработки от фактического натяга пластического деформирования и параметров РМР инструмента:

- - обработка фильерой с РМР ($\Gamma_k = 4 \text{ мкм}$, $\text{Ш}_k = 0,5 \text{ мм}$);
- - обработка фильерой с РМР ($\Gamma_k = 10 \text{ мкм}$, $\text{Ш}_k = 0,5 \text{ мм}$);
- - обработка фильерой с РМР ($\Gamma_k = 5 \text{ мкм}$, $\text{Ш}_k = 1 \text{ мм}$);
- △ - обработка фильерой с РМР ($\Gamma_k = 10 \text{ мкм}$, $\text{Ш}_k = 1 \text{ мм}$).

Другая особенность – ярко выраженный нелинейный характер зависимостей (рис. 1-3) удельного усилия q_d от фактического натяга пластического деформирования i_ϕ по разбросу экспериментальных точек по сравнению с аналогичными почти линейными зависимостями для конструкционных сталей. Это объясняется большим различием в физико-механических характеристиках конструкционных сталей и латуней, и соответственным различием в механизме их упрочнения при холодной пластической деформации.

Таким образом, полученные результаты еще раз подтверждают широкие технологические возможности методов комбинированного волочения инструментом с регулярной микрогеометрией рабочей поверхности.

[1] Скоромнов В.М. Разработка и исследование метода комбинированного редуцирования инструментом с регулярной микрогеометрией: Диссертация кандидата технических наук. – М.МГТУ МАМИ, 2004 – 227 с.

УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕТОДОВ ВОЛОЧЕНИЯ

Скоромнов В.М. (skoromnov_mami@mail.ru), Филина Н.А., Высокос М.И.

Государственный гуманитарно-технологический университет, Орехово-Зуево, Россия.

В работе приведены результаты исследований влияния регулярной микрогеометрии поверхности инструмента на процесс волочения, улучшающие его технологические показатели.

Ключевые слова: волочение, технико-экономические показатели, микрогеометрия поверхности, натяг пластического деформирования.

Теоретические и экспериментальные исследования [1-3] показывают, что регуляризация микрогеометрии воздействующей поверхности волочильного инструмента позволяет существенно повысить технико-экономические показатели соответствующих методов обработки.

Используя полученные предварительные результаты, в настоящей работе, были проведены более комплексные сравнительные исследования метода волочения в волокнах с иррегулярным (ИМР) и регулярным (РМР) микрорельефами рабочих поверхностей.

Опытные волокна изготавливались из стали марки 9ХС (твёрдость после термообработки 58...61HRC) с углом заборного и обратного конусов $5^\circ \pm 1^\circ$, шириной калибрующей ленточки около 5 мм и ее диаметром $20^{+0,03}$ мм.

ИМР формировался шлифованием с высотой максимального микровыступа $H_{max} = 7...11$ мкм.

РМР формировался на аналогичном ИМР алмазным выглаживателем радиусом 1,5 мм в виде однозаходных винтовых канавок с шагом ($Ш_k$) 0,5 и 1 мм и глубиной ($Г_k$) 4...10,25 мкм. При этом, за нулевые параметры РМР ($Ш_k = Г_k = 0$), условно принимали параметры ИМР. В качестве экспериментальных образцов-заготовок использовали цилиндрические штоки из стали 40Х с $HV=1890$ МПа и номинальной длиной 150 мм. Образцы протягивали на специальном приспособлении, на вертикальном гидравлическом прессе, путем захвата каждого штока за резьбовой участок. Скорость волочения соответствовала 1 м/мин, применяемая технологическая смазка – технический солидол с добавкой мелкодисперсного дисульфида молибдена. Номинальный натяг пластического деформирования i_n варьировался в пределах 0,1...0,5 мм с интервалом 0,1 мм.

На рис. 1 представлена частная графическая зависимость удельного усилия волочения q_d от фактического натяга пластического деформирования i_ϕ характера и геометрических параметров РМР.

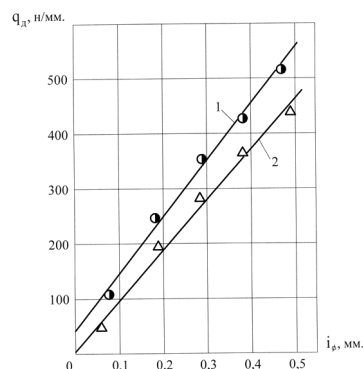


Рис. 1. Зависимость удельного усилия волочения q_d от фактического натяга пластического деформирования i_ϕ , характера и геометрических параметров рельефа волокна:
1 – Волока с ИМР; 2 – Волока с РМР.

Результаты эксперимента можно представить в виде системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} q_d(\Gamma_k = Ш_k = 0) = 46,09 + 1013,2 \cdot i_\phi \\ q_d(\Gamma_k = 4, \text{мкм}, Ш_k = 0,5 \text{мм}) = 12,88 + 1094,77 \cdot i_\phi \\ q_d(\Gamma_k = 9,96 \text{мкм}, Ш_k = 0,5 \text{мм}) = 3,59 + 924,24 \cdot i_\phi \\ q_d(\Gamma_k = 4,75 \text{мкм}, Ш_k = 1 \text{мм}) = 23,79 + 1045,27 \cdot i_\phi \\ q_d(\Gamma_k = 10,25 \text{мкм}, Ш_k = 1 \text{мм}) = 4,85 + 1073,72 \cdot i_\phi \end{cases}$$

Как следует из анализа частной графической зависимости (рис. 1) и аналитических зависимостей, РМР по сравнению с ИМР позволяет существенно (до 35%) уменьшить усилие обработки и соответственно повысить стойкость волочильного инструмента.

Дополнительными исследованиями были оценены параметры очага деформации. Как следует из рис. 2, в области номинальных натягов пластического деформирования 0,1...0,3 мм в очаге деформации образуется внеконтактная зона с увеличением диаметра обрабатываемой заготовки, а при больших натягах деформирования (рис. 2 г, д) в очаге деформации образуется внеконтактная зона с уменьшением диаметра обрабатываемой заготовки.

На рис. 3 представлена частная зависимость коэффициента уточнения по среднему параметру шероховатости поверхности образцов-деталей $K_y(\tilde{R}_a)$ от фактического натяга пластического деформирования, характера и геометрических параметров РМР.

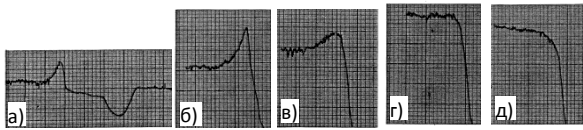


Рис. 2. Профиль очага деформации при волочении инструментом с РМР при номинальном натяге пластического деформирования: а) 0,1 мм; б) 0,2 мм; в) 0,3 мм; г) 0,4 мм; д) 0,5 мм. Размер ячейки по вертикали 2 мкм, по горизонтали 0,2 мкм.

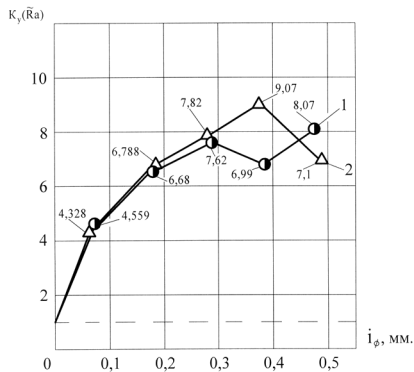


Рис. 3. Зависимость коэффициента уточнения по параметру шероховатости поверхности образцов-деталей от фактического натяга пластического деформирования и геометрических параметров рельефа волокна:
1 – волокна с ИМР; 2 – волокна с РМР.

Как следует из сопоставления зависимостей, приведенных на рис. 1 и рис. 3, по сравнению с иррегулярной микрогеометрией РМР обеспечивает меньшее усилие обработки, но практически такое же и даже более высокое качество поверхностного слоя. Это объясняется дополнительным воздействием РМР на обрабатываемый материал на микроуровне, так как каждый микровыступ РМР является отдельным микроиндентором, реализующим единственный цикл дополнительной микродеформации.

Таким образом, выполненные исследования показывают, что применение РМР позволяет улучшить технологические возможности методов комбинированного волочения.

[1] Щедрин А.В., Таненгольц А.Б., Скоромнов В.М. Трибологическая концепция системного анализа-синтеза комбинированных методов деформирующе-режущей обработки // Техника машиностроения. – 2001, №4(32). – с. 53-59

[2] Щедрин А.В., Егорова З.И., Скоромнов В.М. Повышение эффективности методов редуцирования цилиндрических поверхностей // Машиностроитель. – 2001, №3. – с. 18-21

[3] Скоромнов В.М. Разработка и исследование метода комбинированного редуцирования инструментом с регулярной микрогеометрией: Диссертация кандидата технических наук. – М.МГТУ МАМИ, 2004 – 227 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОДШИПНИКОВ

¹Скотникова М.А. (Skotnikova@mail.ru), ¹Полковникова М.К.

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

Методами оптической металлографии, растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного анализа, испытаний на твердость исследованы структурные изменения происходящих в керамических материалах на основе диоксида циркония. Изучены триботехнические свойства керамик, полученных в оптимальном технологическом режиме.

Ключевые слова: керамика на основе диоксида циркония, нанопорошок, триботехнические испытания со смазкой, рентгеноструктурный анализ, оптическая металлография.

Введение. Для повышения эффективности работы двигателей самолётов требуется снижение удельного расхода и запаса масел и топлива на их борту, а также увеличение оборотов вращения ротора двигателя [1]. Однако, это приводит к резкому увеличению нагрузки на гидродинамический подшипник опоры ротора, что значительно сокращает его ресурс. Поэтому было предложено заменить керамический подшипник скольжения со смазкой, обладающий меньшим весом и большим маслом удержанием, по сравнению со сталью.

Целью данной работы явилось исследование структуры, механических и триботехнических свойств керамики на основе диоксида циркония со смазкой, полученных прессованием и различными методами активированного спекания.

Материалы и методы. Материалом для исследования явились порошки и керамики из диоксида циркония следующих составов: 95% ZrO_2 - 5% Y_2O_3 и 76% ZrO_2 - 20% Al_2O_3 - 4% Y_2O_3 .

Керамические порошки диоксида циркония с размером частиц в десятых долях микрометра, полученные методом плазмохимического синтеза, рис.1, подвергались механической активации в планетарной шаровой мельнице Активатор 2SL. Продолжительность составляла 10, 20, 30 минут.

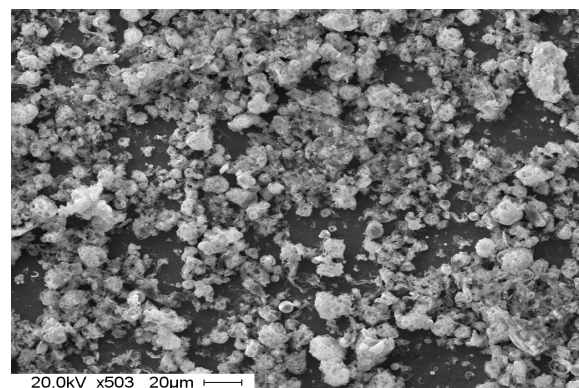


Рис. 1. Изображение порошка диоксида циркония.

Прессование образцов (оксидных нанопорошков) проводили методом радиального магнитно-импульсного прессования при давлениях 100, 200, 400, 500 МПа в стальной пресс-форме на механическом прессе [2].

Спекание прессовок проводили в высокотемпературной печи сопротивления по режиму: скорость нагрева – 10 град/мин, температура и время изотермической выдержки – 1600°C и 1 ч, охлаждение с печью.

Результаты и их обсуждение. В чистом диоксиде циркония при охлаждении переход фаз $t\text{-ZrO}_2 \rightarrow m\text{-ZrO}_2$ протекает по мартенситному механизму с расширением объема до 9%, что приводит к его разрыхлению. Поэтому из чистого диоксида циркония получить спеченные изделия невозможно. Практическую ценность имеют твердые растворы различных оксидов на основе диоксида циркония или механические смеси, способные стабилизировать высокотемпературные t - или c -фазы при комнатной температуре.

Добавки Y_2O_3 не испаряются и помогают расширить температурный диапазон тетрагонального твердого раствора t - диоксида циркония. Это позволяет получить спеченную циркониевую керамику, имеющую в своем составе более 90% $t\text{-ZrO}_2$, которая наиболее перспективна.

Добавки корунда Al_2O_3 тоже стабилизируют тетрагональный t - диоксид циркония.

Традиционными способами получения керамик являются технологии, включающие в себя три основных стадии: 1. получение порошка, 2. его прессование и 3. последующее спекание.

Как показали исследования на этапе прессования порошков, с увеличением времени механической активации и давления прессования, относительная плотность образцов состава 95% ZrO_2 - 5% Y_2O_3 увеличивалась, что приводило к возрастанию механических свойств керамики. Керамика с добавкой оксида алюминия по составу 76% ZrO_2 – 20% Al_2O_3 – 4% Y_2O_3 значительно уступала первой по относительной плотности и свойствам.

Как показали исследования на этапе спекания прессовок, с увеличением давления прессования плотность керамик уменьшалась, рис.2. Оптимальным можно считать время механической обработки 30 мин. и давление прессования 200 МПа, после которого во время спекания достигались максимальный модуль упругости (217,7 ГПа) и высокая относительная плотность керамики 78-79% [3].

Проводили Исследование триботехнических свойств керамики из диоксида циркония, полученной при оптимальных технологических режимах, как при сухом трении в контакте со сталью 12Х1ФМ, так и при модифицировании масел нанопорошками диоксида циркония [4].

Исследования влияния давления прессования порошков на основе ZrO_2 и времени их механической активации, показали, что минимальная сила трения спеченных образцов в контакте со сталью 12Х1ФМ достигалась после 30 минутной активации и давлении прессования 100 и 500 МПа.

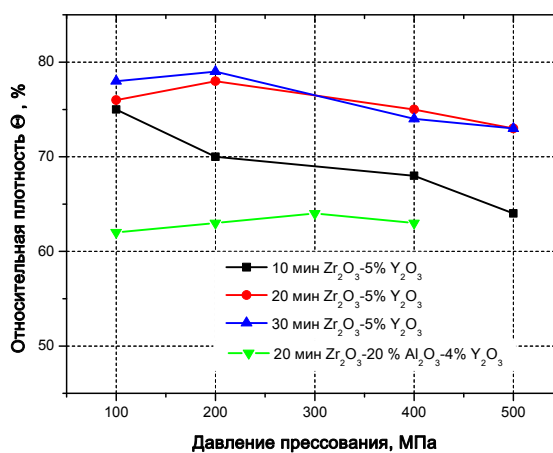


Рис. 2. Зависимости плотности спеченных керамических образцов от режима обработки в мельнице и давления прессования.

Исследования противоизносных свойств индустриального масла И-20А без добавок и с добавкой 0.05%, 0.5 % масс порошка диоксида циркония и иттрия в контакте со сталью ШХ15, были выполнены на машине трения СМЦ-2, рис.3.

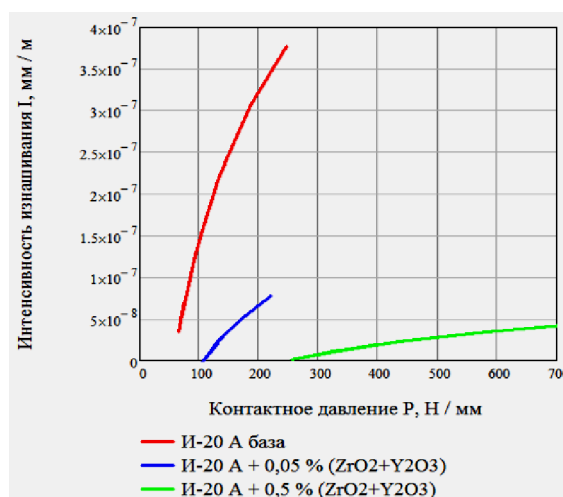


Рис. 3. Зависимости интенсивности изнашивания I шарика из стали ШХ15 в зависимости от контактного давления P для смазочного материала И-20А в исходном состоянии и модифицированном порошком диоксида циркония и иттрия.

Введение в индустриальное масло И-20А порошка диоксида циркония и иттрия в количестве 0,5% в 4,3 раза увеличило максимальное давление, при котором износ шарика из стали ШХ15 практически прекращается, и в 23 раза уменьшило интенсивность изнашивания смазочного материала.

Исследование противоизносных свойств пластичной смазки Литол-24 без добавок и с добавкой 0.05%, 1.0%, 5.0 и 10.0% порошка диоксида циркония и иттрия в контакте со сталью ШХ15, были выполнены на машине трения ЧШМ – 3,2.

В работе проводились кратковременные (часовые) испытания при нагрузках 79, 100 и 126 кгс и длительные испытания при постоянной нагрузке (20 кгс) для определения оптимального количества модификатора смазочной композиции. Оказалось, что для пластичной смазки Литол-24, модифицированного диоксидом циркония от 1% до 10%,

критическая нагрузка была равна 112 кгс, в то время как для чистого Литол-24 она составляла 84 кгс. Нагрузка сваривания составила 158 кгс. Индекс задира в модифицированном масле увеличился почти в 2,7 раза, по сравнению с исходным (немодифицированным) состоянием.

Выводы. Таким образом, минимальная сила трения спеченных образцов из керамики на основе диоксида циркония и иттрия в контакте со сталью 12Х1ФМ достигалась после 30 минутной механической активации и давлении прессования 100 и 500 МПа.

Введение в индустриальное масло И-20А порошка диоксида циркония и иттрия в количестве 0,5% в 4,3 раза увеличило максимальное давление, при котором износ шарика из стали ШХ15 практически прекращается и в 23 раза уменьшило интенсивность изнашивания смазочного материала, по сравнению с исходным (немодифицированным) состоянием.

Введение в пластичную смазку Литол-24 порошка диоксида циркония и иттрия в количестве ~7,0-10 % масс в 1,3 раза увеличило максимальное

давление, при котором износ шарика из стали ШХ15 практически прекращается и в 2,7 раза увеличилось индекс задира смазочного материала, по сравнению с исходным (немодифицированным) состоянием.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках грантов № 933-2014; № 1972-2014.

[1] Критский В.Ю., Зубко А.И. Исследование возможности использования керамических авиационных подшипников скольжения нового поколения в конструкциях опор роторов газотурбинных двигателей // М.: Наука. — 2013, №3, 24 – 26.

[2] Хасанов О.Л. Метод коллекторного компактирования нанополлидисперсных порошков: учебное пособие — Томск: Томский политехнический университет. — 2008.

[3] Чувакова М.К. Современное материаловедение: материалы и технологии новых поколений. Сб. трудов Всероссийской школы-семинара с международным участием – Томск: Томский политехнический университет. — 2014, 230-233.

[4] Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Алисин В.В., и др. Исследование изнашивания керамики, полученной из наноструктурных порошков ЧСЦ // Трение и смазка в машинах и механизмах – М.: Машиностроение — 2009, №11, 42-47.

КОСМИЧЕСКАЯ ТРИБОЛОГИЯ: ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ МЕХАНИЗМОВ ДЛЯ РАБОТЫ В КОСМОСЕ

Смирнов Н.И. (smir1947@yandex.ru), Албагачиев А.Ю., Смирнов Н.Н., Прожега М.В.

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

В работе дается обзор исследований работоспособности линейных механизмов для приводов космической техники в условиях вакуума, критериев работоспособности смазочных материалов. Разработана модель трибосопряжения линейного механизма и методика модельных испытаний.

Ключевые слова: линейные механизмы, модель трибосопряжения, испытания на трение и износ, вакуум.

Предмет исследования. В работе рассматриваются вопросы обеспечения ресурса линейных механизмов (ЛМ), используемых для коррекции положения антенн, двигателей, других узлов космической техники. Из ЛМ наиболее известны планетарные резьбовые винтовые механизмы (ПРВМ), шариковые винтовые механизмы, волновая резьбовая передача, несоосные винтовые механизмы. ПРВМ является наиболее перспективным ЛМ.

Проблема. Считается, что ресурс ЛМ определяется износом трибосопряжений, а их работоспособность лимитируется величиной момента трения. В настоящее время большинство типов ЛМ серийно не производится в РФ, не разработаны приемлемые методики оценки ресурса этих механизмов в экстремальных условиях. Обзор зарубежной и отечественной литературы показывает, что преобладает подход, основанный на натурных испытаниях механизмов в условиях, моделирующих реальные. Дegradация смазочных материалов исследуется отдельно на специальных трибометрах, кинематика которых преимущественно моделирует исследуемое трибосопряжение.

Дальнейшее повышение надежности и ресурса механизмов за рубежом развивается по двум основным направлениям: разработка новых смазочных материалов, стойких к воздействию космических условий и разработка уплотнительных устройств, предотвращающих или существенно снижающих испарение смазочных материалов. В результатах испытаний различных компаний широко представлена смазка на основе многократно алкилированного циклопентана МАС (multiply alkylated cyclopentane) с добавками фторопласта и MoS₂, обладающая низкой испаряемостью в условиях вакуума. Разрабатываются также новые методы испытаний.

Цель исследований. Разработать методику модельных испытаний трибосопряжений ЛМ на воздухе и в вакууме.

Содержание методики. В трибосопряжениях вышеречисленных ЛМ реализуется в основном трение качения со скольжением (верчением). Причем величина скольжения мала. Большое количество сопрягаемых витков, число которых может достигать несколько сотен, обеспечивает небольшие величины контактных напряжений при усло-

вии равномерного распределения осевой силы по виткам. Резьба винта 1, гайки 2 и роликов 3, рис.1, специальная с симметричным профилем и большим по величине углом профиля витков (обычно этот угол $\alpha = 90^\circ$). Такой угол обеспечивает высокую нагрузочную способность и осевую жесткость. С учетом этого применение известных методик испытаний [1] затруднено.

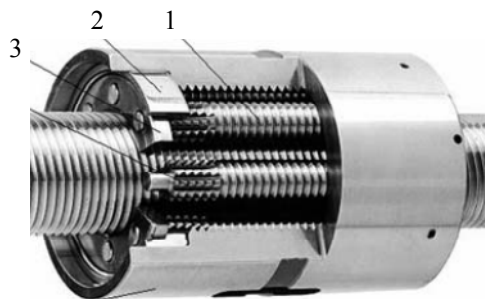


Рис.1.Общий вид ПРВМ.

Предлагается модель трибосопряжения в виде двух перекрещивающихся цилиндров, из которых один совершает возвратно-поступательное движение, второй катится по первому. Микроскольжение обеспечивается установкой цилиндров по от-

ношению друг к другу не под 90° . Эквивалентные напряжения в контакте достигаются изготовлением цилиндров с эквивалентными радиусами, которые вычисляются по формулам:

$$\text{ - для ролика } R_{PЦ} = \frac{d_{P2}}{2 \cdot \cos^2\left(\frac{P}{\pi \cdot d_{P2}}\right) \cdot \sin(45^\circ)},$$

$$\text{ - для винта } R_{ВЦ} = \frac{d_{В2}}{2 \cdot \cos^2\left(\frac{P \cdot z_B}{\pi \cdot d_{В2}}\right) \cdot \sin(45^\circ)},$$

где: d_{P2} , $d_{В2}$ – диаметры соответственно ролика, и винта; P – номинальный шаг резьбы; z_B – число заходов винта.

Рассматривается трибосопряжение винт-ролик, как наиболее нагруженное.

За время опыта происходит срабатывание определенного количества смазочного материала, нанесенного на поверхность в зоне трения. Режим трения оценивается с использованием метода электродатной диагностики.

[1] 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. – 384с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В АБРАЗИВОСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДЕ

Смирнов Н.И. (smir1947@yandex.ru), Яговкина А.Н.

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

В работе приведены результаты опытов по эрозионному изнашиванию порошковых материалов при скорости потока 7-16м/с, угле атаки $45^\circ, 90^\circ$ с кварцевыми и корундовыми частицами. Выявлено, что механизм разрушения связан с деформационными сдвигами и накоплением усталостных повреждений.

Ключевые слова: порошковые материалы, эрозионное разрушение, износостойкость, механизм изнашивания.

Предмет исследования. В работе представлены результаты испытаний порошковых материалов, используемых при изготовлении рабочих органов центробежных насосов на эрозионное изнашивание.

Проблема. Разрушение проточной части рабочих органов УЭЦН («промыв») приводит к авариям на скважине. Механизм «промыва» до конца не изучен и зависит как от особенностей потока пластовой жидкости в проточной части, концентрации абразивных частиц и коррозионно-активных элементов в ней, так и от износостойкости материалов. В работах [1,2] даны фундаментальные обзоры по исследованию эрозии, моделированию, однако порошковые материалы практически не изучались.

Цель работы заключалась в исследовании механизма разрушения, разработке методики испытаний и определении износостойкости порошковых материалов в абразивосодержащей среде.

Результаты исследований. Образцы для испытаний представляют собой псевдосплав сталь-медь ЖГр1Д15 и его разновидности, легированные дополнительно Ni, Cr, Mo, Mn для улучшения коррозионной стойкости. Для испытаний использовали установку [3], разработанную в ИМАШ РАН, работающую по принципу центробежного ускорителя, рис. 1.

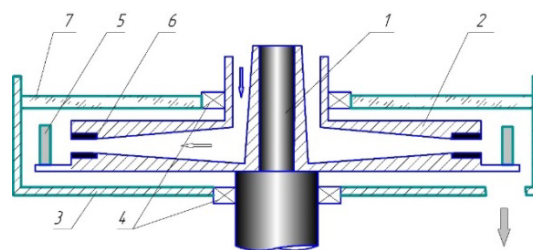


Рис.1.Схема испытательной камеры установки.

При вращении вала 1 с ротором 2 в камере 3 абразиво-содержащая жидкость из смесителя истекает под действием центробежной силы из сопел 6 на образцы 5, производя изнашивание последних. В качестве абразива использовали кварцевый песок и корунд размерностью F100, F40, F24.

Параметры опыта: угол атаки 90°, 45°; скорость потока 7, 11, 16 м/с. Критерий износостойкости – интенсивность изнашивания I_v , равная отношению изменения массы образца к массе абразива в опыте. Исследование морфологии поверхности материалов позволило выделить две основные структуры: первая – мелкопластинчатый перлит, легированный медью и твердый раствор железа в меди; вторая – феррит, легированный в зависимости от состава Ni, Cr, Mo и твердого раствора железа в меди. Исследование изношенной поверхности на СЭМ показало, что механизм эрозионного разрушения связан с деформационными сдвигами и накоплением усталостных повреждений. Не наблюдаются риски, характерные для микрорезания. Получены величины интенсивности изнашивания для различных условий опыта, табл. 1.

Табл. 1. Величины интенсивности изнашивания для различных условий опыта.

Материал	Абразив – корунд F100			
	I _v -106, г/г (скорость струи 16 м/с)		Показатель степени при V	I _v 45°/I _v 90°
	Угол атаки - 45°	Угол атаки - 90°		
ПК70Д15	10,1	9,5		1,07
ПК70Д25	8,7	8,3...10	2,3	0,87
ПК90Н4МГ2КД15	5,2	6,7-7,1	2,9	0,75
ПК10Н4МГ2КД15	10,1... 12,3	10,7... 11,3		0,94... 1,09
ПК10Н4МД15	5,9	12	3,6	0,50
ПК10Х16Н9Д20	10,6... 11,5	10,8... 12,4	3,5	0,93
ПК10Х11Н6Д20	9,8...9,9	8,8...9,2	2,8	1,08... 1,11
ПК10Х7Н4Д20	10,7	10,2	3,0	1,05

- [1] C.Meng, K.C.Ludema // Wear 181-183 (1995) 443-457
 [2] Mazdak Parsi, Kamyar Najmi, Fardis Najafifard et al. // Journal of Natural Gas Science and Engineering 21 (2014) 850-873.
 [3] Патент РФ №2444719, 2012. Смирнов Н.И., Смирнов Н.Н. Способ испытания материалов на гидроабразивный и коррозионный износ.

ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ГРАФЕНА НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИТА Al₂O₃ - ГРАФЕН (INFLUENCE OF GRAFENE CONTENT ON TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF NANOCOMPOSITE Al₂O₃ - G)

^{1,2} Столяров В.В. (vlstol@mail.ru), ^{1,2} Мисоченко А.А., ³ Малютин К.В., ² Григорьев Е.Г.,
² Жолнин А.Г., ⁴ Кляцкина Е.А., ⁴ Borrás V.A.

¹ Институт машиноведения РАН, Москва, Россия;

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия;

³ Институт машиностроения «МАМИ», Москва, Россия;

⁴ University Politècnica de València, Valencia, Spain.

С использованием метода плазменно-искрового спекания получены плотные наноккомпозиты Al₂O₃ с однородно распределенным внутри нанопленочным графеном. Исследовано влияние концентрации графена, диспергированного до 2% в наноккомпозит, на коэффициент трения и износостойкость. Показано, что коэффициент трения уменьшается, а износостойкость повышается при введении графена.

Ключевые слова: графен, наноккомпозиты, корунд, трение, износ.

Spark plasma sintering method has been applied to process the high dense nanocomposite Al₂O₃ with homogeneously distributed inside nanofilm graphene. Influence of graphene content, dispersed up to 2 % in the nanocomposite, on friction coefficient and wear resistance is investigated. It is shown, that the friction coefficient decreases, and wear resistance raises at graphene introduction.

Keywords: graphene, nanocomposite, corundum, friction, wear.

Introduction

Processing aluminum composites (G/Al₂O₃) strengthened by graphene causes advanced interest of many researchers [1]. It is connected with possible increase in them not only mechanical and electric properties, but also significant (on some orders) im-

provements of wear resistance. The aim of the work is research of graphene content influence on tribological characteristics of friction and wear resistance.

Experimental materials and methods

Composite (G/Al₂O₃) has been prepared by ultrasonic dispersion of graphene flakes (5 nm) in

naopowder Al_2O_3 (45 nm) and followed spark plasma sintering (SPS) (1550°C, 10 min). In a result disc of $\text{Ø}15 \times 2$ mm have been processed. Graphene content in composite was 0; 0.5; 1 и 2%. Tribological tests "ball ($\text{Ø} 6\text{mm}$) - disc" on Tribometer, CSM Instruments under load 20 N have been performed. An indenter material (WC, corundum, ruby) and motion direction (circular and reciprocating) were varied. Motion speed, test time were 6 cm/s; 3.5 hour (circular) и 19 hour (reciprocating), correspondingly. The wear rate W was calculated by formula:

$$W = \Delta V / \tau, \quad (1)$$

where ΔV – friction track volume, measured on profilometer; τ - wear time.

To analyze the friction mechanism on wear tracks the field emission microscope JSM-6700F was used.

Results and discussion

Time dependence of K_f for $\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.5\% \text{G}$ is presented in Fig.1. It is visible, there is the friction coefficient increase from 0.15 till 0.42 and the subsequent stabilization of process. Jumps of K_f , probably,



Fig. 1. Time dependence of K_f , $\text{Al}_2\text{O}_3 + 0.5\% \text{G}$.

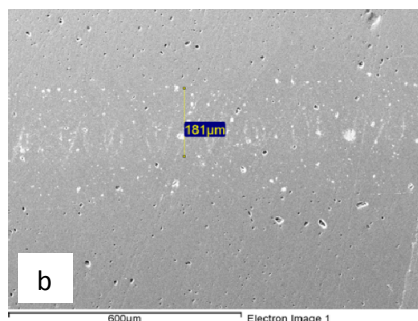
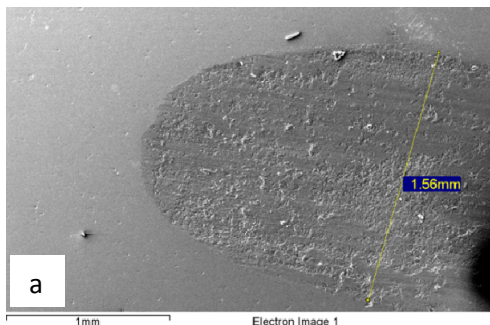


Fig. 2. View of the wear track in SEM on the sample: a – without graphene, b – with graphene of 1%.

are connected with accumulation and chipping of wear particles. In tabl. 1 the data on K_f and wear rate at the various graphene content in the ceramic nanocomposite are presented. Values K_f at both motion kinds are close each other and are in an interval 0.42-0.58. However the tendency to decrease in the friction coefficient is clearly visible at circular movement for the sample with 0.5 % graphene. The analysis of the material indenter surface after tests has shown that WC and corundum materials have been subject to the greatest wear in comparison to ruby indenter.

Therefore the ruby material and reciprocating motion have been chosen as the basic parameters for wear tests. Data from tabl.1 testify the wear rate for the samples with graphene decreases for two-three orders in comparison with samples without graphene, received by SPS, and experimental HIP results. This result is supported by the electron microscopic research of wear tracks. The width of a wear track on the sample with 1 % graphene (fig. 2b) is much less in comparison with the sample without graphene (fig. 2a)..

Table 1. Friction coefficient and wear rate in nanocomposite.

Graphene, %	K_f		$W \cdot 10^{-3}$, mm^3/hour
	circular motion	Reciprocating motion	Reciprocating motion
0 (HIP)	0.51	-	400
0	0.55	0.54	22
0.5	0.42	-	-
1.0	0.51	0.47	0.12
2.0	0.52	0.58	0.34

Note. HIP – hot isostatic pressing

Summary

The graphene adds up to 2 % to the nanoceramic composite allows to reduce wear by 2-3 orders, thus friction coefficient, poorly varying, can reach the minimal value $K_f = 0.42$.

Acknowledgements The work was performed by support RNF, project № 16-19-10213

[1] Gutierrez-Gonzalez C.F., Smirnov A., Centenoc A., et al, Wear behavior of graphene/alumina composite, Ceramics International 41 (2015) 7434–7.

ДЕФОРМАЦИОННО-АДГЕЗИОННАЯ МОДЕЛЬ ИЗНАШИВАНИЯ НА УРОВНЕ СУБШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ

¹Суслов А.Г., ²Шалыгин М.Г. (migshalygin@ya.ru)

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия;

²Брянский государственный технический университет, Брянск, Россия.

Рассмотрено взаимодействие поверхностей на уровне наношероховатости. Приведена модель для определения упругой и пластической составляющей деформационного износа, а также при срезе на уровне субшероховатости поверхности. Приведена модель расчета адгезионного износа на уровне субшероховатости поверхности.

Ключевые слова: упругие деформации; пластические деформации; срез; адгезия; субшероховатость.

В соответствии с деформационно-адгезионной теорией трения износ поверхностей трения определяется совокупностью изношенных объемов в следствии усталостного изнашивания и молекулярных вырывов частей тел в следствии адгезии поверхностей. Существующие методики оценки интенсивности изнашивания трущихся поверхностей, зачастую, не учитывают наличие на поверхностях субмикронеровностей (наношероховатости), размеры которых по высоте не превышают 100 нм. В работах [1,2] показано, что наношероховатость коррелирует с зернистостью материала и не зависит от вида механической обработки. При исследовании наношероховатости с точки зрения зернистости материала в первую очередь следует учитывать его микроструктуру.

Примем, что в рамках приводимой теории основной вклад в изнашивание материалов вносит усталостное изнашивание в то время, как адгезионное изнашивание является сопутствующим ему (рис. 1).

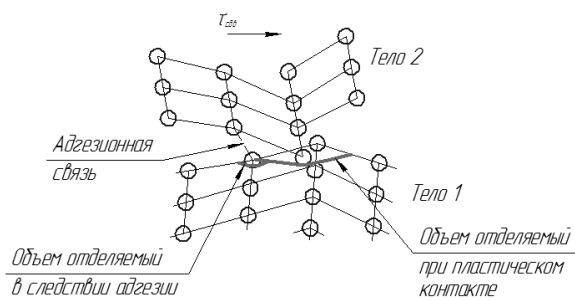


Рис. 1. Объемы, отделяемые при изнашивании.

Интенсивность изнашивания в таком случае, в первом приближении, можно определить как сумму деформационной и адгезионной составляющих

$$I_{d.m} = I_d + I_m.$$

Предположим, что в процессе трения под действием избыточных давлений пленки окислов разрушаются и происходит непосредственный контакт трущихся материалов. Микроструктурой закаленной стали является мартенсит с включениями карбидов и остаточного аустенита (не более 10 %).

Очевидно, что в процессе трения и изнашивания будет меняться характер контактного взаимодействия поверхностей. После многократных

смещений и повторных приложений нагрузки все большая часть неровностей будет деформироваться упруго и все меньшая их часть будет иметь пластический характер деформаций. Многократное приложение нормальных и касательных нагрузок приводит к усталостному разрушению и образованию новых неровностей. Следовательно, можно сделать вывод, что непрерывное образование новых неровностей при изнашивании поверхностей вызывает упругие, пластические деформации или же срез вновь образовавшихся выступов, что также будет происходить и на уровне наношероховатости материала. Таким образом, при расчетах на трение и износ контактирующих поверхностей будут возникать как пластические, так и упругие деформации, а в некоторых случаях будет иметь место микрорезание выступов наношероховатости.

Деформационную составляющую изнашивания определяется как сумма износа в следствии упругого, пластического взаимодействия, а также среза [3,4].

Число взаимодействий наношероховатости поверхности с контртелом можно определить как отношение среднего распределение зерен мартенсита на поверхности детали и относительное сближение трущихся поверхностей. Размер зерен (игл) мартенсита никогда не превосходит исходного зерна аустенита. Среднее распределение зерен мартенсита на поверхности в первом приближении можно рассчитать как отношение числа зерен мартенсита на площади зерна аустенита к этой площади.

Относительное сближение определим как отношение абсолютного сближения на наибольший выступ наношероховатости (зерна). Абсолютное сближение будет равным разности наибольшего выступа наношероховатости и глубины внедрения выступа в контртело. При этом, на практике, наибольший выступ наношероховатости не будет превышать наибольшего размера кристалла мартенсита. В связи с тем, что кристалл (зерно) имеет тетрагональную объемно-центрированную сингонию, наибольший размер зерна мартенсита будет меньше или равен диагонали кристалла. Тогда абсолютное сближение определяется как разность диагонали кристалла и глубины внедрения выступа наношероховатости в контртело.

С учетом допущения, что субмикронеровности контактирует с абсолютно гладким телом объ-

ем фактически деформируемого материала при пластической деформации

$$V_{\phi,пл} = \pi \frac{\tau_{сдв} a b h_{вн.пл}^2}{4\sigma_{сп} R_p^2} \left(2R_p - \frac{h_{вн.пл}}{3}\right),$$

при упругой деформации

$$V_{\phi,упр} = \pi \frac{\sigma_n a b h_{вн.упр}^2}{4\sigma_{сп} R_p^2} \left(2R_p - \frac{h_{вн.упр}}{3}\right),$$

где σ_n - нормальная нагрузка, МПа; a , b - наименьший и наибольший диаметры пятна контакта наношероховатости с контртелом, мкм; R_p - максимальная высота неровностей наношероховатости, мкм.

Так как при микрорезании число циклов до разрушения равно единицы, то объем деформируемого материала будет зависеть только от геометрии поверхности и от глубины внедрения наношероховатости в контртело

$$V_{\phi,сп} = \pi \frac{a b h_{вн.сп}^2}{4R_p^2} \left(2R_p - \frac{h_{вн.сп}}{3}\right).$$

Адгезионное взаимодействие является сложной функцией потенциальной и поверхностной энергий, геометрии тел, расстояния осуществления адгезии, сил притяжения и отталкивания тела и контртела. На границе двух фаз находятся некомпенсированные связи, которые направлены в сторону менее плотной среды. Эти связи испытывают избыточное силовое воздействие со стороны частиц твердого тела, которое стремится втянуть частицы поверхностного слоя внутрь более плотной среды. В общем случае силу адгезии можно описать как функцию зависимости сил притяжения и отталкивания некомпенсированных связей тела и контртела.

Адгезионный износ осуществим в случае когда сила взаимодействия молекул контртела больше силы адгезионного взаимодействия и силы взаимодействия молекул тела. Приведенное условие [5] по своей сути является необходимым условием осуществление адгезионного износа тела или контртела.

Адгезионный износ в первом приближении можно определить как износ осуществляемый под действием напряжения сдвига на поверхности характеризуемой геометрией отнесенное к параметру характеризующему условие осуществление адгезионного износа на число этих параметров. Тогда адгезионная составляющая износа имеет вид

$$m = \frac{\tau_{сдв} \chi_a}{(F_{вз} - k_m F_{вз.м.м}) n_{адз}}.$$

где $\tau_{сдв}$ - напряжение сдвига; $n_{адз}$ - число адгезионных связей; χ_a - параметр, характеризующий геометрию адгезионного вырыва.

Так как адгезия осуществляется на некотором, пусть и минимальном, расстоянии между взаимодействующими телами можно допустить, что число адгезионных связей не зависит от фактической площади касания, а зависит от номинальной площади.

Параметр χ_a является функцией внутренней энергии тела, напряжения сдвига, и параметров нано геометрии поверхности в роли которой может выступать наношероховатость. Следует заметить, что если адгезионный износ происходит близко к границе зерна или месту скопления дислокаций, тогда определение параметра χ_a представляет трудно решаемую задачу, так как в таком случае потребуется учесть координаты и глубину залегания дефекта.

Учитывая, что для возникновения адгезионной связи предпочтительно, чтобы деформация была пластической [6], и известно, что при пластической деформации дислокации перемещаются к краю зерна, тогда в начальный момент трения адгезионный износ будет больше, чем при установившемся режиме, так как распределение дислокаций по зерну будет носить случайный характер.

Таким образом, представляется возможным определить изнашивание мартенситных сталей на наноуровне, с учетом геометрии наношероховатости, упругой и пластической деформации, а также среза. При этом все данные необходимые для проведения расчета можно получить существующими, широко применяющимися методами.

[1] Сулов А.Г., Шалыгин М.Г., Кузнецов С.В. Исследование поверхностей с различной механической обработкой на уровне субшероховатости // Научно-технические технологии в машиностроении. — 2015, № 9, 45—47.

[2] Сулов А.Г., Порошин В.В., Шалыгин М.Г., Кузнецов С.В. Взаимосвязь нанонеровностей (субшероховатости поверхности деталей и зернистости материала) // Научно-технические технологии в машиностроении. — 2015, № 11, 3—7.

[3] Сулов А.Г., Богомолов Д.Ю., Шалыгин М.Г. Усталостное изнашивание поверхностей трения на уровне субшероховатости // Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2015, №4, 7—10.

[4] Шалыгин, М.Г. Усталостное изнашивание поверхностей трения на уровне субшероховатости поверхности // Материалы Международной научно-технической конференции "Тенденции развития техники и технологий 2015" (17-19 февраля 2015г., г. Тверь). — Тверь: НДМ, 2015, 95—99.

[5] Сулов А.Г., Порошин В.В., Шалыгин М.Г. Адгезионный износ поверхности трения на уровне субшероховатости // Трение и смазка в машинах и механизмах. — 2015, №7, 29-31.

[6] Крагельский И.В. Трение и износ. — М.: Машиностроение. — 1968

ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТА, ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЙ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ОКБ СУХОГО

Титов В.В. (89166781267@mail.ru)

ОКБ Сухого, Москва, Россия.

Существующие нормы и показатели определения триботехнических характеристик конструкционных, смазочных материалов и покрытий сильно устарели, что сдерживает применение известных и разработку новых материалов. Испытаниями по специальной методике установлено влияние состава и свойств смазочного материала на несущую способность подшипника скольжения при качательном движении и тяжело нагруженном контакте. Требуется введение новых показателей антифрикционных свойств конструкционных и смазочных материалов и коррекция существующих норм.

Ключевые слова: нормы, методы испытаний, предельная несущая способность, эквивалентные напряжения, силы трения, деформация.

Задачи снижения веса и соответствующий рост удельных нагрузок в конструкции современных трибосопряжений летательных аппаратов (ЛА) выявили проблемы и «узкие места». Прочностные свойства существующих конструкционных и антифрикционных смазочных материалов (покрытий) практически исчерпали возможность дальнейшего повышения давлений. Для перспективных разработок ЛА требуются новые материалы и методы определения служебных свойств.

Стандартные методы испытаний смазочных материалов на ЧШМ не соответствуют современным требованиям и не позволяют обоснованно применять материалы, определять нагрузочные факторы, требования по обслуживанию трибосопряжений в эксплуатации. Результаты испытаний на ЧШМ малоинформативны, не имитируют ни одного современного механизма, а получаемые данные не совпадают с результатами стендовых испытаний натуральных подшипников, что приводит к появлению сомнительных рекомендаций и ошибочному применению материалов. Весь спектр сложных трибологических процессов, происходящих на рабочих поверхностях тяжело нагруженных трибосопряжений ЛА, может быть воспроизведен только в условиях реального, полноразмерного подшипника при стендовых испытаниях.

Допустимые давления на контакте по литературным источникам весьма различны. В общем машиностроении эксплуатационные номинальные давления на контакте не превышают $(0.1 \div 0.2) \sigma_T$ менее прочного материала пары трения, что обеспечивает существенный запас прочности.

В авиации, для самолётов гражданского назначения, действуют требования Авиационных правил [1]. На основе [2] (1954 год) в ОКБ Сухого действуют нормы ТМ-5 [3] (1958 год), переизданные без изменений в части шарнирных соединений в 1996 году. В [4,5] допустимые давления значительно меньше, чем в [2,3]. Такое разнообразие норм свидетельствует об отсутствии единого подхода, что на практике приводит к ошибочным решениям и отказам. Кроме различия в нормах, имеется главный недостаток: антифрикционные свой-

ства конструкционных материалов не учитываются, а смазочные материалы даже не упоминаются.

Испытаниями, проведенными в ОКБ Сухого в 80-х 90-х годах, доказано, что предельная несущая способность подшипника скольжения в основном зависит от прочностных характеристик менее прочного элемента трибосопряжения, но влияние смазочного материала также весьма существенно. Материал с более низкими прочностными характеристиками может обладать большей несущей способностью при оптимальном применении смазочного материала. В таблице 1 приведены предельные уровни давлений по нормам [1–5], а также полученные по результатам испытаний различных сочетаний материалов [6]. Сравнение результатов испытаний и действующих норм позволяет сделать выводы (см. таблицу 1):

- несущая способность подшипника скольжения определяется не только прочностными свойствами, но и свойствами смазочного материала, типом и качеством покрытий, технологией обработки поверхностей, периодичностью замены смазочного материала;
- при трении и при статическом нагружении предельно допустимые номинальные давления (P_a) в подшипнике скольжения не должны превышать предел текучести (σ_T);
- действующие нормы не подтверждаются результатами испытаний.
- требуется разработка новых норм, учитывающих сложные процессы взаимодействия конструкционных и смазочных материалов, покрытий, влияющих на несущую способность.

В результате испытаний определены предельные давления на контакте, учитывающие и прочностные свойства конструкционных материалов и одновременно антифрикционные – смазочных материалов. Испытано 44 сочетания различных конструкционных и смазочных материалов при трении и 19 сочетаний при статическом нагружении. Методика испытаний и результаты подробно изложены в [6].

Таблица 1. Предельные уровни давлений по литературным источникам и по результатам испытаний.

Тип соединения	Авиационные Правила [1]	М.Ф.Астахов [2]	ТМ-5 [3]	И.П.Сухарев [4]	МУ 1.1.229-90 [5]	Результаты испытаний [6] Во всех испытаниях ось – 30ХГСН2А + ХТВ
Неразъемные, неподвижные	Пункт 657(а): 0,15 σ_T ; Пункт 693: жесткие тяги СУ 0,3 σ_T ; Тросы СУ 0,5 σ_T	1,3 σ_B	1,3 σ_B	0,57÷0,78 σ_T	0,37÷0,53 σ_T	СТАТИКА Бронзы: (0,42÷0,8) σ_T
Разъемные, неподвижные						1,0 σ_B
Разъемные малоподвижные до ±5°		0,65 σ_B	0,65 σ_B			ТРЕНИЕ Бронзы: (0,26÷0,71) σ_T АК-4: (0,17÷0,22) σ_T
Малоподвижные, больше ±5°		0,2 σ_B	0,32 σ_B			30ХГСА; ВТ-20; 12Х18Н10Т Не работоспособны
Подвижные, Система управления		0,2 σ_B				

Деформация при трении испытанных бронз БрАЖМЦ 10–3–1,5 и БрАЖН 10–4–4 фиксировалась при $P_a=50$ МПа, смятие втулки в центральной зоне составляло от 2 до 4 мкм.

Сравнение деформации при трении и при статическом нагружении одинаковых конструктивных и смазочных материалов позволило определить вклад сил трения в деформирование менее прочного элемента трибосопряжения.

При конструировании сила трения, как дополнительный нагружающий (разрушающий) фактор неоправданно игнорируется. По четвертой теории прочности увеличение эквивалентных напряжений от сил трения составляет $1,5\% \pm 6\%$.

По результатам испытаний эквивалентные напряжения на контакте подшипника скольжения для этих бронз со смазочными материалами Атланта, Эра и Свинцоль-01 определяются:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{экв тр}} &= \sqrt{p_a^2 + (100 \div 1230) (\mu \times p_a)^2} = \\ &= p_a \sqrt{1 + (100 \div 1230) \mu^2} \end{aligned}$$

Из этого следует, что вклад сил трения в деформирование втулки в цилиндрическом подшипнике скольжения в 33 ÷ 410 раз больше, чем при расчете по четвертой теории прочности. Разброс значений обусловлен сложным взаимодействием составляющих компонентов конструктивных и смазочных материалов, как при трении, так и при статическом нагружении, а также трибопревращениями при тяжело нагруженном контакте, приспособляемостью и прирабатываемостью поверхностей трения.

Для указанных сочетаний материалов допустимые давления при трении меньше, чем в статике от 1,07 до 3 раз и определяются свойствами смазочного материала. Например, несущая способность БрАЖН 10–4–4 с Эрой при трении всего 90 МПа, а в статике – 270 МПа.

Замена смазочного материала позволяет до 2,7 раза повысить грузоподъемность подшипника в условиях трения, при статическом нагружении до 1,36 раза.

Существенная роль сил трения не позволяет объединить нормы допустимых давлений для подвижных и неподвижных соединений.

Совершенствование норм и методов триботехнических испытаний позволит определить антифрикционные характеристики различных сочетаний конструктивных и смазочных материалов, повысить качество проектирования, надежность и безотказность трибосопряжений ЛА.

[1] Авиационные правила, часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. Межгосударственный авиационный комитет, редакция 3 с поправками 1-6. 2009 г, ОАО «АВИАИЗДАТ», Москва, ул. Ивана Франко, 48.

[2] Астахов М.Ф., Караваев А.В., Макаров С.Я. и Суздальцев Я.Я. «Справочная книга по расчету самолета на прочность», 708 стр., Оборонгиз 1954г.

[3] ТМ-5 «Справочные материалы по расчету на прочность (предназначены в помощь конструкторам и содержат наиболее употребительные и современные данные по расчету на прочность) 1953/1958 г., п/я 2325 КБ; 1996г. ОКБ Сухого.

[4] Сухарев И.П. Прочность шарнирных узлов машин. Справочное пособие. М., «Машиностроение», 1977. 168 с.

[5] Методические указания. МУ 1.1.229-90 Характеристики триботехнические узлов трения летательных аппаратов (на 17 страницах) 1990г. НИИСУ. Москва.

[6] «Силы трения и пластическое деформирование подшипника скольжения самолета.» Титов В.В. «Техника воздушного флота», № 3, 2012г., «Трение и износ», том 33 № 6, ноябрь – декабрь 2012г.

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СМАЗОЧНО-РАЗМОЛЬНЫХ СРЕД НА ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ, МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Топоров Ю.П. (yupt@rambler.ru), Савенко В.И., Клюев В.А., Малкин А.И.

Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, Москва, Россия.

Изучено влияние смазочно-размольных сред, содержащих ПАВ, на характеристики статистических распределений частиц по размерам в композитных порошках, полученных путем механоактивации порошковых смесей Al-2B в планетарной шаровой мельнице. Показано, что использование добавок ПАВ к размольным средам повышает эффективность процесса механоактивации порошковых смесей.

Ключевые слова: смазочная среда, механоактивация, гранулометрия.

Введение. Как известно, частицы порошкового материала при их механоактивации в планетарной шаровой мельнице подвергаются ударным и фрикционным воздействиям. Ранее было экспериментально показано, что для любого типа планетарной мельницы можно подобрать такой режим механического воздействия на порошковые частицы, при котором существенным видом энергопоглощения в порошковой системе является трибодиссипация. В этом случае результат механоактивирующего воздействия на систему будет зависеть от вида технологической смазочной среды, применяемой в механоактивационном процессе. В данной работе исследовалось влияние размольных (смазочных) сред на статистические характеристики функций распределения частиц по размерам для металлических порошковых систем Al-2B при их механоактивации в шаровой планетарной мельнице в режиме трибодиссипации.

Методика и материалы. Механоактивацию порошков осуществляли в лабораторной шаровой мельнице планетарно-центробежного типа АГО-2У. Применялся следующий массо/весовой режим процесса активации: шаровая загрузка включала 100 размольных стальных шаров диаметром 8 мм; масса пробы порошкового материала составляла 10 г. Временная длительность процесса механоактивации порошковых проб во всех случаях составляла 3, 5, 7, 9, 12, 15 и 21 минут. В качестве измельчаемых материалов использовали порошки поликристаллического алюминия марки АСД-4 и аморфного бора марки Б-99В промышленного производства, а также их бинарные смеси стехиометрического состава.

Для приготовления размольно-смазочных сред использовались следующие вещества промышленного изготовления: гексан; кислота олеиновая техническая, парафин нефтяной твердый, скипидар живичный. С их помощью были изготовлены следующие размольные среды: чистый гексан, 2,5% раствор олеиновой кислоты в гексане, 3% раствор парафина в гексане и 3% раствор скипидара в гексане.

Гранулометрический анализ порошковых композитов выполняли при помощи трехлазерного дифрактометрического анализатора высокого раз-

решения Microtrac S3500. Анализ включал построение дифференциальных и интегральных объемно-размерных, поверхностно-размерных и число-размерных функций распределения порошковых частиц по их размерам, а также вычисление статистических характеристик – начальных и центральных моментов соответствующих функций распределений.

Результаты и их обсуждение.

На рис.1 в качестве примера представлены дифференциальное и интегральное распределения относительных объемов частиц композита Al-2B по их размерам. Композит был получен в результате механоактивации в течение 7 минут суспензии, состоявшей из стехиометрической смеси порошков алюминия и бора в гексане.

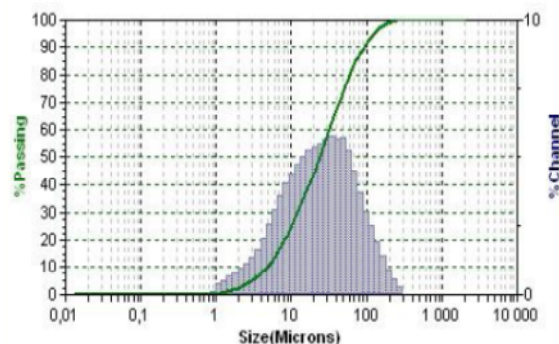


Рис 1. Дифференциальное и интегральное распределения относительных объемов частиц композита Al/B по их размерам. (Механоактивация в течение 7 мин. в чистом гексане).

Анализ вида полученных распределений показывает, что при испытаниях во всех использованных смазочно-размольных средах распределения могут быть аппроксимированы нормально-логаримическими функциями с интервалом значений размеров частиц, занимающих более чем два десятичных порядка величины. При этом функции распределения частиц композита Al/B по размерам при испытаниях в различных смазочных средах оказываются одномодальными.

В таблице в качестве примера представлены основные статистические характеристики функций распределения частиц композита Al/B по размерам, полученных при различных временах механоактивации суспензии порошковой смеси Al-2B в

смазочно-размольной среде чистого гексана. Полученные данные свидетельствуют о том, что с ростом времени механоактивации моменты функций соответствующих распределений (mv , Dia , sd , Ski , Kg), полученных при испытаниях в чистом гептане и других смазочно-размольных средах, содержащих добавки ПАВ, растут, а удельная поверхность Cs частиц композита падает.

Таблица. Временные зависимости основных характеристик статистических распределений порошковой системы А1-2В, механоактивированной в среде гексана

t, min	mv, mkm	Dia, mkm	sd, mkm	Cs, M^2/CM^3	Ski	Kg
0	5,88	4,92	4,45	2,3	0,36	0,96
5	34,2	21,4	28,9	0,62	0,56	1,16
9	36,2	23,3	30,7	0,56	0,54	1,10
15	39,9	29,9	30,0	0,39	0,42	1,11
21	44,6	32,3	31,5	0,34	0,45	1,31

Примечание: в таблице использованы следующие обозначения: mv -среднее объемно-взвешенное значение распределения, Dia - его медиана, sd - среднеквадратичное отклонение, Cs - удельная поверхность частиц, Ski - асимметрия распределения, Kg - его эксцесс.

Детальное сопоставление характеристик статистических функций распределения частиц по их размерам для систем А1-2В, механоактивирован-

ных в 3% растворе парафина в гексане, в 3% растворе скипидара в гексане и в 2,5% растворе олеиновой кислоты в гексане свидетельствует о более интенсивном измельчении порошка в последнем случае. Однако при увеличении времени механоактивации частицы порошковой смеси, механоактивированной в 2,5% растворе олеиновой кислоты в гексане начинают разделяться на фракции. Однако несмотря на разделение на мелкую и крупную фракции, средние размеры частиц возникшего бимодального распределения растут, не достигая состояния стабилизации даже при временах механоактивации порядка 15 - 21 мин. При этом корреляция хода временных зависимостей средних значений размеров частиц и их удельной поверхности при механоактивации порошковой смеси в размольной среде, содержащей олеиновую кислоту, в противоположность их поведению при испытаниях в иных вышеуказанных средах, отсутствует.

Выводы. При механоактивации порошковой смеси А1-2В средние значения размеров частиц композита с ростом времени механоактивации в большинстве случаев увеличиваются, а максимальные значения удельной поверхности композита наблюдаются лишь при минимальных временах процесса механического воздействия на порошковую смесь.

КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ПО ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ПОКРЫТИЯ С ПОДЛОЖКОЙ ПРИ МНОГОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

¹Торская Е.В. (torskaya@mail.ru), ¹Мезрин А.М.

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия.

В работе предложено экспериментально-теоретическое исследование процесса накопления контактно-усталостных повреждений на границе раздела покрытия с подложкой при фрикционном контакте гладкого покрытия с шероховатым контр-телом. Анализируется связь между напряжениями и числом циклов на микро уровне до отслаивания покрытия при различных значениях нагрузки.

Ключевые слова: покрытия, трение, множественный контакт, контактно-усталостное разрушение.

В работе исследуются материалы с покрытиями, полученными методом, который основан на использовании растворов карбоксилатов металлов для получения оксидных материалов непосредственно термодеструкцией плёнообразующих растворов [1]. На поверхности осуществляется формирование наноразмерных слоев аморфных и нанокристаллических фаз (диапазон толщин 70–400 нм).

Проведенные ранее исследования [1] показали, что при трении без смазки происходит хрупкое разрушение и выкрашивание покрытий либо постепенное изнашивание, механизм зависит от приложенной нагрузки и величины коэффициента трения. В то же время при трении со смазкой, обеспечивающей малое значение коэффициента трения, основным механизмом разрушения покры-

тий является отслаивание, которое происходит после многоциклового нагружения. С учетом толщины покрытия многоцикловость контактного нагружения происходит на микро уровне за счет контакта отдельных неровностей. Таким образом, основным механизмом разрушения покрытий в данном случае можно считать процесс накопления контактно-усталостных повреждений на границе раздела покрытия с подложкой.

Для исследования данного механизма ранее было проведено определение механических свойств покрытий, в частности, модуля упругости, по результатам индентирования [1].

Моделирование фрикционного взаимодействия. Для поставленной задачи исследования усталостного характера разрушения покрытия необ-

ходим расчет напряженного состояния, возникающего в покрытиях и на границе раздела с подложкой, с целью выбора диапазона нагрузок, обеспечивающих отсутствие хрупкого разрушения на ранних стадиях испытания (пороговые значения растягивающих-сжимающих напряжений были определены раньше), а также локализацию максимальных значений максимальных касательных напряжений на границе раздела покрытия с подложкой.

Этап моделирования основан на численно-аналитическом методе расчета контактных и внутренних напряжений, возникающих при фрикционном нагружении тел с покрытиями. Метод базируется на использовании интегральных преобразований Ханкеля и Фурье, методе граничных элементов, а также на итерационной процедуре и методе локализации, разработанном И.Г. Горячевой [2] для исследования множественного контактного взаимодействия. Во всех экспериментах коэффициент трения не превышал 0,1. Поэтому для упрощения вычислений трение не учитывалось.

При построении модели контактно-усталостного разрушения поверхности используется макроскопический подход [3], который состоит в построении положительной неубывающей во времени функции $Q(M,t)$, характеризующей меру повреждения материала в точке $M(z)$ и зависящей от амплитудных значений напряжений в данной точке. Для исследования накопления повреждений используется модель линейного суммирования повреждений (в каждый момент времени приращение повреждения не зависит от величины накопленной повреждения). Разрушение наступает в момент времени t^* , когда эта функция достигнет заданного порогового значения.

Условия испытаний. Для моделирования усталостного разрушения покрытий использовалась схема трения «палец-плоскость» с возвратно-поступательным движением. Покрытия наносились на торцы образцов – пальчиков диаметром 6 мм. Контртело было подготовлено с помощью грубого камня с последующей полировкой для получения заданной шероховатости, которая может быть смоделирована периодической структурой (Рис. 1, а). Средняя плотность выступов составила 112 мм^{-1} , их средний радиус – 9 мкм. Амплитуда движения составляла 7,5 мм с частотой 10 Гц.

На первом этапе исследования были выполнены предварительные тесты с различными составами покрытий при одинаковой нагрузке 4 Н. Лучшее сопротивление отслаиванию показали покрытия из оксидов алюминия и циркония в пропорции 6:1. Этот тип покрытия был в дальнейшем использован как основной.

Далее было проведено испытание выбранного покрытия в диапазоне контактных нагрузок от 4 до 15 Н. Испытание длилось до начала разрушения покрытия, которое происходило обычно в центре образца (см. рис. 1б).

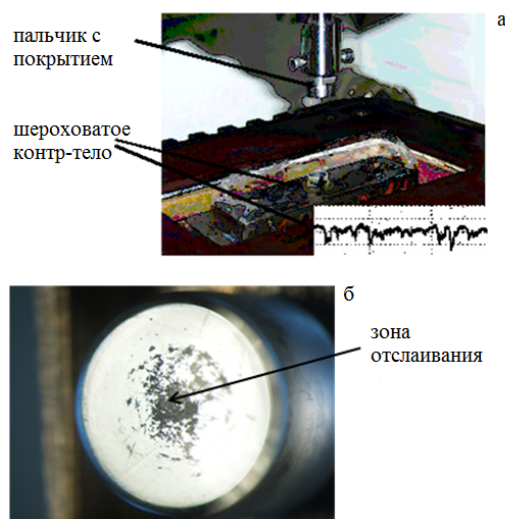


Рис. 1. а) – узел трения и шероховатость контробразца, б) – фотография образца после испытания.

Результаты. Число циклов на микроуровне до разрушения покрытия составило от $35 \cdot 10^7$ (для нагрузки 4 Н) до $1,8 \cdot 10^7$ (для нагрузки 15 Н).

Результаты вычисления максимальных касательных напряжений представлены на Рис. 2. Следует отметить, что максимальные значения напряжений увеличиваются как не только по причине увеличения нагрузки, но также и из за эффекта взаимного влияния, приводящего к уменьшению размера области контакта на микро уровне. Этот же эффект приводит к увеличению минимальных значений напряжений между неровностями и, следовательно, к уменьшению амплитуды напряжений.

На основе расчета амплитуды максимальных касательных напряжений на границе раздела покрытия с подложкой и экспериментальных данных (число циклов до отслаивания при различных значениях нагрузки) были получены феноменологические параметры закона накопления контактно-усталостных повреждений. Точность оценки составила 19%.

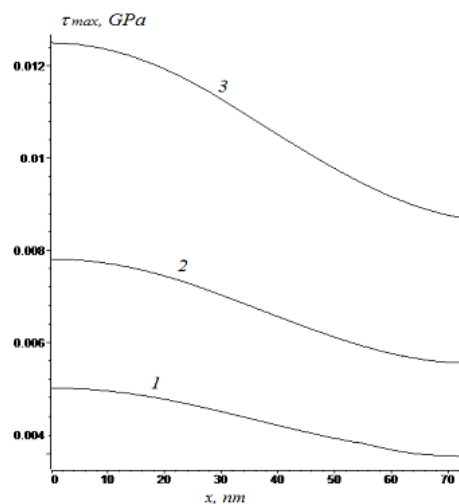


Рис. 2. Максимальные касательные напряжения на границе подложка-покрытие при нагрузке 4 Н, 6 Н, 10 Н (кривые 1-3, соответственно).

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 15-08-06298).

[1] Торская Е.В., Курбаткин И.И., Мезрин А.М., Морозов А.В., Муравьева Т.И., Фролов Н.Н., Сахаров В.В. Механические и трибологические свойства наноструктурированных покрытий

на основе многокомпонентных оксидов. // Трение и износ, 2013, Т. 34, N.2. С. 129-137

[2] Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001 – 478 с.

[3] Goryacheva I.G., Torskaya E.V. Modeling of fatigue wear of a two-layered elastic half-space in contact with periodic system of indenters // Wear, 2010, 286 (11-12), P. 1417-1422

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ТРЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ

¹Торская Е.В. (torskaya@mail.ru), ²Ляховецкий М.А., ³Корнев Ю.В.

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия;

²Московский авиационный институт, Москва, Россия;

³Институт прикладной механики РАН, Москва, Россия.

Работа посвящена теоретико-экспериментальному исследованию механизмов и закономерностей изнашивания и разрушения композиционных керамических покрытий в условиях трения скольжения, моделирующих вибрационную нагрузку в реальных узлах трения, в том числе с малыми амплитудами. На основе решения контактной задачи для тел с покрытиями определены напряжения в покрытии, установлена связь амплитудных значений напряжений с характером разрушения покрытий.

Ключевые слова: микродуговое оксидирование, покрытия, вибрация, трение, индентирование, контактное взаимодействие, напряжения

Сравнительный анализ характеристик покрытий, получаемых методом микродугового оксидирования (МДО) на алюминиевых сплавах, по сравнению с другими методами, и в частности, с широко распространённым в авиационно-космическом производстве анодированием показывает, что МДО покрытия обладают намного лучшими физико-механическими и эксплуатационными характеристиками. Несмотря на относительную простоту и перспективность, технология МДО пока не нашла широкого применения, в частности, и в трибосопряжениях, работающих в экстремальных условиях. Это объясняется тем, что недостаточно изучены процессы, особенности и условия изнашивания и разрушения МДО покрытий в таких условиях эксплуатации, которые характеризуются высокими удельными давлениями на участках контакта при низких скоростях скольжения (до 1 м/с) и вибрациях с частотой до 60 Гц и при относительно малых амплитудах до 0,005 мм, что приводит к схватыванию при вибрационном трении. Данная работа посвящена теоретико-экспериментальному исследованию механизмов и закономерностей изнашивания и разрушения композиционных керамических покрытий, полученных методом МДО, в условиях трения скольжения, моделирующих вибрационную нагрузку в реальных узлах трения, в том числе с малыми и сверхмалыми амплитудами.

Методика и результаты испытаний МДО покрытий. Для испытаний на изнашивание использовались образцы с МДО покрытием из алюминиевого сплава АК4-1 Ø30 мм толщиной 5 мм. Покрытие получали при $j_{нач} = 10 \text{ А/дм}^2$, $T = 25\text{-}28^\circ\text{C}$,

$t = 120 \text{ мин}$. В качестве электролита использовался водный раствор $\text{KOH} = 1 \text{ г/л}$ и технического жидкого стекла $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,9\text{SiO}_2 \cdot 9\text{H}_2\text{O} = 6 \text{ г/л}$. Полученные образцы после проведения процесса МДО промывались в проточной воде и высушивались. Затем поверхность МДО покрытия обрабатывалась на шлифовально-полировальном станке для получения покрытий заданной толщины 50 мкм [1].

Испытания проводились на машине трения (рис.1), позволяющей возбуждать возвратно-поступательное относительное скольжение трущихся тел D в диапазоне 5-500 мкм с частотой $f = 20 \text{ Гц}$, при значениях нормальной силы в контакте $F_n = 25\text{-}150 \text{ Н}$. Использовалась схема сфера/плоскость (5): сферой служил алмаз технической марки ОИ-12-2 (Ø3,7 мм), а плоскостью - образец с МДО покрытием.

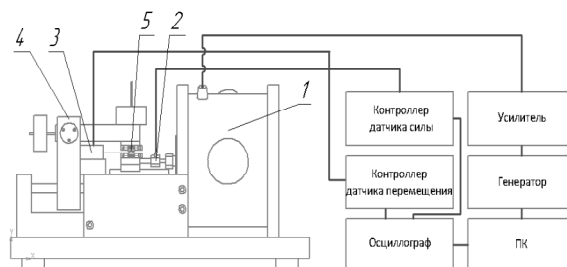


Рис. 1. Машина трения: 1 – электромагнитный вибратор; 2 – датчик силы; 3 – датчик перемещения; 4 – система нагружения; 5 – место контакта образцов.

Проведенные по всему диапазону нагрузок и перемещений испытания показали, что при низком значении коэффициента трения 0.045 разрушение МДО покрытий характеризуется 4 режимами, ко-

торые отличаются как объемом изношенного материала покрытия, так и характером повреждения разрушенной поверхности (рис.2). В первом случае видимый износ покрытия не наблюдается. Увеличение нормальной нагрузки и амплитуды приводит к образованию выглаженной поверхности покрытия (умеренный износ). Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к отслоению поверхностных слоев покрытия и образованию микротрещин (интенсивный износ). После этого наступает этап критического разрушения покрытия, выраженного в его растрескивании до подложки с высокой скоростью (экстремальный износ).

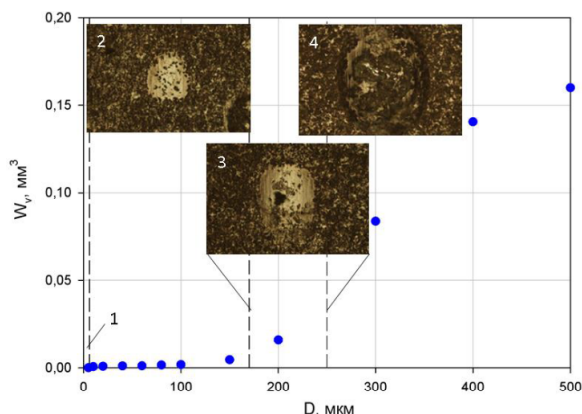


Рис. 2. Зависимость объема изношенного материала покрытия при $F_n = 150\text{Н}$ и различных значениях перемещений D , и изображения пятен износа, полученных в различных областях разрушения МДО покрытия: 1 - без видимого повреждения; 2 - умеренного; 3 - интенсивного и 4 - экстремального износа.

Поскольку увеличение амплитуды возвратно-поступательного скольжения при фиксированной нагрузке сопровождалось переходом к более жесткому режиму разрушения было высказано предположение, что критерием разрушения, приводящего к появлению трещин в покрытии, являются амплитудные значения напряжений, поскольку тепловые эффекты при имевшихся значениях коэффициента трения пренебрежимо малы. Для проверки этого предположения потребовалось определение механических характеристик относительно жесткого керамического покрытия и расчет напряжений, в особенности, их амплитуды при разных значениях приложенной нагрузки.

Механические свойства покрытий определялись путем индентирования. Эксперимент по наноиндентированию образцов с покрытиями проводили с помощью измерительного комплекса NanoTest 600 (MicroMaterialsLtd., Великобритания). В данном эксперименте применялся алмазный конический индентор с углом при вершине 60° и радиусом закругления 10 мкм , обеспечивалось разрешение по нагрузке 60 мкН и по глубине индентирования 0.04 нм . Вдавливание проводилось в режиме контролируемой нагрузки, с преднагрузкой 0.1 мН . Снимались зависимости нагрузка-глубина, на стадиях нагрузки и разгрузки. Разгрузка проводилась с той же скоростью, что и нагрузка. Проводилось 10 экспериментов в раз-

ных точках поверхности. Максимальная нагрузка составляла 50 мкН . Обработка результатов индентирования проводилась с учетом упругой деформации подложки [2]. Было получено значение модуля упругости покрытия 220 ГПа .

Расчет напряженного состояния. Расчет проводился на основе решения контактной задачи для двухслойного упругого полупространства и сферического индентора. При этом предполагалось полное сцепление покрытия с подложкой. Метод решения задачи подробно описан в [3], он основан на использовании интегральных преобразованиях Ханкеля и метода итераций. При этом давление определяется в виде кусочно-постоянной функции и используется затем для определения напряжений в покрытии и подложке. Изолинии распределения растягивающих и сжимающих напряжений, полученные при максимальном значении нагрузки, используемом в эксперименте, 150Н , представлены на рис.3. В покрытии максимумы как растягивающих, так и сжимающих напряжений находятся на поверхности. Расчетное максимальное значение контактного давления составило 4.709 ГПа , а радиус площадки контакта – 123 мкм . Используемые в эксперименте амплитуды, таким образом, менялись от долей размеров площадки контакта до более чем двух диаметров пятна контакта. Амплитуды напряжений на поверхности при увеличении амплитуды скольжения от 5 до 123 мкм увеличиваются от 0.706 ГПа до 2.482 ГПа , что может объяснить появление трещин на поверхности (режим интенсивного изнашивания). При дальнейшем увеличении амплитуды скольжения растут и амплитудные значения в подповерхностных слоях, этим можно объяснить скалывание покрытий.

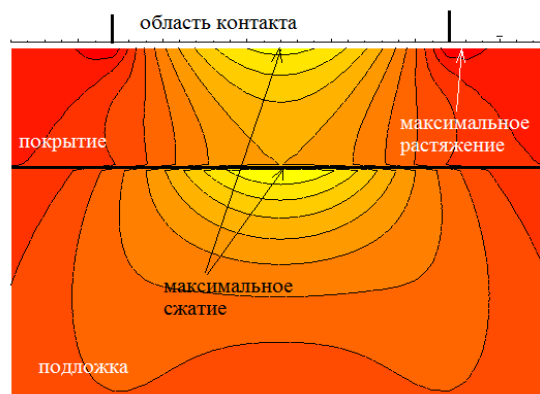


Рис. 3. Распределение растягивающих-сжимающих напряжений в покрытии и подложке при $F_n = 150\text{Н}$.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 16-08-00749).

[1] Горячева И.Г., Мышкин Н.К., Торская Е.В., Корнев Ю.В., Гуцев Д.М., Кудрицкий В.Г. Моделирование фрикционного взаимодействия композиционных покрытий триботехнического назначения, Трение и износ, 2012, т.33, №6, стр. 557-565

[2] Torskaya E.V., Goryacheva I.G. The effect of interface imperfection and external loading on the axisymmetric contact with a coated solid// Wear. 2003. V. 254. № 5-6. P. 538-545

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СМАЗОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ВОЛОЧЕНИЯ ТРУБ ИЗ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ И НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

Тюленев Д.Г., Фазлиахметов Ф.Н.

ХТЦ УАИ, Уфа, Россия.

Представлены результаты исследований, разработки и промышленного опробования технологического смазочного материалов “Росойл-267” на операциях волочения высоколегированных и нержавеющей сталей.

Ключевые слова: волочение труб, вязкость, технологические смазочные материалы (ТСМ), испытания.

Введение

Работа, затрачиваемая на преодоление сил трения при волочении, может составлять 60-80 % общей работы деформации. Увеличение величины работы при волочении отрицательно влияет на условия эксплуатации волочильных машин. Энергия, затрачиваемая на преодоление трения, переходит в тепловую энергию, в результате чего повышается температура волокна и самого изделия. Нагрев приводит к повышенному износу волокон и погрешностям в геометрии детали.

Для уменьшения сил трения в зону деформации вводят различные технологические смазочные материалы. К ТСМ при волочении предъявляются особые требования, вытекающие из условий деформации в волокне. ТСМ должны обладать большой поверхностной активностью и определенной вязкостью. Сила сцепления смазки с поверхностью металла должна быть такой, чтобы она проникала в зону деформации, а величина вязкости должна обеспечивать максимальное разделение трущихся поверхностей. Чем больше поверхностная активность смазки, тем больше проникает ее в зону деформации, а чем больше вязкость смазки, тем меньше её выдавится из очага деформации в процессе волочения.

Результатом неудовлетворительной смазки в очаге деформации при волочении является образование задиров и риск на поверхности изделия, вследствие схватывания материала заготовки с инструментом.

Процесс волочения труб из нержавеющей и высоколегированных сталей, характеризуется высокими удельными давлениями и значительным тепловыделением в зоне деформации металла из-за высокой адгезионной активности данного класса материалов, что обуславливает налипание обрабатываемого металла на инструмент и приводит к появлению на поверхности риск, задиров и повышенному износу волочильного инструмента. При этом, процесс волочения происходит с вибрациями и задымлением смазки (вследствие чрезмерного разогрева в очаге деформации) и, в конечном итоге, может привести к разрыву трубы.

Выбор технологического смазочного материала для операции волочения труб зависит от многих факторов, таких как скорость волочения, материала и размера деформируемой заготовки, условия подачи ТСМ в зону деформирования, гео-

метрии волокна, наличие и вид подсмазочного покрытия, и т.д. [1,2].

Цель данной работы – представление результатов лабораторных исследований и промышленного опробования технологических смазочных материалов предназначенных для операций волочения труб из высоколегированных и нержавеющей сталей на ОАО “Первоуральский новотрубный завод” и ОАО “Уралтрубмаш”.

Результаты лабораторных испытаний

В 2012 году проводятся опытно - промышленные испытания технологической смазки “Росойл-167” на ОАО “Первоуральский новотрубный завод”. В ходе испытаний было установлено, что смазка “Росойл-167” обеспечивает стабильность процесса волочения на станах линейного типа, однако при термообработке протянутых труб (с остатками смазки) в печах с защитной атмосферой было зафиксировано образование сажистого налета на наружной поверхности труб. Это противоречит требованиям НТД на изготавливаемые трубы, осложняет осмотр и сдачу труб, требует проведения дополнительной операции - шлифования наружной поверхности труб.

Учитывая эти требования технологии производства труб, разрабатывается новый ТСМ “Росойл-267”. Лабораторные исследования проводили в трибологической лаборатории НИИ «ТиС». При разработке этого состава особое внимание было уделено комплексу температурно-вязкостных, адгезионных, противозадирных, противоизносных и антифрикционных свойств.

Для оценки эффективности разработанного ТСМ проводили лабораторные испытания при волочении прутков из стали 12Х18Н10Т. Экспериментальные зависимости «сила волочения-перемещение траверсы» при относительной степени деформации 10% и скорости волочения 500мм/мин показаны на рисунке 1.

По результатам проведенных лабораторных исследований, очевидно, что ТСМ должен обладать не только достаточно высокими трибологическими свойствами, но и иметь оптимальные вязкостные характеристики, которые обеспечивают снижение энергосиловых параметров волочения.

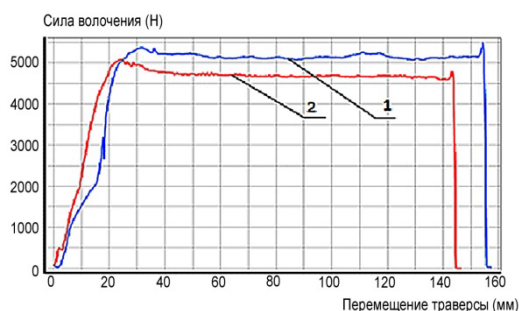


Рис. 1. Экспериментальные зависимости «сила волочения-перемещение траверсы» для ТСМ: 1-Росойл-167; 2-Росойл-267 (каждый график есть среднее арифметическое из 5 испытаний).

Результаты опытно-промышленных испытаний

В 2013 году были проведены опытно-промышленные испытания ТСМ “Росойл-267” при безоправочном волочении труб. Смазка подавалась в очаг деформации поливом в режиме циркуляции. Процесс волочения протекал стабильно, в ходе всего периода испытаний не наблюдалось налипания металла на инструмент, риск, задигов на протянутых трубах. Всего за период испытаний было протянуто 36318,5 м труб различных типоразмеров из сталей 20А, 10,30ХГСА, 12Х2НВФА.

После термообработки протянутых труб с остатками экспериментальной смазки было отмечено, что поверхность труб светлая однородная, без сажистого налета. Таким образом, состав технологической смазки “Росойл-267” удовлетворяет требованиям производства труб на ОАО “Первоуральский новотрубный завод”.

ТСМ “Росойл-267” прошёл опытно-промышленные испытания на ОАО “Уралтруб-

маш” при безоправочном волочении различных типоразмеров труб из стали 12Х18Н10Т по разным схемам волочения.

В настоящее время освоено серийное производство ТСМ “Росойл-267” по ТУ 0258 - 097-06377289-2013 на «Опытном заводе смазок и оборудования» г. Уфа и организованы поставки разработанной композиции на ОАО “Уралтрубмаш” и ОАО “Первоуральский новотрубный завод”.

Выводы

1. Лабораторные исследования и опытно-промышленные испытания ТСМ “Росойл-267” для процесса волочения труб из высоколегированных сталей показывают, что качество поверхности труб соответствует требованиям технологии, процесс волочения протекал стабильно без вибраций, задигов и налипания металла труб на инструмент.
2. Освоена технология производства и организованы серийные поставки разработанного ТСМ на трубные заводы уральского региона России.

[1] Пасечник М.С. Теоретические основы разработки смазок для обработки металлов давлением // Технологические смазки / Тезисы докладов Республиканской научно-технической конференции. Выпуск 2. Киев, 1971. С. 5-16.

[2] Манохина Н.В. Совершенствование оборудования, инструмента и технологических средств для волочения высококачественных прямошовных труб. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.13- «Машины, агрегаты и процессы (металлургия)», Москва, 2002г., 163с.

[3] Абрамов А.Н., Шолом В.Ю., Семенов В.И., Шустер Л.Ш. Оценка трибологических параметров контакта технологических смазочных материалов для металлообработки // Технология машиностроения, 2003г., №6, с.45-50.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В НАНО- И МИКРОШКАЛЕ

Тюрин А.И. (tyurin@tsu.tmb.ru), Пирожкова Т.С.

НОЦ «Нанотехнологии и наноматериалы» ТГУ имени Г.Р. Державина, Тамбов, Россия.

В работе исследованы трибологические и прочностные свойства твердых тел в нано- и микрошкале. Для широкого класса материалов (керамики, ковалентные и ионные монокристаллы, металлы и металлические сплавы, полимеры) выявлена кинетика процессов трения в микро- и нанощкале, определены числовые значения коэффициентов трения и установлены их зависимости от величины нормальной нагрузки.

Ключевые слова: локальные физико-механические свойства, коэффициент трения в микрошкале, коэффициент трения в нанощкале, наноиндентирование.

Трение является одним из неотъемлемых процессов сопровождающих взаимодействие твердых тел, различных сопрягаемых деталей и механизмов. При этом, несмотря на огромный опыт и большое количество публикаций по вопросам трения [1–6], до сих пор остаются дискуссионными вопросы связанные с изучением процессов трения

и поведением коэффициента трения в микро- и нанощкале [1–4].

Это обусловлено тем, что несмотря на понимание того, что взаимодействие сопрягающихся поверхностей твердых тел при сухом трении всегда происходит на микро- и наноуровне, путем множественных локальных быстротечных контактов возникающих на неровностях с характерными

размерами достигающими сотен и даже десятков нанометров, до сих пор отсутствуют достаточно хорошо разработанные и аттестованные методики и оборудование, способного исследовать и характеризовать эти контакты. При этом прямые исследования крайне затруднительны и/или практически невозможны.

Однако смоделировать условия эксплуатации различных конструкций в максимально контролируемых условиях возможно методами динамического микро- и наноиндентирования [3, 7–10], путем прикладывания к индентору одновременно латеральной и нормальной нагрузок (см. рис. 1).

Поэтому целью работы явилось смоделировать и изучить трибологические процессы, возникающие на микро- и наноуровне, а также исследовать локальные трибологические и прочностные свойства твердых тел в нано- и микрошкале.

Исследования выполнялись на приборе Triboindenter Ti-950 (Hysitron, USA) и комбинированном динамическом трибонаноиндентометре собственной разработки [7 – 10]. Непрерывная регистрация только нормальной составляющей силы – F_N и смещения (глубины внедрения – h_N) или одновременная регистрация нормальной и латеральной составляющих сил (F_N и F_L) и смещений (h_N и h_L) реализуемых при воспроизведении трибоконтатов индентором и дальнейший анализ регистрируемых данных позволяет моделировать процессы трения и износа, а также определять локальные физико-механические (твердость – H , модуль Юнга – E , вязкость разрушения – K_C и др.) и трибологические (коэффициенты трения $k_{тр} = F_L/F_N$ и износа) свойства.

В качестве объектов исследования был выбран ряд практически важных материалов – керамика (высокопрочная наноструктурированная TZP керамика на основе бадделеита – природного диоксида циркония), полимеры (ПТФЭ, ПММА) ионные и ковалентные монокристаллы (LiF, Si, Ge), металлы и металлические сплавы (Al, сталь 3) для которых в литературе практически отсутствуют данные по масштабной зависимости коэффициента трения, особенно в микро- и нанощкале.

В качестве индентора применялся сферический индентор ($R = 310$ мкм) выполненный из высокопрочной наноструктурированной TZP керамики на основе бадделеита.

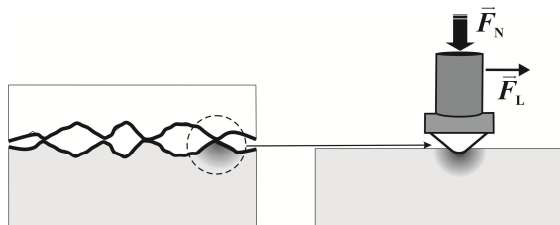


Рис. 1. Схематическое изображение трибологического контакта при взаимодействии двух шероховатых тел и при индентировании.

Полученные зависимости локальный коэффициент трения от величины нормальной нагрузки для ряда исследованных материалов приведе-

ны на рис. 2. Их анализ показывает, что зависимости $k_{тр} = f(F_N)$ с ростом F_N вначале достаточно быстро падают, а затем начинают расти, т.е. имеют характерный минимум, соответствующий некоторому оптимальному значению нормальной силы F_{Nopt} .

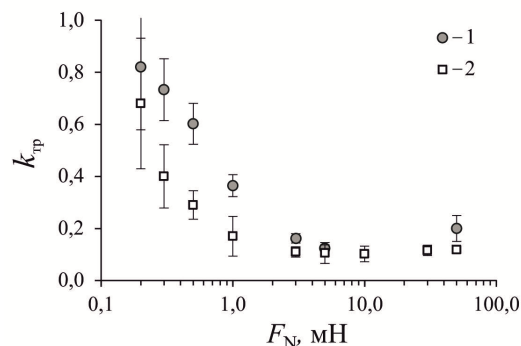


Рис. 2. Экспериментальная зависимость коэффициента трения $k_{тр}$ от величины нормальной нагрузки F_N для исследованных пар трения: TZP керамика – фторопласт (1), TZP керамика – Ge (2).

Такой ход полученных экспериментальных зависимостей $k_{тр} = f(F_N)$ хорошо согласуется с ходом теоретической зависимости коэффициента трения от нормальной нагрузки полученной на основе молекулярно-механической теории трения, развитой Ф.Боуденом, Д.Тейбором, Б.В.Дерягиным и др. [2, 4, 5]. В ней трение рассматривается как дискретный процесс, происходящий в отдельных пятнах локальных контактов взаимодействующих тел (см. рис. 1.) и разбивается на деформационную и молекулярную составляющую. При этом с ростом F_N деформационная составляющая трения растет, а молекулярная – падает. Это приводит к характерному виду теоретической зависимости $k_{тр} = f(F_N)$, которая вначале падает, а затем растет с ростом F_N , имея характерный минимум.

Таким образом в работе для широкого класса материалов (керамики, ковалентные и ионные монокристаллы, металлы и металлические сплавы, полимеры) смоделированы процессы, возникающие при трении и износе на микро- и наноуровне, исследованы трибологические и прочностные свойства твердых тел в нано- и микрошкале. Определены числовые значения коэффициентов трения, установлены их зависимости от величины нормальной нагрузки и показано хорошее качественное соответствие хода теоретических и экспериментальных зависимостей коэффициента трения от величины нормальной нагрузки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (номер проекта 16-19-10405).

- [1] Fundamentals of Friction and Wear on the Nanoscale / Editor E. Gnecco, E. Meyer. Springer – 2015
- [2] Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ: физические основы и технические приложения трибологии. – М.: ФИЗМАТЛИТ – 2007
- [3] Bhushan B. Introduction to tribology. – John Wiley & Sons, Ltd.

New York – 2013

[4] Дедков Г. В. Нанотрибология: экспериментальные факты и теоретические модели // Успехи физических наук. – 2000, (170), № 6, 585–618

[5] Боуден Ф.П., Тейбор Д. Трение и смазка твердых тел. – М.: Машиностроение – 1968.

[6] Vuja F. et al. Observation of nanoscale adhesion, friction and wear between ALD Al₂O₃ coated silicon MEMS sidewalls // Nanotechnology. – 2015 (26) No 25, 255701.

[7] Головин Ю.И. Наноиндентирование и его возможности, М.: Машиностроение – 2009

[8] Головин Ю.И., Тюрин А.И., Хлебников В.В. Влияние режимов динамического наноиндентирования на коэффициент скоростной чувствительности твердости тел различной структуры

// Журнал технической физики. – 2005 (75) № 4, 91–95.

[9] Ivanova A. A., Surmeneva M.A., Tyurin A.I., Pirozhkova T.S., Shuvarin I.A., Prymak O., Epple M., Chaikind M.V., Surmenev R.A. Fabrication and physico-mechanical properties of thin magnetron sputter deposited silver-containing hydroxyapatite films // Applied Surface Science. – 2016 (360), 929–935

[10] Surmeneva M.A., Mukhametkaliyev T.M., Surmenev R.A., Tyurin A.I., Pirozhkova T.S., Shuvarin I.A., Shuklinov A.V., Zhigachev A.O., Teresov A.D., Koval N.N., Oehr C. Effect of silicate doping on the structure and mechanical properties of thin nanostructured rf magnetron sputter-deposited hydroxyapatite films // Surface and Coatings Technology. – 2015 (275), 176–184

ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА РЕШЕНИЙ ОДНОЙ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ СМАЗКИ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ

Усов П.П. (usovp@mail.ru)

Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Россия.

Рассматривается внешний смазываемый контакт упругих цилиндров, поверхностные слои которых проявляют вязкоупругие свойства. Показано, что деформации тел могут увеличить толщину смазочного слоя многократно, рост вязкости с ростом давления приводит ко второму пику давления, а вязкоупругие свойства поверхностных слоев подавляют второй пик давления.

Ключевые слова: вязкоупругость, смазка, контакт деформируемых тел.

В настоящее время расчет смазываемых узлов трения основан на решении задач упруго гидродинамической (УГД) теории смазки, которая рассматривает течение тонкого слоя смазочного материала между поверхностями упругих тел.

Однако в действительности механические свойства поверхностных слоев контактирующих тел отличны от свойств основного материала и зависят от скорости относительных перемещений взаимодействующих тел. В связи с этим возникает необходимость исследования влияния несовершенной упругости контактирующих тел на характеристики смазочного слоя, разделяющего их.

В работах [1-3] рассматривалось влияние вязкоупругости поверхностных слоев контактирующих тел на характеристики разделяющего их смазочного слоя. В данной работе приведен ряд новых свойств решения задачи теории смазки деформируемых тел, применительно к контакту упругих цилиндров, поверхностные слои которых проявляют вязкоупругие свойства.

Рассмотрена задача о стационарном контакте вращающихся упругих цилиндров, покрытых тонкими слоями из вязкоупругого материала и разделенных тонким слоем вязкой жидкости. В качестве реологической модели вязкоупругих слоев принята одномерная модель Кельвина [3].

В безразмерных переменных, определяемых по формулам

$$\bar{p} = \frac{p}{p_g}, \quad \bar{x} = \frac{x}{b}, \quad \bar{h} = \frac{2Rh}{b^2}, \quad \bar{\rho} = \frac{\rho}{\rho_0}, \quad \bar{\mu} = \frac{\mu}{\mu_0}$$

основные уравнения задачи имеют вид

$$-\bar{\rho} \frac{\bar{h}^3}{\eta} \frac{d\bar{p}}{d\bar{x}} + V \bar{\rho} \bar{h} = V \bar{H}$$

$$\bar{h}(\bar{x}) = H + \bar{x}^2 - \bar{c}^2 + \frac{2}{\pi} \int_{-\infty}^{\bar{c}} \ln \left| \frac{\bar{c} - \xi}{\xi - \bar{x}} \right| \bar{p}(\xi) d\xi + \beta W(\bar{x})$$

$$W(\bar{x}) = \bar{p} + a\alpha \int_{-\infty}^{\bar{x}} \exp[-\alpha(\bar{x} - \xi)] \bar{p}(\xi) d\xi$$

$$\bar{\rho} = 1 + K_1 \bar{p} / (1 + K_2 \bar{p}), \quad \mu = \exp(Qp)$$

$$p(a) = 0, \quad p(c) = 0, \quad \left. \frac{dp}{dx} \right|_{x=c} = 0$$

$$\int_{-\infty}^c p(\xi) d\xi = \frac{\pi}{2}, \quad V = 3\pi^2 \frac{\mu_0 u_k RE^i}{Q^2}$$

Здесь p_g - максимальное давление при сухом контакте тел, рассчитываемое по теории Герца, b - полуширина контакта, которая имела бы место при отсутствии смазки.

На рис. 1-5 приведены результаты расчетов. Приведенные на рис. 1-4 результаты получены при не учете изменения плотности смазки с изменением давления, а также при не учете вязкоупругости поверхностных слоев.

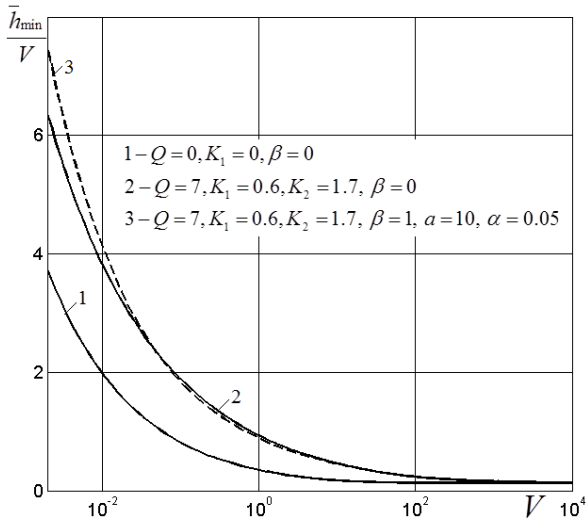


Рис. 1. Зависимости \bar{h}_{\min}/V от V .

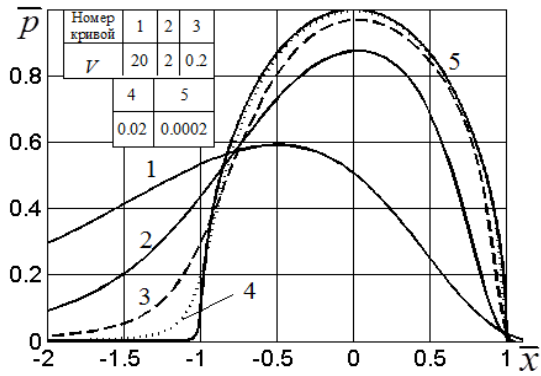


Рис. 2. Давление в контакте при $Q=0, \beta=0$.

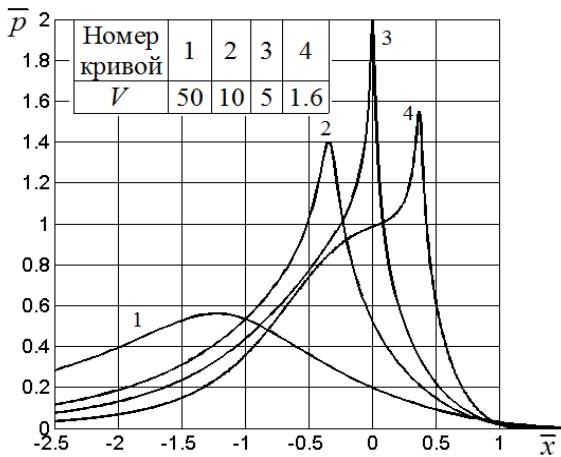


Рис. 3. Давление в контакте при $Q=5, \beta=0$.

Приведенные на рис. 5 результаты получены при значениях параметров

$$K_1 = 0.6, K_2 = 1.7, a = 10, \alpha = 0.05, \beta = 1$$

При $V \rightarrow \infty$ решение задачи стремится к решению задачи для жестких тел. При малых значениях параметра V распределение давления близко к распределению в контакте сухих тел.

Зависимости на рис. 1 демонстрируют рост толщины смазочного слоя, обусловленный деформациями цилиндров.

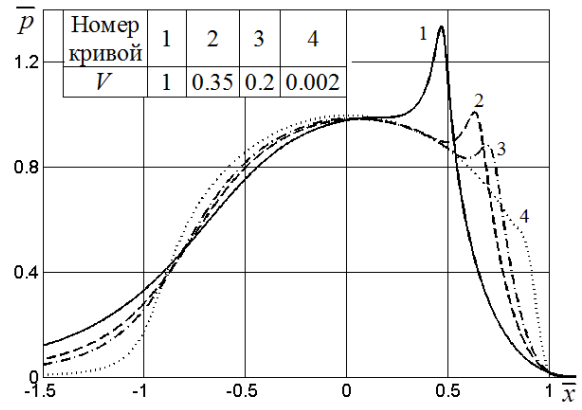


Рис. 4. Давление в контакте при $Q=5, \beta=0$.

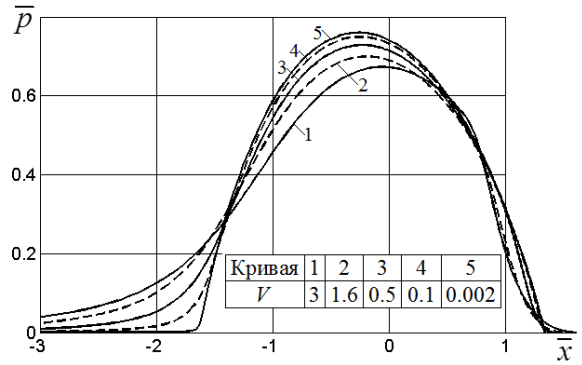


Рис. 5. Давление в контакте при $Q=7, \beta=1$.

Приведенные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Деформации цилиндров приводят к многократному росту минимальной толщины смазочного слоя. При высоких значениях V (случай жестких цилиндров) отношение \bar{h}_{\min}/V равно 0.128, а при $V = 0.002$ и при не учете изменения вязкости с изменением давления (кривая 1 на рис. 1) это отношение равно 3.73, то есть h_{\min} возрастает более чем в 29 раз.
2. За счет роста вязкости смазки с ростом давления h_{\min} также может возрасти в несколько раз.
3. Вязкоупругость поверхностных слоев цилиндров приводит к некоторому повышению минимальной толщины смазочного слоя при малых значениях параметра V . Однако, это повышение обусловлено повышением толщины смазочного слоя на выходе из зазора. На толщину смазочного слоя в области максимального давления вязкоупругость поверхностных слоев влияет незначительно.
4. Если вязкость смазки не зависит от давления, то при уменьшении значения параметра V максимальное по области контакта давление монотонно растет, а распределение давления монотонно стремится к распределению при сухом контакте тел.
5. Если значение параметра Q больше некоторого значения, то в случае контакта упругих тел при уменьшении значения параметра V в начале максимум давления монотонно растет и становится более острым. Затем максимум давления уменьшается, продолжая смещаться вправо, и при некотором значении параметра V он становится вторым максимумом давления. В

дальнейшем этот максимум исчезает. В результате в некотором интервале значений параметра V давление имеет два максимума.

6. Вязкоупругость понижает максимум давления и препятствует его заострению. При существенном влиянии вязкоупругости второго максимума давления нет при всех значениях параметра V . При малых значениях параметра V максимум давления расположены левее координаты $\bar{x} = 0$.

- [1] Goryacheva I. G., Sadeghi F. and Xu, G. Viscoelastic effects in lubricated contacts // Wear. - 1996 (198), 307-312
 [2] Горячева И. Г., Усов П. П. Численный анализ вязкоупруго-гидродинамического точечного контакта при стационарных условиях // Трение и износ. – 2010, (3)1, № 1, 1-10
 [3] Горячева И. Г., Усов П. П. Численный анализ контакта вязкоупругих шероховатых тел при наличии слоя вязкой смазки // ПИММ. – 2012, (76), вып. 5, 766-778

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ВЯЗКОГО СМАЗОЧНОГО СЛОЯ МЕЖДУ ПОВЕРХНОСТЯМИ ВЯЗКОУПРУГИХ ТЕЛ

Усов П.П. (usovp@mail.ru)

Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники», Россия.

Рассматривается внешний смазываемый контакт вязкоупругих цилиндров. В качестве реологической модели вязкоупругих тел используется двумерная модель Томсона вязкоупругой среды. Исследованы зависимости давления в смазочном слое и толщины смазочного слоя от времени релаксации вязкоупругих тел. Показано, что при уменьшении времени релаксации толщина смазочного слоя в области высокого давления сначала изменяется мало, а, начиная с некоторого значения, быстро падает.

Ключевые слова: смазка, контакт вязкоупругих цилиндров, численный анализ.

В настоящее время расчет смазываемых узлов трения основан на решении задач упруго гидродинамической (УГД) теории смазки, которая рассматривает течение тонкого слоя смазочного материала между поверхностями упругих тел.

Однако в последнее время наметилась тенденция использования в узлах трения различных композиционных материалов, которые обладают реологическими свойствами. В связи с этим возникает необходимость исследования влияния несовершенной упругости контактирующих тел на характеристики смазочного слоя, разделяющего их.

Влияние вязкоупругих свойств тонких поверхностных слоев упругих тел на характеристики смазочного слоя рассматривалось в работах [1]-[3]. В данной работе исследовано влияние объемных вязкоупругих свойств контактирующих тел на толщину смазочного слоя и распределение давления в нем.

Рассмотрена задача о стационарном контакте вращающихся вязкоупругих цилиндров. В качестве реологической модели вязкоупругих тел принята двумерная модель Томсона, изложенная в [4]. В безразмерных переменных основные уравнения и условия задачи могут быть приведены к виду

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\bar{\rho} \bar{h}^3}{\bar{\mu}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) - W \frac{\partial (\bar{\rho} \bar{h})}{\partial x} = 0$$

$$\bar{h}(\bar{x}) = \bar{h}_c + \bar{x}^2 - c^2 - \frac{2\zeta}{\pi} \int_{-a}^c \bar{p}(\xi) \left[\ln \left| \frac{\bar{x} - \xi}{c - \xi} \right| + \Psi(\bar{x} - \xi) - \Psi(c - \xi) \right] d\xi$$

$$\Psi(\bar{x}) = - \left(1 - \frac{1}{\zeta} \right) \exp \left(- \frac{\bar{x}}{\tau_\epsilon} \right) E_i \left(\frac{\bar{x}}{\tau_\epsilon} \right)$$

$$\bar{\rho} = 1 + K_1 \bar{p} / (1 + K_2 \bar{p}), \quad \bar{\mu} = \exp(Q \bar{p})$$

$$\bar{p}(-a) = 0, \quad \bar{p}(c) = 0, \quad \left. \frac{d\bar{p}}{dx} \right|_{x=c} = 0$$

$$\int_{-a}^c \bar{p}(\xi) d\xi = \frac{\pi}{2}, \quad W = 3\pi^2 \frac{\mu_0 V R E'}{Q^2}$$

Здесь $(-a)$ - координата входной граничной точки смазочного слоя, V - линейная скорость движения поверхностей, Q - нагрузка, E' - приведенный длительный модуль упругости цилиндров, $\tau_\epsilon = VT_\epsilon/b$, VT_ϵ/b , b - половина ширины площадки контакта, рассчитанная по теории Герца, T_ϵ , T_σ - времена релаксации, определяющие вязкие свойства вязкоупругих цилиндров, T_ϵ - время релаксации деформаций, T_σ - время релаксации напряжений, $\zeta = T_\epsilon / T_\sigma$. Параметр ζ удовлетворяют соотношению $\zeta > 1$. Величина ζE_i представляет собой мгновенный модуль упругости цилиндров. Функция $E_i(t)$ является интегральной показательной функцией.

Проведена серия расчетов, позволяющая исследовать влияние времен релаксации на давление в смазочном слое и его толщину смазочного слоя. Расчеты проводились при постоянных значениях параметров $Q=0.25$, $G=7$, $K_1=0.24$, $K_2=0.68$, $\zeta=3$, $\alpha=8.5$. На рис. 1 приведены зависимости $\bar{h}(\bar{x})$, $\bar{p}(\bar{x})$ при различных высоких значениях τ_ϵ .

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что минимальная толщина смазочного слоя слабо зависит от параметра τ_ϵ при $\tau_\epsilon \geq 3.9$. Изменение функции распределения давления с уменьшением значения параметра τ_ϵ происходит следующим образом. Второй пик давления уменьшается и при некотором значении τ_ϵ становится меньше основного максимума давления. При этом область

высокого давления смещается влево – к входу в зазор.

При дальнейшем уменьшении значения параметра τ_e вплоть до значения $\tau_e=0.2$ оба максимума давления продолжают уменьшаться, и при некотором значении τ_e второй максимум исчезает. При этом область высокого давления продолжает расширяться, но, в основном, вправо. График функции распределения становится более симметричным относительно линии действия нагрузки.

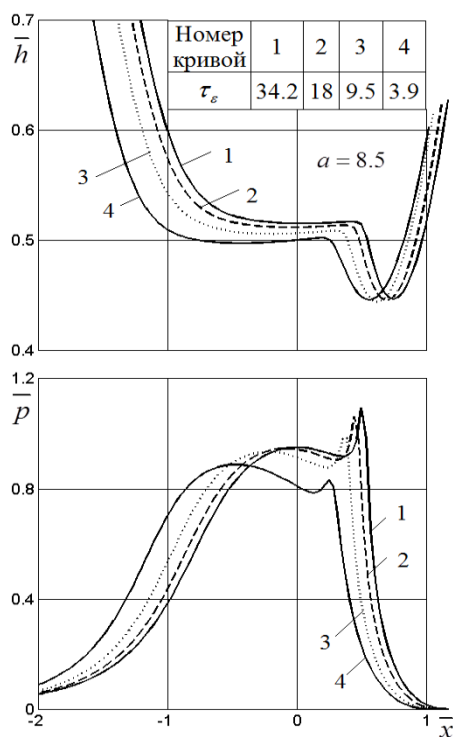


Рис. 1. Зависимости $\bar{h}(\bar{x})$ и $\bar{p}(\bar{x})$ при $3.9 \leq \tau_e \leq 34.2$

При малых значениях параметра τ_e в решении проявляется одна особенность. Во входной зоне смазочного слоя появляется область, в которой толщина смазочного слоя растет. Это связано с тем, что при малых временах релаксации вследствие вязких свойств тел прогибы поверхностей быстро нарастают по мере продвижения через область контакта от входа к выходу. Однако чтобы на входе генерировалось положительное давление, расширение зазора может присутствовать, но в определенных пределах. При уменьшении значения параметра τ_e область расширяющегося зазора растет и наступает момент, когда при заданном значении $a=8.5$ решения не существует. Решение, однако, существует при меньших значениях входной координаты a . На рис. 2 представлены результаты при малых значениях параметра τ_e . При каждом значении параметра τ_e значение a равно максимальному значению, при котором существует решение. Приведенные результаты указывают на то, что вследствие вязких свойств контактирующих тел контакт переходит в режим, похожий на режим

масляного голодания, несмотря на то, что смазка подается на вход обильно.

Если до значения $\tau_e=0.1$ толщина смазочного слоя в области высокого давления меняется слабо, то при дальнейшем уменьшении τ_e она быстро падает. Это следует из результатов, приведенных на рис. 3.

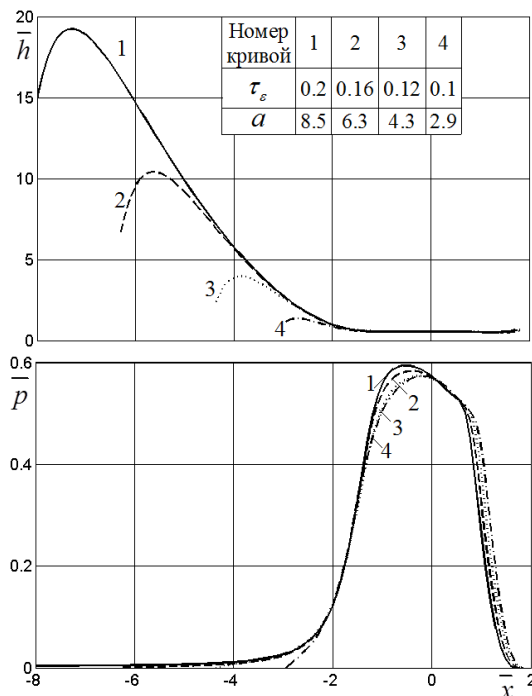


Рис. 2. Зависимости $\bar{h}(\bar{x})$ и $\bar{p}(\bar{x})$ при $0.1 \leq \tau_e \leq 0.2$.

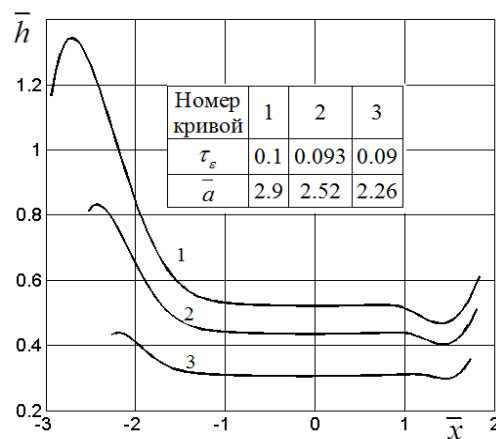


Рис. 3. Зависимости $\bar{h}(\bar{x})$ и $\bar{p}(\bar{x})$ при $\tau_e < 0.1$.

- [1] Goryacheva I. G., Sadeghi F. and Xu, G. Viscoelastic effects in lubricated contacts // Wear. - 1996 (198), 307-312
- [2] Горячева И. Г., Усов П. П. Численный анализ вязкоупругогидродинамического точечного контакта при стационарных условиях // Трение и износ. – 2010, (3)1, № 1, 1-10
- [3] Горячева И. Г., Усов П. П. Численный анализ контакта вязкоупругих шероховатых тел при наличии слоя вязкой смазки // ПММ. – 2012, (76), вып. 5, 766-778
- [4] Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия. - М.: Наука. - 2001

ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ПАРЫ ТРЕНИЯ СТАЛЬНОЙ КОМПОЗИТ/МЕДЬ ПРИ СКОЛЬЖЕНИИ С ТОКОСЪЕМОМ

¹Фадин В.В., ^{1,2}Алеутдинова М.И. (aleut@ispms.ru), ³Алеутдинов К.А.

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия;

²Северский технологический институт НИЯУ МИФИ, Северск, Россия;

³Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия.

Осуществлено скольжение стальных композитов по медному контртелу в тяжелых условиях, т.е. при контактной плотности тока более 50 А/см². Показано, что композит состава Си-30% графита проявляет низкую износостойкость в этих условиях. Композит, содержащий в составе свинец и графит, формирует слой переноса на контртеле. Это снижает адгезионное взаимодействие и увеличивает износостойкость. Сильная адгезия к контртелу композита, содержащего переработанную сталь ШХ15, приводит к разрушению поверхности образца при плотности тока менее 100 А/см².

Ключевые слова: интенсивность изнашивания, пластическая деформация, поверхностный слой, плотность тока.

Введение

Производственный скользкий токосъём осуществляется, как правило, по медному контртелу. Удовлетворительная износостойкость достигается в этом случае за счёт применения металлических композитов, низкой контактной плотности тока (<50 А/см²), низкого давления (0,02 МПа), граничной смазки, т.е. в условиях нормального изнашивания и отсутствия высоких механических напряжений в поверхностном слое [1]. Возможность получения удовлетворительных характеристик контакта при скольжении в более тяжелых условиях представляет научный и практический интерес. Увеличение давления в некотором диапазоне приводит к уменьшению износа скользящего электроконтакта. Можно предположить, что этот же эффект проявится в скользящем электроконтакте металл/медь. Износостойкость может увеличиться также при изменении первичной структуры металла. Поиск таких структур всегда актуален.

Целью настоящей работы является определение влияния контактного давления на работоспособность стальных композитов в условиях скольжения с токосъёмом по медному контртелу.

Материалы и методы

Состав композиционных материалов КМ1-КМ3 по шихте показан в таблице, где Гр - графит, ШХ15 – переработанная подшипниковая сталь. Промышленные композиты КМ1 и КМ2 имеют структуру прессованного порошкового изделия. КМ3 спекался в вакууме при температуре 1100°С в течение 2 часов. Пористость P , твердость HB , удельное электросопротивление ρ композитов определены по стандартным методикам. Металлографическое изучение проведено на оптическом микроскопе Neophot-21. Контртелом служила медь ($HB=0.7$ ГПА). Начальные параметры шероховатости ($R_a=5$ мкм, $R_z=31$ мкм) поверхности скольжения контртела измерены на бесконтактном профилемере MICRO MEASURE 3D station.

Испытания композитов на износ проведено в условиях скользящего электроконтакта без смазки

при переменном токе (50 Гц), при давлениях 0,02 МПа и 0,13 МПа, скорости скольжения 5 м/с на машине трения СМТ-1 по схеме “вал-колодка”. Путь трения при каждом испытании составлял 9 км. Линейная интенсивность изнашивания определена как $I_h=h/L$, где h – изменение высоты образца на пути трения L . Контактная плотность тока j определена как $j=i/A_a$, где i – ток, протекающий через номинальную площадь контакта $A_a=20$ мм².

Таблица. Механические и физические свойства металлических композитов

Свойства\ состав (об.%)	HB , МПа	P , [%]	ρ , 10^{-6} Ом м	σ , МПа
Cu-30% Гр (КМ1)	94	28	0,12	14
Cu-42% Fe-7% Pb-2% Zn-11%Гр (КМ2)	610	15	0,16	142
3.Cu-4% Гр-89%ШХ15 (КМ3)	1650	19	0,38	694

Результаты и их обсуждение

Плотность тока j является основным фактором, разрушающим контактный слой и определяющим износостойкость. Увеличение j вызывает увеличение удельной поверхностной электропроводности контакта $r_s^{-1}=j/U$ (U – контактное падение напряжения), а также увеличение интенсивности изнашивания I_h для всех рассмотренных композитов. Но поверхностный слой промышленного композита КМ1 быстро изнашивается при давлении 0,02 МПа и катастрофически разрушается при контактом давлении 0,13 МПа и $j=0$ А/см². Увеличение давления приводит к увеличению электропроводности r_s^{-1} и снижению интенсивности изнашивания I_h композитов КМ2 и КМ3. Промышленный композит КМ2 проявляет самую низкую I_h и переходит в режим катастрофического изнашивания при плотности тока $j\approx 100$ А/см² при давлении 0,02 МПа и при $j\approx 400$ А/см² при давлении 0,13 МПа. Различие в триботехническом поведении композитов проявляется также в морфологических деталях поверхности скольжения. Ком-

позит КМ1 не формирует слой переноса на поверхности контртела, не способен создать износостойкий контакт и его поверхность быстро разрушается при данных условиях. При этом износ контртела не наблюдается. КМ2 содержит медь, свинец и графит, из которых формирует слой переноса на образце и медном контртеле и осуществляет скольжение по этому слою, что снижает адгезионное взаимодействие. Этот слой не является результатом структурных изменений первичного материала, но появляется после многократного переноса продуктов изнашивания с одной поверхности на другую. Сильное адгезионное взаимодействие в пятнах контакта КМ3/медное контртело вызывает высокие механические напряжения, которые приводят к вырыванию макрофрагментов поверхностного слоя композита КМ3. Эти фрагменты фиксируются на поверхности скольжения контртела, образуя шарж, который защищает поверхность скольжения медного контртела от микрорезания неровностями контактной поверхности композита КМ3, имеющего более высокую твердость. Поэтому износ медного контртела отсутствует, но относительно быстро разрушается поверхностный слой композита КМ3, что наблюдается как его высокий износ.

Выводы

Сухое скольжение металлических композитов под воздействием электрического тока может сопровождаться образованием слоя переноса на сопряженной поверхности медного контртела с большой шероховатостью. Отсутствие такого слоя приводит к быстрому изнашиванию композита состава Cu-30%Гр. Слой переноса в виде частиц износа, шаржированных на поверхности скольжения медного контртела, препятствует его изнашиванию, но не препятствует изнашиванию композита, содержащего переработанную подшипниковую сталь. В этом случае катастрофическое изнашивание начинается при контактной плотности тока до 100 А/см^2 . Относительно высокую износостойкость проявляет композит, содержащий свинец. Такой композит формирует пластичный слой переноса на поверхности контртела, что позволяет релаксировать напряжения в зоне трения за счёт пластических микросдвигов при контактной плотности тока более 100 А/см^2 .

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-48-700434.

[1] M.Braunovich, V.V.Konchits, N.K.Myshkin. Electrical contacts. Fundamentals, Applications and Technology. — by Taylor & Francis Group, LLC—2007

НАНОКВАНТОВАЯ ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ГИББСА КАК ХАРАКТЕРИСТИКИ НАСЛЕДСТВЕННЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА

Федоров С.В. (fedorov@klgtu.ru)

Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия.

Обсуждается идея существования элементарной наноструктуры системы трения скольжения – механического кванта. Показана эволюция трансформатора энергии – трибосистемы (контакта трения). Механический квант представляет собой трибоподсистему, образуемую при идеальной эволюции трибосистемы. Механический квант определяет структурные уровни состояния совместимых трибосистем. Произведена оценка «энергетического размера» механического кванта и энергии Гиббса трибосистемы.

Ключевые слова: эволюция трения, пластическая деформация, энергетический баланс, самоорганизация, диссипация, наноструктура, механический квант.

Фундаментальная природа процесса трения как глобального трансформатора энергии внешнего относительного движения требует подробного анализа энергетических закономерностей процесса и оценки его энергетических характеристик на всех структурных уровнях.

Структурно-энергетический анализ процесса трения [1] раскрывает его двойственные-адаптивно-диссипативные эволюционные закономерности.

В условиях, когда трибосистема реализует полный эволюционный цикл приспособления с образованием наиболее совершенной, диссипативной структуры, ее (структуры) поведение подчиняется уравнению состояния квазиидеального

твердого тела, т.е. следует полагать, что взаимодействия между элементами этой структуры минимизированы – состояние идеальной упругости в динамике:

$$\bar{Q}^* = \bar{S}_Q T = \mu_{dis}^* N l_f = U_e^* = V_f^* u_e^* = V_f^* \bar{q}_*,$$

Данное соотношение есть частный случай решения уравнений энергетического баланса трения, при $\mu_{adapt}=0$ и $\mu_{dis}=1=\mu_{dis}^*$. Здесь \bar{S}_Q - инерционная энтропия совместимого объема трения; T - характеристическая температура контактного объема трения; l_f - линейный размер объема трения.

Это равенство показывает условие полного рассеяния накопленной критическим объемом трения

V_f^* энергии дефектов с плотностью u_e^* в упругую энергию по вновь образованным структурным элементам (механическим квантам) с плотностью $\bar{q}^* = u_e^*$, т.е. количество накопленной энергии $U_e^* = V_f^* \cdot u_e^*$ на первом (адаптивном) этапе эволюции равно рассеянной энергии $\bar{Q}^* = V_f^* \bar{q}^*$ на втором этапе эволюции.

Поскольку рассеянная энергия \bar{Q}^* распределена в виде упругой энергии между примерно 63 млн. механических квантов (динамических осцилляторов), определяется количество энергии U_{IQ} приходящейся на один механический квант U_{IQ} .

Размер критического объема трения V_f^* [2], равен $12,194 \cdot 10^{-18} \text{ м}^3$, а величина критической плотности накопленной скрытой энергии u_e^* [3], например для стали, равна $10,5 \text{ Дж/мм}^3$.

Соответственно количество энергии рассеяния U_{IQ} , приходящейся на один механический квант равно $2,032 \cdot 10^{-15} \text{ Дж}$.

Полученная величина энергии, приходящаяся на один механический квант - это упругая энергия его взаимодействия с другими квантами в его ротационно-колебательном процессе как динамического осциллятора диссипативных структур трения, т.е. это поверхностная энергия одного механического (нано) кванта.

Поскольку механический квант представляет собой идеальное (бездефектное) [1] и, следовательно, равновесное структурное образование, то естественно его внутренняя энергия равна его поверхностной энергии.

Отсюда получаем вывод: рассеянная энергия U_{IQ} , приходящаяся на один механический квант при конечном и идеальном эволюционном состоянии трибоконтакта равна внутренней энергии U_{IE} механического кванта. Поскольку теоретический кристалл имеет только нулевые колебания атомов, следовательно - это энергия нулевых колебаний.

Соответственно получаем следующий вывод: объем теоретического кристалла (трибоподсистемы) с нулевыми колебаниями атомов имеет такую же по величине плотность внутренней энергии, что и предельно деформированный критический объем трения (искаженный дефектами предельной плотности) с накопленной скрытой (потенциальной) энергией $U_e^* = \Delta H_S$.

Данный факт дополнительно подтверждает справедливость термодинамической теории прочности [2]. Накопленная критическая плотность, внутренней энергии дефектов (искажений структуры (статических и динамических)) есть универсальная константа состояния материала, ибо это одновременно внутренняя энергия идеального кристалла, что бесспорно есть константа.

Таким образом, можно утверждать, что при формировании дефекта кристаллического строения имеет место перераспределение (трансформация) внутренней энергии кристалла на область дефектов.

Данный факт абсолютно точно подтверждает основную логику структурно-энергетической трактовки концепции прочности профессора В.В.Фёдорова, согласно которой работа внешних сил затрачивается на разрыв межатомных связей кристаллической решетки, т.е. на образование дефектов.

Определено количество энергии U_{atom} , приходящейся на один атом механического кванта:

$$U_{atom} = 2,468 \cdot 10^{-19} \text{ Дж} = 1,54 \text{ эВ},$$

что соответствует средней энергии $1,52 \text{ эВ}$ образования вакансии для $\alpha(\delta) - Fe$ [4].

Анализ эволюции элементарной трибосистемы (контакта трения) показывает соответствие энергетической трактовки процесса уравнению Дж. Гиббса для равновесных процессов.

Энергию, отнесенную к одному механическому кванту, следует рассматривать как энергию Гиббса или химический потенциал.

Соответственно, энергия идеального кристалла (механического кванта) представляет исходный до деформации энергетический уровень твердого тела; она определяет любую предисторию кристалла, т.е. является характеристикой исходных или же наследственных трибосвойств материала (трибосистемы).

[1] Фёдоров С.В. Основы трибоэргодинамики и физико-химические предпосылки теории совместимости. Калининград: Изд-во КГТУ, 2003. 415 с.

[2] Фёдоров С.В. Расчет истинного объема трения. Трение и износ в машинах и механизмах. 2010б №126 С.3-7.

[3] Фёдоров В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твёрдых тел. Ташкент: Изд-во Фан, 1979. 186 с.

[4] Орлов А.Н., Трушин Ю.В. Энергии точечных дефектов в металлах. Москва: Изд-во Энергоатомиздат, 1983. 80 с.

ПРИНЦИП НАНОРАЗМЕРНОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ КОНТАКТА ТРЕНИЯ

Федоров С.В. (fedorov@klgtu.ru)

Калининградский государственный технический университет, Калининград, Россия.

Идеальная эволюция контакта трения приводит к формированию его наноструктурного устройства, основу которого представляет механический квант, наименьшее структур-

ное образование твердого тела в условиях пластической деформации. Этот механический квант - сферическое идеальное образование с атомарной шероховатостью может быть основой формирования реальной поликристалличности твердых тел. Рассмотрен возможный принцип формирования такой самоподобной, многоуровневой структуры.

Ключевые слова: трение, эволюция, структура, механический квант, поликристалличность

Известен принцип механического (нано) кванта, сформулированный ранее [1], как наименьший размер структурного элемента материального, твердого тела при пластической деформации (трении). Этот механический квант (динамический осциллятор) диссипативных структур трения имеет сферическую форму атомарно-шероховатого теоретического кристалла с диаметром 7,177 нм. Механический квант следует рассматривать как элементарную наноструктуру деформируемого твердого тела.

Структурный размер механического кванта определен соотношением W^3 и равен 8103 атомных осцилляторов. Здесь $W = e^3$ - параметр вероятности состояния механического кванта.

Актуальным является вопрос соответствия принципа механического кванта кластерной конструкции наноструктурных образований. Как известно, эти кластерные образования имеют вид сферических образований, состоящих в свою очередь из более мелких сферических образований. Другими словами, если элементарная наноструктура имеет вид атомарно шероховатой сферы, то наноструктурные образования должны образовываться из этих элементарных наноструктур.

Здесь, принципиальный вопрос – по какому размерному ряду формируются эти нанообразования и существует ли этот ряд? Используется логика самоподобности. Если одно сферическое и элементарное образование (механический квант) образуется по логической (вероятностной) модели из более мелких сферических образований (атомов), то следующее и большее по масштабу (по отношению к механическому кванту) сферическое образование должно строиться от исходного образования по той же логической вероятностной модели, что и первое.

Следовательно, следующее после механического кванта образование должно включать в себя столько механических квантов, сколько атомов включает в себя сам механический квант.

В итоге имеем: первый уровень сферического образования - это механический квант - 8103 атомов. Второй уровень - это наношероховатый кластер – 8103 механических квантов. Третий уровень – это нанокластерно-шероховатый элементарный объем трения – 8103 нанокластеров.

Окончательно получаем в элементарном объеме трения (аналог равновесной шероховатости) $W^3 \cdot W^3 = 65658609$ механических квантов.

Данная величина строго уточняет рассчитанное ранее число механических квантов (63млн.) в критическом объеме трения. Собственно, здесь получено строгое обоснование безопасного числа

усталости идеально структурированных металлических материалов – 65658609 циклов.

Таким образом, элементарная трибосистема (равновесный контакт трения) обладает тремя (без учета нулевого, атомного уровня) структурными уровнями. Если рассматривать элементарную трибосистему с размером $2,85 \cdot 10^{-6}$ м [1] как аналог фрагмента зерна поликристаллического тела, то внутри этого фрагмента идеальной сферической формы расположены субзерна – нанокластеры также идеальной сферической формы в количестве 8103. Соответственно внутри субзерна мы имеем 8103 элементарных наноструктур идеальной сферической формы. Механический квант состоит из 8103 атомных осцилляторов (нулевой уровень). Следовательно, правило 8103 элементарных и образующих очередную структурную форму размеров имеет силу для всех структурных образований, от механического кванта до всех следующих иерархических структурных форм – нано кластера, элементарной трибосистемы,.. и нароста зоны охватывания и т.д.

Определим линейные размеры этих трех структурных уровней.

Средний объемный размер механического кванта равен:

$$\bar{V}_{MQ} = \bar{d}_{atom}^3 W^3 = 19,3565 \cdot 10^{-26} \text{ м}^3.$$

Соответственно средний объем нанокластера равен:

$$\bar{V}_{cluster} = \bar{V}_{MQ} \cdot W^3 = 15,6847 \cdot 10^{-22} \text{ м}^3.$$

Радиус нанокластера определяется соотношением:

$$R_{cluster} = \sqrt[3]{\frac{3\bar{V}_{cluster}}{4\pi}} = 0,720769 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

Средний объем элементарной трибосистемы равен:

$$\bar{V}_{TS} = \bar{V}_{cluster} \cdot W^3 = 12,7095 \cdot 10^{-18} \text{ м}^3$$

Соответственно, радиус элементарной трибосистемы по модели нанообразования равен:

$$R_{TS} = \sqrt[3]{\frac{3\bar{V}_{TS}}{4\pi}} = 1,4477 \cdot 10^{-6} \text{ м}.$$

Ранее этот размер, определенный в работе [2] равен 1,425 мкм.

В заключение оценим размер элементарного нароста зоны схватывания, аналога зерна материала. Здесь вполне можно усмотреть справедливую логику аналогии с традиционной иерархией структуры поликристалличности металлических материалов. Если механический квант рассматривать как зародыш кристаллической структуры креплений, тогда нарост при схватывании следует идентифицировать, как предельный по размеру структурный эталон зерна в условиях трения.

Итак, средний объем нароста схватывания –

$$\bar{V}_{seizure} = \bar{V}_{TS} \cdot W^3 = 0,10298 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3.$$

Соответственно радиус нароста схватывания

$$R_{seizure} = \sqrt[3]{\frac{3\bar{V}_{seizure}}{4\pi}} = 0,29077 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Полученные расчетные результаты достаточно строго и физически обосновано представляют принцип структурной иерархии поликристаллических металлических материалов. Указанные сред-

ние для всех металлов размеры структурных образований совпадают с диапазонами размеров этих образований известные из практики материаловедения.

[1] Fedorov, S. V.: The mechanical quantum of dissipative friction structures is the elementary tribonanostructure. In: IV WTC2009. Kyoto, Japan, 2009.

[2] Фёдоров С.В. Расчет истинного объема трения. Трение и износ в машинах и механизмах. 2010б. №126 С.3-7.

ИННОВАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ В ТРИБОТЕХНИКЕ

¹Фильков М.Н. (m.filkov@mail.ru), ²Дунаев А.В., ³Крушенко Г.Г.

¹ФГБНУ ВИЭСХ, Москва, Россия;

²ФГБНУ ГОСНИТИ, Москва, Россия;

³Институт вычислительного моделирования СО РАН, Красноярск, Россия.

Рассмотрены методы триботехнической модификации смазочных масел введением в них триботехнических составов и электрических зарядов.

Ключевые слова: трибосоставы, масла смазочные, электрический заряд.

Износ деталей механизмов и машин является до 80 % причиной отказов и аварийных ситуаций. Некоторым решением повышения износостойкости узлов трения является создание антифрикционных покрытий триботехническими методами в процессе эксплуатации, что позволяет до 2...3 раз увеличить срок службы агрегатов, на 5...20 % уменьшить расход топлива, и электроэнергии, на 50 % – эксплуатационные затраты [1].

Введение в трибосреду химически активных веществ, суспензий частиц природных и искусственных минералов, создающих пленочные покрытия, или повышающих адгезию смазки, или модифицирующих поверхности трения, технически и экономически оправданно. В этом направлении возникла инновационная ветвь – «безразборный технический сервис» [2] – повышение работоспособности и ресурса узлов и агрегатов введением в смазку специальных веществ и обработка электрическими зарядами. Этот сервис, как часть общей системы ТО и ремонта, отвечает всем периодам жизненного цикла машин и оборудования и может включать приработку, диагностирование, ввод профилактических трибосоставов, химмотологический тюнинг, очистку систем смазки, топливоподачу, охлаждения, камер сгорания, а наиболее важное – восстановление работоспособности изношенных узлов, не имеющих аварийных дефектов, ремонтно-восстановительными составами [1,2]. При незначительных суммарных затратах на трибообработку (менее 1 % эксплуатационных [1]) их регулярное проведение повышает надежность, экономичность и безопасность эксплуатации техники. Поэтому безразборный сервис, например, автотракторных двигателей, с экспресс-контролем масла по «капельной пробе» должен стать регламентным. Для этого в НТД на эксплуатацию ма-

шин необходимо включать: обкатку прирабочными составами; в предремонтной эксплуатации – профилактику мягкими составами; при выработке ресурса – восстановительную обработку; после ремонта – обкатку притирочными составами с заменой их профилактическими.

Механизмы действия разнообразия триботехнических материалов различны. Они сами могут подвергаться механической нагартовке, быть третьим телом в соединениях, участвовать в адгезии, хемосорбции, электрохимическом металлоплакировании, в трибохимии и трибополимеризации, в катализе углеродных алмазоподобных пленок. Возможно также, что мягкая шлифовка серпентиновыми минералами открывает каталитически активные поверхности металлов, идут деструкция и каталитическая активация частиц минералов, деструкция длинноцепочечных молекул углеводородов масла с образованием ремонтно-восстановительного покрытия [1, 2]. В то же время при трении могут происходить и образование полимеров, смол и лаковых отложений. В целом разные трибосреды в разных условиях формируют различные покрытия или различно модернизируют поверхности.

Приемы триботехнической обработки ДВС серпентиновыми составами обобщены в монографии [1]. Наиболее устойчивые серпентиновые суспензии, состоящие из наноструктурированных частиц и аморфной фазы, были получены измельчением исходного высокодисперсного порошка в планетарной мельнице. Эти суспензии позволяют создавать прочные аморфные покрытия. Как показали исследования в Финляндии, Франции, Китае поверхность пленочных покрытий на 90 % состоит из углерода. Эффект трибообработки проявляется через час, но продолжает, как и лакообразо-

вание в ЦПГ, наращиваться в эксплуатации со смазкой уже и без трибосостава.

Известны также трибохимические составы, поддерживающие свойства смазок [1]. Доказана трибозффективность и электрического воздействия на масла, на их присадки для повышения адгезии к металлам [3, 4].

Введение в масла электрических зарядов – недавнее новое направление в триботехнической модификации масел: прокачиванием масла в электрическом поле (1000 В/мм) [3] или эмиссией зарядов в масла с изолированного электрода от источника постоянного тока 12...24...100 В [4]. Например, с помощью электронного регулятора трения (ЭРТ) от Инжинирингового центра «ЛИК» (к.т.н. Любимов Д.Н. [4]) можно катализировать или ингибировать смазочное действие. Применение миниатюрного ЭРТ просто, например, через масломерный шуп агрегата. По результатам испытаний [4] ЭРТ может в 1,5...2 раза увеличить ресурс узлов трения со снижением их износа на 25-30 %. В эксплуатации снижение расхода топлива бензиновых, дизельных, газовых ДВС с ЭРТ достигает 10...12%, снижается выход СО и СН на 19 %, выход NOx увеличивается на 6...9 % [4]. Преимуществами ЭРТ является постоянство его действия; независимость от смазочного материала, вида сопряжения, режимов работы узлов. В 2015 г. в РФ уже 3 года более 400 отечественных и импортных машин работали с ЭРТ, отрицательных случаев нет [].

Эксплуатационные испытания ЭРТ на автомобиле ВАЗ-2131М, проведенные инж.

Железницким А.И., показали уменьшение путевого расхода топлива как минимум на 3 %, а в сравнении расходов в городском цикле без ЭРТ с расходом на испытательной трассе с ЭРТ – около 9 %.

Большую эффективность электрического воздействия на масла показали испытания д.т.н. Шарифуллина С.Н. на триботехнически не обработанном автомобиле Хундай АХ 35. При проезде на трассе Чистополь - Казань и обратно расход топлива с обычного 8-10 л/100 км снижался до 7,1 л/100 км.

Безразборный сервис актуален для машин и оборудования всех отраслей. Но для его более широкого продвижения нужна активная работа НИИ и вузов, частных компаний, государственное внимание и поддержка.

Выводы. Можно констатировать, что, современные достижения науки и практики создали нетрадиционные эффективные приемы повышения надежности узлов трения в процессе технического обслуживания машин и оборудования.

[1] Балабанов, В.И. Все о присадках и добавках для автомобиля. М., ЭКСМО, 2008, 240 с.

[2] Дунаев, А.В. Нетрадиционная триботехника. Модификация поверхностей трения. Lamdert Academic Publishing, 2013, 270 с.

[3] Воронин, С.В., Дунаев А.В. Влияние электрического и магнитного поля на механизм действия присадок к маслам. Трение и износ, 2015, Т. 36, № 1, С. 643-649.

[4] Любимов Д.Н., Долгополов К.Н., Вершинин К.Н., Дунаев А.В. Антифрикционная эффективность поляризации масел – инновационный фактор модернизации машин. М., Труды ГОСНИТИ, 2014, Т. 116, С. 40-44.

ПРИМЕНЕНИЕ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ МУФТ ИЗ МАТЕРИАЛА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ.

Хасьянова Д.У.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

В статье описаны особенности процесса деформирования муфты из материала с эффектом памяти формы, анализ выбора смазки для осуществления процесса формоизменения муфты перед сборкой при криогенных температурах.

Ключевые слова: эффект памяти формы, муфта, деформирование, смазка, криогенная температура.

Простота конструкции муфт из материала с эффектом памяти формы (ЭПФ) и упрощенность технологии монтажно-сборочных работ привлекает специалистов опытно-конструкторского бюро и серийных предприятий отечественной промышленности в собственном их освоении. Конструкция муфты из материала с ЭПФ представлена на рис.1. Сущность ЭПФ материала заключается в явлении сохранять долгое время деформированное состояние в одном температурном интервале, а при незначительном нагреве возвращаться в исходное состояние. Восстановление исходных размеров способствует к созданию внутри материала напря-

жений, значительно превосходящих напряжения, приложенные в процессе деформирования [1,2].

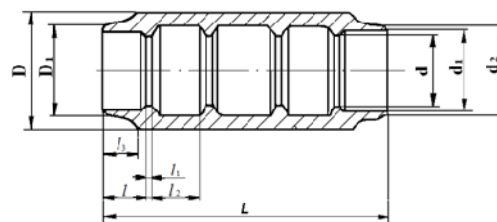


Рис. 1. Муфта ТМС трубопроводов по ОСТ 1 13681-80.

Формоизменение – увеличение или уменьшение исполнительных размеров муфт, является завершающим технологическим процессом создания соединений, определяющим стабильность сборки соединений.

Исследования деформируемости интерметаллических соединений TiNi в зоне мартенситной неупругости показали [3], что данные материалы подчиняются тем же закономерностям пластического деформирования, как и конструктивные материалы. Следовательно, процесс деформирования муфт из сплава с эффектом памяти формы можно рассматривать как калибрование втулок из конструкционных материалов, которое заключается в том, что инструмент проталкивается через обрабатываемое отверстие меньших размеров. Вследствие пластических деформаций диаметр обрабатываемого отверстия увеличивается.

В связи с малой теплоемкостью и температуропроводностью материалов при криогенных температурах, количество тепла, выделяемое при формоизменении и отводимое в охлаждающую среду, не должно нагревать очаг деформации до температур обратного мартенситного превращения [4]. При нарушении теплового баланса, происходит частичное формовосстановление муфты. Остаточная деформация может находиться в пределах от 2 до 6%, что недостаточно для стабильных условий монтажа.

Низкотемпературные узлы трения в среде жидкого азота, для предотвращения процессов схватывания, требуют применения специальной смазки или разделительной среды. Смазка должна отвечать следующим требованиям – низкая температура замерзания; химическая инертность; низкая адсорбционность к влаге; хорошие теплопередающие свойства. Применение жидких или пастообразных смазок зависит от температуры затвердевания, ниже которой трение со смазкой превышает коэффициент трения без смазки – в среде жидкого азота недопустимы. В этом случае при высоких удельных нагрузках, в вакууме или в криогенных жидкостях, применяются гальванические покрытия, которые выполняют роль разделительного смазочного материала. К недостаткам данного метода относится ограниченный ресурс и невозможность при износе восстановления покрытия.

Температурное поле в зоне контакта во многом влияет на условия, происходящие в очаге деформации. Наблюдаются нарушения монотонности температурной зависимости коэффициента трения. Структура металлического покрытия и его свойства претерпевают существенные изменения. В результате происходит мгновенный местный нагрев металла, а при выходе из контакта – резкое охлаждение. Скорости нагрева и охлаждения, для слоя материала толщиной 100 мкм, соответственно составляют $4 \times 10^5 - 10^4$ и $10^3 - 10^4$ С/сек. В условиях кратковременности процессов трения и низкой теплопроводности материала, в теплопоглощении участвуют малые объемы покрытия. В этом случае, толщина эффективной зоны, участвующей

в теплопоглощении определяется следующей зависимостью (1)

$$G = 1,94(\alpha \cdot t)^{0,5} \quad (1)$$

где α – температуропроводность; t – температура в °К.

Большая интенсивность теплового потока и малая глубина слоя участвующая в теплопоглощении ведут к тепловому удару способному к оплавлению. Время необходимое для оплавления некоторых материалов покрытия представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные свойства материалов покрытия.

Материал	$\lambda, \text{Вт/м}^\circ\text{C}$	$\alpha \cdot 10^6$	$\nu_{\text{пл}} \text{ C}$	$\tau, \text{сек}$
Висмут	7,7	6,1	271	0,004
Свинец	30,2	20,4	327	0,026
Олово	58	31	232	0,032
Цинк	95	30	420	0,28
Кадмий	87	29,8	321	0,042

Из таблицы 1 видно, что цинковое покрытие обладает преимуществами. Разделительная среда в виде цинкового покрытия величиной 2 – 8 мкм позволяет осуществлять качественное, без задиrow и схватываний, формоизменение 2х- 3х муфт. Экспериментально установлено [5], что при напряжениях, не превышающих предела прочности материала покрытия, коэффициент трения не зависит от толщины покрытия, действует клиновой эффект, если эта величина не превышает 10 мкм. При превышении указанной толщины пропадает клиновой эффект и покрытие снимается «чулком». С целью увеличения ресурса действия разделительной среды, до гальванического покрытия, на рабочие поверхности пуансона наносятся углубления в пределах 10 – 15 мкм. На поверхность пуансона имеющего высокую твердость методами поверхностно пластического деформирования (ППД) (алмазное выглаживание, вибронакатывание и т.д.) наносятся углубления определенной конфигурации. Возможные виды конфигураций, получаемые методами ППД, представлены на рис 2.

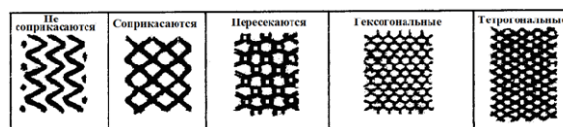


Рис. 1. Виды конфигураций при нанесении углублений с помощью метода поверхностно пластического деформирования (ППД).

Мягкие металлические покрытия, находящиеся в углублениях, в процессе деформирования, постепенно вытесняясь, выполняют роль разделительного слоя.

В стационарных условиях, формоизменение может осуществляться в приспособлениях с криокамерой на любом прессовом оборудовании усилием не менее 2 КН и оснащенных системой регулирования скорости перемещения.

Проведенный анализ процесса деформирования муфт из сплава с эффектом памяти формы в среде жидкого азота показал, что оптимальным

смазочным материалом по своим характеристикам является цинк, а оптимальными режимами деформирования являются деформирование при скорости 20÷30 мм/мин. и температуре в очаге деформации не выше -100 °С.

[1] Глазунов С.Т. и др. Нитинол – сплав с памятью // Авиационная промышленность.- 1975, №9, 95-97.
 [2] Работнов Ю.Н. Механика деформирования твердого тела. – М.: Наука. - 1979

[3] Лотков А.И., Гришков В.Н. Никелид титана. Кристаллическая структура и фазовые превращения // Известия вузов. Физика.- 1985, №5, 21-38.
 [4] Хворостухин Л.А., Хасьянов У., Шишкин С.В. Использование эффекта термомеханической “памяти” никелида титана для создания новых типов неразъемных соединений. //Авиационная промышленность, 1978.- №8, 58 -59.
 [5] Хасьянова Д.У. Технологическое обеспечение качества изготовления муфт тмс и сборки трубопроводов: дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. М., 2012.-103.

ТЕРМОКОРРЕЛЯЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПАР ТРЕНИЯ С ТВЁРДОСМАЗОЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ ДЛЯ УСЛОВИЙ НОРМАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ

Хопин П.Н. (chopin@mail.ru)

«Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия.

Разработаны алгоритмы и получены термокорреляционные зависимости, позволяющие производить оценку температуры трения для произвольного сочетания контактного давления и скорости скольжения с целью дальнейшего расчёта долговечности и антифрикционных характеристик рассматриваемых пар трения с ТСП различных составов для условий нормальной атмосферы.

Ключевые слова: твердосмазочные покрытия, термокорреляционные зависимости, долговечность, антифрикционные свойства, нормальная атмосфера.

Оценка работоспособности автономно функционирующих узлов трения с твёрдосмазочными покрытиями (ТСП) со связующими веществами на основе антифрикционных наполнителей для произвольного сочетания нагрузочно (Р) – скоростных (V) и температурных условий затруднена вследствие отсутствия соответствующих комплексных моделей. В связи со сказанным актуальным является прогнозирование их свойств с учетом модификации состава покрытий при произвольном сочетании эксплуатационных факторов.

Проведёнными экспериментальными исследованиями [1] было показано определяющее влияние температурного фактора на долговечность рассматриваемых пар трения с ТСП (рис.1).

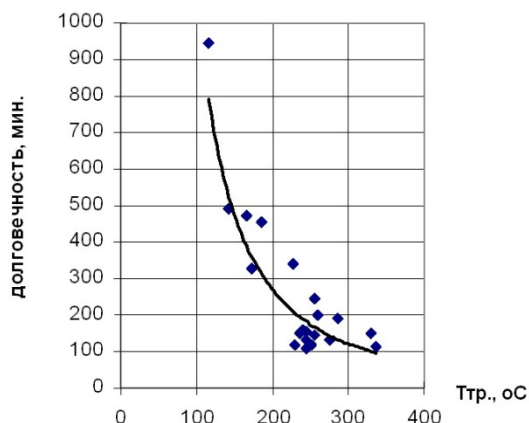


Рис.1. Экспериментальная зависимость долговечности пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 от температуры трения (при различных Р, V, температуре нагрева Тоб.).

Так как температура трения Тгр. является функцией двух основных определяющих её эксплуатационных факторов контактного давления Р и скорости скольжения V, для расчёта долговечности (τ) пар трения с ТСП необходимо иметь зависимости, позволяющие производить оценку температуры трения для произвольного сочетания нагрузочно-скоростных параметров реальных узлов трения с ТСП, т.е. зависимостей типа $T_{гр.} = f(P, V)$. Зная эту зависимость алгоритм расчёта долговечности пар трения с ТСП может быть записан в виде, представленном на рис.2.

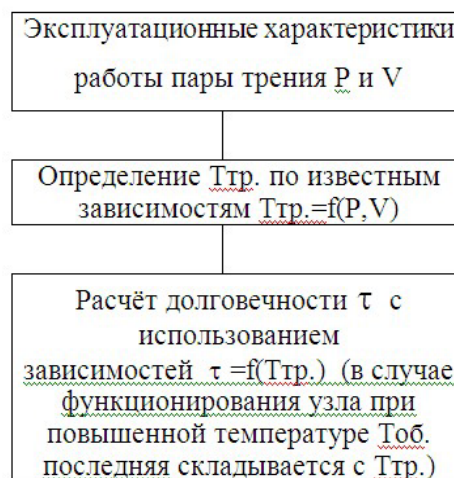


Рис.2. Алгоритм расчёта долговечности пар трения с композиционными ТСП со связующими веществами.

Для оценки ресурса работы ТСП по указанной выше методике применительно к различным

схемам трения были проведёны эксперименты с использованием метода ЦКРУП 2 порядка и получены математические модели зависимости $T_{тр.}=f(P,V)$ для различных схем трения, диапазонов варьирования факторов и типов ТСП (табл. 1).

Таблица 1. Зависимости $T_{тр.}=f(P, V)$ для различных схем трения, типов ТСП и диапазонов варьирования факторов для условий нормальной атмосферы

Тип ТСП на основе MoS ₂	Схема трения	Диапазоны изменения		Зависимости $T_{тр.}=f(P,V)$, [°C]
		N, Н P, [МПа]	V, м/с	
ВНИИ НП 212	Роликовая (модернизированная машина трения РП)	236-1337 (23,1-133,7)	0,096-1,224	$T_{тр.} = 36,49 + 132,23 \cdot V + 0,535 \cdot P + 0,234 \cdot P \cdot V - 47,94 \cdot V^2 - 2,094 \cdot 10^{-3} \cdot P^2$
ВНИИ НП 212	Роликовая (машина трения СМТ)	210-1790 (12,2-103,5)	1,472-3,728	$T_{тр.} = 119,35 + 10,26 \cdot V + 0,065 \cdot P + 0,335 \cdot P \cdot V$
Molykote 7409	Торцевая (стенд «шайба-диск»)	755-9045 (5,6-67,2)	0,11-0,25	$T_{тр.} = 67,27 - 98,96 \cdot V + 0,464 \cdot P + 6,42 \cdot P \cdot V - 0,011 \cdot P^2$

На следующем этапе решалась задача определения термокорреляционных зависимостей типа $\tau = f(T_{тр.})$ для ТСП различных составов. Искомые зависимости были получены из экспериментальных данных, приведённых в монографии [2], путем математической обработки зависимостей долговечности τ от температуры трения $\tau = f(T_{тр.})$ для температур свыше 100°C, при которых образуется эффективная смазочная плёнка и коэффициент трения резко снижается до значений $f_{тр.} \approx 0,02-0,05$ (табл.2).

Экспериментальными исследованиями установлена тесная корреляционная связь между антифрикционными характеристиками пар трения с ТСП ($f_{тр.}$) и температурой трения $T_{тр.}$. Зная зависимость $f_{тр.}=f(T_{тр.})$ для различных ТСП, можно оценить соответствующие антифрикционные характеристики для этого сопряжения. Алгоритм предложенной методики представлен на рис.3 [3].

Анализ литературы показал, что искомые зависимости могут быть получены из экспериментальных данных, приведённых в работах [4,5]. В результате аппроксимации указанных графиков типа $f_{тр.}=f(T_{тр.})$ для различных типов ТСП были получены соответствующие зависимости [3].

Таблица 2. Термокорреляционные зависимости $\tau = f(T_{тр.})$ для условий нормальной атмосферы

Состав ТСП		Термокорреляционные зависимости $\tau = f(T_{тр.})$
Наполнитель	Связующее	
MoS ₂	мочевинно-формальдегидная смола	$\tau = 9 \cdot 10^6 \cdot T_{тр.}^{-1,969}$
Графит	кремнийорганическая смола К-55	$\tau = 4 \cdot 10^5 \cdot T_{тр.}^3 - 0,0276 \cdot T_{тр.}^2 + 4,88 \cdot T_{тр.} - 6,67$
MoS ₂	эпоксидная смола ЭП-96	$\tau = 4493,4 \cdot e^{-0,014 \cdot T_{тр.}}$
MoS ₂	неорганическая связка типа Na ₂ SiO ₃	$\tau = -0,0175 \cdot T_{тр.}^2 + 6,66 \cdot T_{тр.} - 109,93$

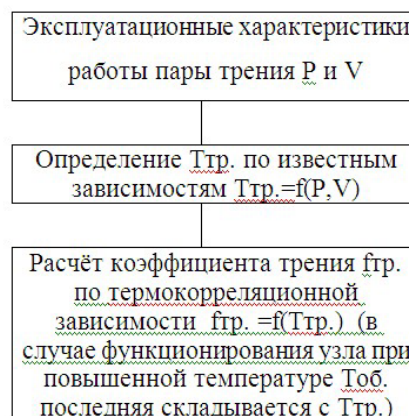


Рис.3. Алгоритм расчёта коэффициента трения пар с ТСП.

[1] Хопин П.Н. Комплексная оценка работоспособности пар трения с твёрдосмазочными покрытиями в различных условиях функционирования. М.: МАТИ, 2012. 255 с.
 [2] Сентюрихина Л.Н., Опарина Е.М. Твёрдые дисульфид-молибденовые смазки. М.: Химия, 1966. 152с.
 [3] Хопин П.Н. Оценка антифрикционных характеристик пар трения с твёрдосмазочными покрытиями для различных условий функционирования // Трение и износ. 2015. Т.36, №5, с.491-498.
 [4] Матвеевский, Р.М. Температурная стойкость граничных смазочных слоев и твёрдых смазочных покрытий при трении металлов и сплавов. М.: Наука, 1971. 228с.
 [5] Криони Н.К. Высокотемпературные твёрдые смазочные покрытия в опорах скольжения // Вестник УГАТУ. – 2009. -т.12, №4(33). С.102-105.

ТЕРМОКОРРЕЛЯЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПАР ТРЕНИЯ С ТВЁРДОСМАЗОЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ ДЛЯ УСЛОВИЙ ВАКУУМА

Хопин П.Н. (chopinp@mail.ru)

«Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия.

В результате экспериментальных исследований в вакууме выявлены корреляционные зависимости долговечности и коэффициента трения от температуры трения. Разработаны алгоритмы их оценки для произвольного сочетания контактного давления и скоро-

сти скольжения. Получены термокорреляционные зависимости для реализации предложенных алгоритмов применительно к ТСП различных составов.

Ключевые слова: твердосмазочные покрытия, термокорреляционные зависимости, долговечность, антифрикционные свойства, вакуум.

Для узлов трения, функционирующих в условиях вакуума, радиационного излучения при повышенной и пониженной температуре применяются твёрдосмазочные покрытия (ТСП) со связующими веществами на основе антифрикционных наполнителей. Расчёт параметров работоспособности указанных фрикционных сопряжений затруднён вследствие отсутствия комплексных зависимостей для произвольного сочетания нагрузочно - скоростных факторов при заданной температуре эксплуатации. Решение данной задачи и являлось целью данной работы.

Оценка долговечности.

Экспериментальными исследованиями, проведёнными в условиях вакуума [1], была подтверждено определяющее влияние температурного фактора на долговечность рассматриваемых пар трения с ТСП (рис.1).

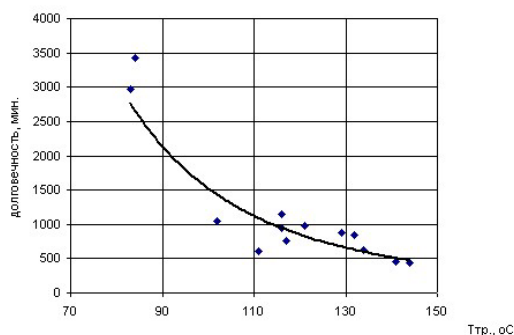


Рис. 1. Зависимость долговечности пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 в вакууме от температуры трения (получена для различных сочетаний контактного давления P и скорости скольжения V).

В результате обработки экспериментальных данных для пар трения с ТСП ВНИИ НП 212 была получена следующая термокорреляционная зависимость:

$$\tau = 4 \cdot 10^9 \cdot T^{-3,206}, \quad (1)$$

где τ – долговечность, мин.;
T – температура трения, °C.

Для пар с ТСП ВНИИ НП 229 с использованием литературных данных определена зависимость:

$$\tau = 232151 \cdot T^{-1,321} \quad (2)$$

Учитывая, что температура трения T_{тр.} является функцией основных определяющих её эксплуатационных факторов контактного давления P и скорости скольжения V, для расчёта долговечности (τ) пар трения с ТСП необходимо иметь термокорреляционные зависимости типа T_{тр.}=f(P,V), позволяющие производить оценку температуры трения для произвольного сочетания нагрузочно-скоростных параметров. В этом случае алгоритм оценки долговечности пар трения с ТСП может быть записан в виде, представленном на рис.2.

В результате проведения планируемого эксперимента в условиях вакуума была получена искомая термокорреляционная зависимость для пары с ТСП ВНИИ НП 212:

$$T_{тр.} = 3,31 + 29164 \cdot V + 0,643 \cdot P_{конт.} - 282,19 \cdot V^2, \quad (3)$$

где P – [МПа], V – [м/с], T_{тр.} – [°C]

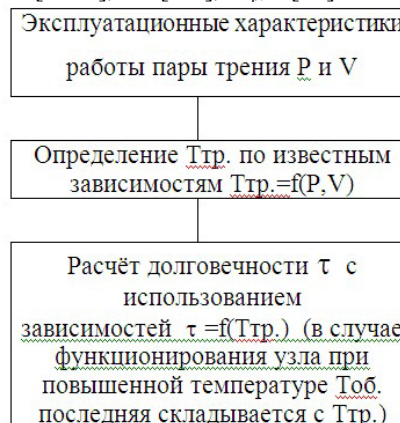


Рис.2. Алгоритм расчёта долговечности пар трения с композиционными ТСП со связующими веществами.

Представленные зависимости могут использоваться для прогнозирования долговечности пар трения с соответствующими ТСП, функционирующими в условиях вакуума при произвольных давлении и скорости скольжения.

Оценка антифрикционных характеристик.

В результате проведения экспериментальных исследований в вакууме установлена корреляционная зависимость антифрикционных характеристик рассматриваемых фрикционных сопряжений от температуры трения (рис.3) [3].

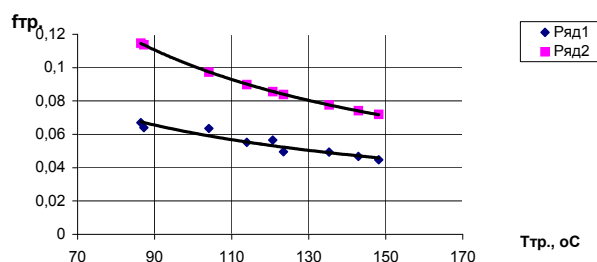


Рис. 3. Термокорреляционные зависимости f_{тр.}=f(T_{тр.}) для пары трения с ТСП ВНИИ НП 212: ряд 1 – для вакуума; ряд 2 – для нормальных атмосферных условий.

Для пары трения с ТСП ВНИИ НП 212 рассчитана корреляционная зависимость f_{тр.}=f(T_{тр.}), адекватно описываемая уравнением:

$$f_{тр.} = 1,64 \cdot T_{тр.}^{-0,7155} \quad (4)$$

Учитывая полученную ранее зависимость (3) T_{тр.}=f(P,V) алгоритм расчёта коэффициента трения для рассматриваемых пар с ТСП аналогичен алгоритму оценки долговечности (рис.2) с отличием на 3 этапе, когда расчёт f_{тр.} осуществляется по

Таблица 1. Термокореляционные зависимости $f_{тр.}=f(T_{тр.})$ для пар трения с ТСП различных составов, функционирующих в условиях вакуума.

Тип ТСП	Состав	Корреляционные зависимости $f_{тр.}=f(T_{тр.})$
ВНИИ НП 212 (данные автора)	MoS ₂ + мочевино-формальдегидная смола	$f_{тр.} = 1,64 \cdot T_{тр.}^{-0,7153}$ (см. ф. (19))
ВНИИ НП 213 [2]	MoS ₂ + кремнийорганическое связующее К-55	$f_{тр.} = 0,0905 - 3,46 \cdot 10^{-4} \cdot T_{тр.} + 5,86 \cdot 10^{-7} \cdot T_{тр.}^2$
Типа ЦВСП-3с [2]	графит + кремнийорганическое связующее К-55	$f_{тр.} = 0,152 - 5,23 \cdot 10^{-4} \cdot T_{тр.} + 5,6 \cdot 10^{-7} \cdot T_{тр.}^2$
[2]	графит + силикат натрия	$f_{тр.} = 0,1167 - 3,99 \cdot 10^{-4} \cdot T_{тр.} + 4,23 \cdot 10^{-7} \cdot T_{тр.}^2$

термокореляционной зависимости $f_{тр.}=f(T_{тр.})$.

Для оценки антифрикционных характеристик пар трения с ТСП различных составов, функционирующих в условиях вакуума, искомые термокореляционные зависимости $f_{тр.}=f(T_{тр.})$ были получены из экспериментальных данных, приведённых в работе [2] (табл. 1).

Проверка корректности методики оценки антифрикционных характеристик пар с ТСП с использованием зависимостей $T_{тр.}=f(P,V)$ и $f_{тр.}=f(T_{тр.})$ для пары с ТСП ВНИИ НП 212, работающей в вакууме, показала удовлетворительные результаты – 15,4%, несмотря на выход значений P и V за рассмотренные пределы варьирования факторов [4].

[1] Хопин П.Н. Комплексная оценка работоспособности пар трения с твёрдосмазочными покрытиями в различных условиях функционирования. М.: МАТИ, 2012. 255 с.

[2] Сентюрихина Л.Н., Опарина Е.М. Твёрдые дисульфид - молибденовые смазки. М.: Химия, 1966. 152с.

[3] Хопин П.Н. Оценка антифрикционных характеристик пар трения с твёрдосмазочными покрытиями для различных условий функционирования // Трение и износ. 2015. Т.36, №5, с.491-498.

[4] Ярош В.М., Моисеев А.А., Броневец М.А. Исследование материалов на трение и износ в открытом космическом пространстве на орбите вокруг Луны //Трение и износ. -2003 (24), №6, с.626-635.

НАНОКОМПОЗИТНАЯ СТРУКТУРА АЛМАЗОПОДОБНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ЛЕГИРОВАННЫХ МЕТАЛЛАМИ ГРУППЫ ХРОМА, И ИХ ТРИБОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ

¹Хрущов М.М. (michel_x@mail.ru), ^{1,2}Левин И.С., ¹Марченко Е.А.,
¹Шальнов С.А., ¹Шергунов В.А.

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

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

Проведены результаты исследований алмазоподобных углеродных покрытий, полученных методами магнетронного реактивного распыления в атмосферах различного состава (а-С:Н:Cr), плазмохимического осаждения в присутствии газообразных кремнийорганических прекурсоров (а-С:Н:Mo) и магнетронного ионного распыления составной мишени (а-С:Н:W).

Ключевые слова: алмазоподобные плазменные покрытия, легирование, хром, молибден, вольфрам, нанокompозитная структура, трибологические свойства.

Целью работы было установление характера влияния атомно-кристаллической структуры и особенностей фазового состава на физические свойства (трибологические и механические характеристики) алмазоподобных углеродных покрытий, легированных металлами VI A группы. Проведено комплексное изучение покрытий, включавшее исследование методами рентгеновской дифрактометрии, микрорентгеноспектрального анализа, инструментального наноиндентирования,

спектроскопии комбинационного рассеяния и трибологические испытания при трении на воздухе в условиях несмазанного контакта в геометрии «диск-сфера».

В покрытиях а-С:Н:Cr при напылении в смеси ацетилен-азот установлено формирование нанокompозитной структуры на основе включений (ОКР) хрома размером ~10-15 нм, а также наночастиц карбидных и нитридных фаз хрома размером менее 1 нм. Для покрытий, легированных Mo и W,

картина рентгеновского рассеяния указывают на формирование рентгеноаморфной структуры. Для покрытий а-С:Н:Мо она представляет собой смесь частиц молибдена, и поскольку при синтезе покрытий использовали кремнийорганику, его карбидных и силицидных фаз размером менее 0,5 нм, а в покрытиях а-С:Н:W – наночастиц вольфрама и его карбидных фаз. Результаты по определению фазового и химического состава покрытий представлены в таблице.

Результаты трибологических испытаний некоторых образцов приведены на рис. 1.

В ходе исследования была выявлена корреляция между структурным состоянием покрытий и их трибологическими свойствами. Наиболее высокими трибологическими характеристиками (высокая работоспособность и $f < 0,1$) обладали покрытия, легированные хромом, содержавшие наноразмерные металлические включения размером > 10 нм, тогда как в рентгеноаморфных покрытиях, легированных Мо и W, где размер ОКР был существенно ниже 1 нм, трибологические характеристики были существенно ниже. Легированные вольфрамом алмазоподобные покрытия, хотя и показали достаточно высокую работоспособность, имели коэффициент трения на уровне $0,2-0,4$. Наиболее низкими антифрикционными свойствами и низкой фрикционно-усталостной долговечностью обладали покрытия а-С:Н:Мо, что, по-видимому, можно связать с присутствием в них включений силицидных фаз молибдена. Высокие трибологические характеристики позволяют считать покрытия а-С:Н:Cr перспективными для использования при работе в условиях высоких контактных нагрузок.

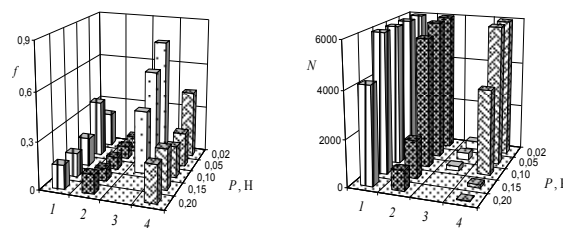


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения f и числа циклов до начала разрушения N от нагрузки для покрытий, нанесенных на сталь ХН35ВТ:

1 – а-С:Н:Cr в чистом C_2H_2 , 2 – а-С:Н:Cr в смеси с 20 % C_2H_2+80 % N_2 , 3 – а-С:Н:Мо; 4 – а-С:Н:W.

Таблица. Фазовый состав и относительная доля фаз в исследованных покрытиях

№ обр.	Тип покрытия	Состав рабочей атмосферы	Фазовый состав
1	а-С:Н:Cr	Ar+C ₂ H ₂	Cr, Cr ₂₃ C ₆
2		80 C ₂ H ₂ +20 N ₂	Cr, Cr ₂₃ C ₆
3		60 C ₂ H ₂ +40 N ₂	Cr, Cr ₇ C ₃ , Cr ₂ N
4		40 C ₂ H ₂ +60 N ₂	Cr, Cr ₇ C ₃ , CrN
5		20 C ₂ H ₂ +80 N ₂	Cr, Cr ₃ C ₂ , CrN
6		20 C ₂ H ₂ +80 возд.	Cr, Cr ₂ O _{2,4} , Cr ₂ N
7		20 C ₂ H ₂ +80 возд.	Cr, Cr ₂ O _{2,4} , Cr ₂ N
8		20 C ₂ H ₂ +80 возд.	Cr, Cr ₂ O _{2,4} , Cr ₂ N
9	а-С:Н:W	Ar+C ₂ H ₂	W, WC, W ₂ C
10	а-С:Н:W	Ar	W, WC, W ₂ C
11	а-С:Н:Si:Mo	PPMS	Mo, Mo ₂ C, Mo ₃ Si, Mo ₅ Si ₃

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-08-05264).

ОСОБЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ТРЕНИИ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ ТОЛЩИНОЙ < 500 нм

¹Хрущов М.М. (michel_x@mail.ru), ¹Марченко Е.А., ^{1,2}Антонова О.С., ¹Токарев Д.А.

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

²Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН, Москва, Россия.

Описаны результаты исследования поверхностных повреждений на дорожках трения алмазоподобных покрытий, имеющих разную толщину, состав и полученных с использованием разных вакуумных ионно-плазменных технологий.

Ключевые слова: алмазоподобные покрытия, трение и износ, трибологические испытания, разрушение поверхности дорожек трения.

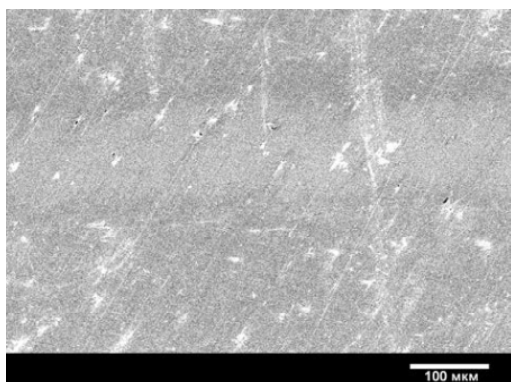
Исследованы особенности морфологии дорожек трения после трибологических испытаний ряда алмазоподобных покрытий.

При исследовании дорожек трения в ряде относительно «толстых» покрытий, имеющих толщину ~ нескольких мкм, авторам удалось обнаружить наличие следов фрикционно-усталостного разрушения (рис. 1).

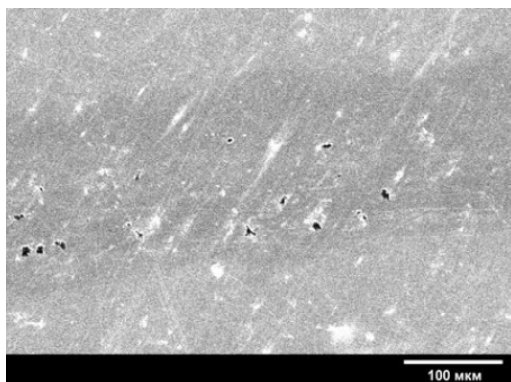
Установлено, что в тонких (< 500 нм) алмазоподобных покрытиях, полученных с использова-

нием вакуумно-дуговой технологии [1], трибологические свойства которых исследовали в работе [2], локальные повреждения на дорожках трения, ведущие к усталостным повреждениям, развиваются по границам зерен подложки (рис. 2–3), что связано с тем, что поверхность покрытия фактически «наследует» зёрненную структуру материала основы. Было установлено, что процессы разрушения при трении в таких покрытиях зарождаются в области границ и стыков зерен подложки.

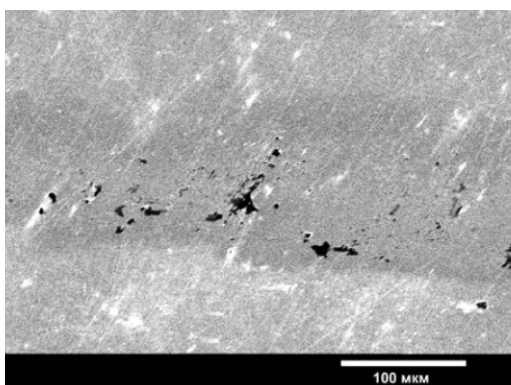
В то же время, в относительно «тонких» (300...500 нм) покрытиях, в которых поверхность покрытия, как оказалось, фактически «наследует» зеренную структуру материала основы, было установлено, что процессы разрушения при трении зарождаются в области границ и стыков зерен подложки.



а) $P = 0,05 \text{ Н}$ ($N_{\text{max}} > 6000$)



б) $P = 0,10 \text{ Н}$ ($N_{\text{max}} = 300$)



в) $P = 0,15 \text{ Н}$ ($N_{\text{max}} = 100$)

Рис. 1 Увеличение числа локальных фрикционно-усталостных разрушений с ростом нагрузки на дорожке трения легированного хромом покрытия, полученного в активной смеси с 85 об. % воздуха:
(а) – 0,02; (б) – 0,05; (в) – 0,10 Н.

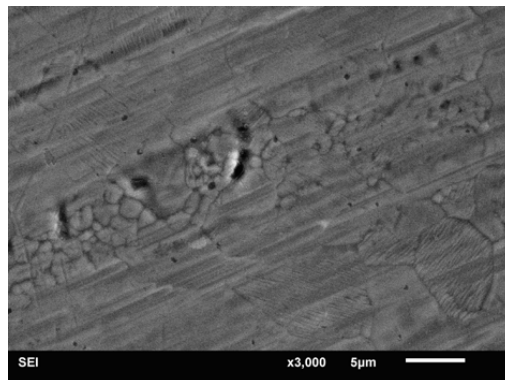


Рис. 2. Начало процесса разрушения покрытия отслаиванием на дорожке трения вакуумно-дугового АПП толщиной 300 нм. Участки покрытия, лежащие над зернами подложки разбиты на более мелкие зерна и систему пор, располагающихся по границам зерен подложки.

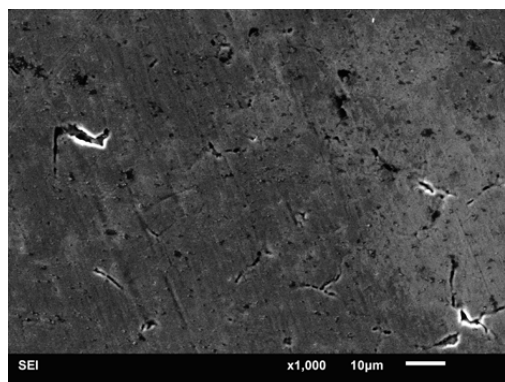


Рис. 3. Видны трещины и мелкие поры, развивающиеся по границам зерен в тонком вакуумно-дуговом покрытии, легированном азотом. Заметны отслоившиеся за счет раскрытия краев трещин участки покрытия и стык границ трех зерен справа в центре снимка

Отмечены также существенные отличия в характере поверхностных разрушений, имеющих место на дорожках трения алмазоподобных покрытий, легированных кремнием и сочетанием кремний-молибден, исследованных в [3] (рис. 4). Обсуждаются возможные причины, приводящие к подобным отличиям в поведении покрытий.

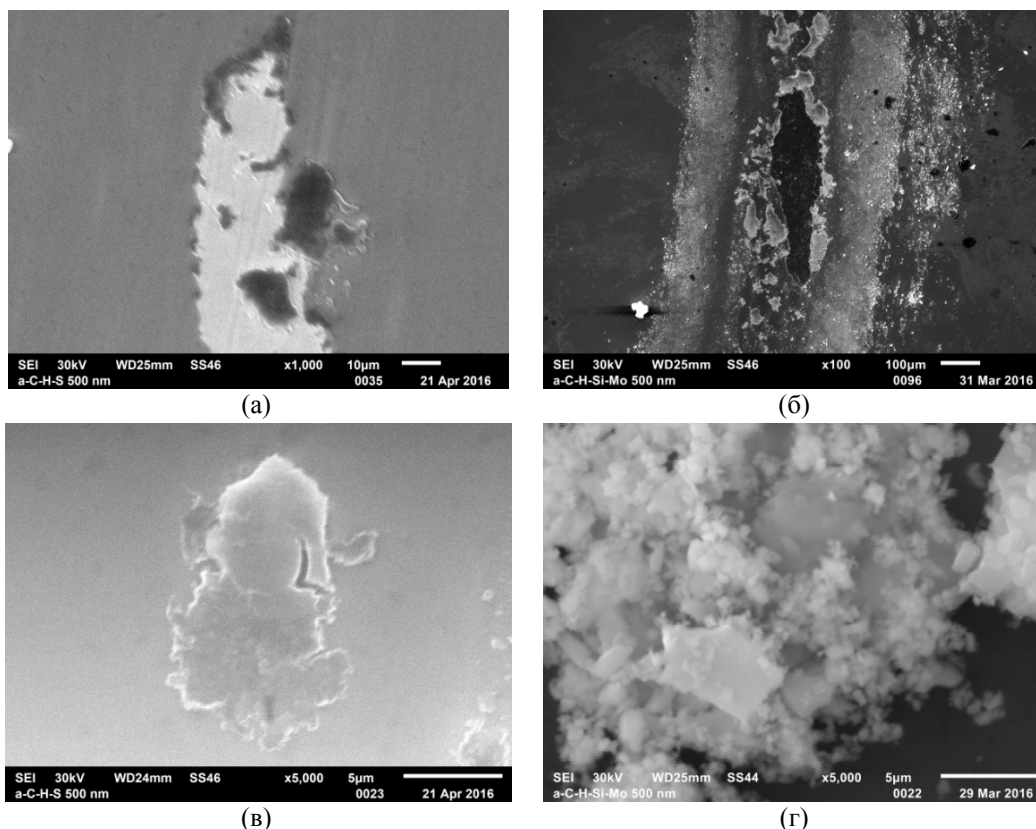


Рис. 4. Участки дорожки трения покрытий а-С:Н:Si:O (а) и а-С:Н:Si:Mo:O (б), вид продуктов разрушения (частиц износа) соответствующих покрытий (в, г), соответственно.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-08-05264).

[1] Башков В.М., Беляева А.О., Седых И.С., Токарев Д.А. Исследование физико-химических параметров алмазоподобных покрытий, полученных методами электродугового физического осаждения с сепарацией плазмы // Нанотехнологии. — 2013, № 11, 35-38

[2] Хрушов М. М., Марченко Е. А., Левин И. С., Атаманов М.В., Токарев Д. А.. Микроструктурное состояние и трибологические свойства легированных алмазоподобных покрытий и нанокомпозитов // Науч. труды IV Межд. конф. "Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении" — М. ИД Спектр. — 2015, 262–264
 [3] Левин И.С., Хрушов М.М., Марченко Е.А., Авдохина В.М. Влияние легирования на структуру и особенности трибологического поведения вакуумных алмазоподобных покрытий // Вестник Моск. ун-та. Сер. 3. — 2016, № 2, 46–52.

ТРИБОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ

Цветков О.Н. (tsvetkovon@vniinp.ru), Черемискин А.Л.

ОАО «ВНИИ НП», Москва, Россия.

Предложен и апробирован метод оценки противоизносных свойств и коэффициента трения смазочных масел с применением машины трения СМТ-1. На примере моторных и некоторых базовых масел показана дифференциация показателей износа роликового механизма в зависимости от состава масел. Метод рекомендован для сравнительных испытаний смазочных масел, работающих в условиях граничной и эластогидродинамической смазки.

Ключевые слова: трибологические свойства, трибометр, износ, смазочные масла.

Масловедение, объединяющее химию, технологию, производство и применение смазочных материалов, уделяет трибологии значительное внимание, поскольку трибологические методы исследований и испытаний позволяют объективно оценивать способность разрабатываемого или модернизируемого смазочного материала разделять и

модифицировать трущиеся поверхности машин и механизмов [1].

Трибологическая модель устанавливает износ как функцию геометрии поверхности, нагрузки, адсорбционных сил и влияния третьего тела — смазки [2]. В стандартных условиях, когда начальная геометрия поверхности, нагрузка и адсорбци-

онные силы в первом приближении постоянны, имеется возможность выявлять влияние смазочного материала на изнашивание трибоповерхностей, что и используется при испытаниях смазочных масел для подвижной техники в машинах трения и на стендах с полноразмерными агрегатами. В итоге удаётся определять износ трибоузлов как функцию консолидированных свойств смазочного масла в практических параметрах давлений, температур, скоростей сдвига и материала поверхностей. Данная концепция имеет большое значение в масловедении для развития теории смазочного масла, описывающей связь химического состава с его эксплуатационными свойствами, обеспечивающими надежность работы машин и механизмов. При испытаниях смазочных масел, маркируемых по межгосударственным стандартам ГОСТ 17479.1-4, а также компрессорных, турбинных, газотурбинных и холодильных масел широкое применение находят методы оценки трибологических характеристик на четырехшариковой машине трения по ГОСТ 9490, на шестерённых стендах FZG или IAE, на различных трибометрах и иных установках [1].

Среди трибометров машины трения типа СМТ-1 нечасто используются при испытаниях смазочных масел для современной техники, хотя у них есть возможность реализовать линейный и дуговой плоскостной контакты, которые можно использовать для моделирования износа различных пар трения. Тем более, материалы самих пар можно легко варьировать, например, использовать серый чугун для моделирования износов поршневых колец судовых двигателей или сталь для имитации условий работы газораспределительных механизмов на паре подвижный – неподвижный ролик или бронзовые колодки для оценки потенциального износа вкладышей шатунных подшипников дизелей. В определённой мере широкому использованию стенда СМТ-1 препятствует отсутствие стандартных методов испытаний. Квалификационный метод 540/1-75 применяется при испытаниях смазочных масел для автоматических трансмиссий, оценивая установившийся коэффициент трения и износ неподвижного ролика по ширине полосы. РД 50-662-88 регламентируют определение показателей износа материалов по убыванию массы или по измерению линейных размеров роликов, однако не предусматривает каких либо условий проведения испытаний смазочных материалов.

Нами проведены исследования по оценке трибологических свойств смазочных масел с использованием условий испытаний, аналогичных квалификационному методу 540/1-75 с учётом рекомендаций РД 50-662-88, руководствуясь определением коэффициента трения и показателей износа по ширине полосы и убыванию массы подвижного и неподвижного роликов. Конкретные условия: двухроликовый, Ст-45, твёрдость 80, шероховатость 0,5-0,7 мкм, трибометр СМТ-1 в режиме скольжения, продолжительность 3 ч, частота вращения 300 мин.⁻¹, нагрузка 1570 Н(160 кгс), определение массы роликов с точностью до 0,1 мг,

линейных размеров до 0,01 мм. В ходе испытаний контактные давления постепенно снижаются от сотен до десятков МПа и в целом отражают условия граничной и эластогидродинамической смазки, характерной для цилиндрично-поршневой группы, газораспределительного механизма, поршневых подшипников, подшипников качения, узлов трения гидромоторов и установившихся режимов зубчатых передач. Статистические испытания принятого метода показали среднюю квадратичную ошибку по измеряемому массовым и линейным показателям не более 10% от определяемой величины.

В качестве объектов исследований использовали моторные и некоторые иные смазочные и базовые масла. Моторные масла обнаружили заметную зависимость противоизносных свойств от вязкости и их состава. Масло SAE 5W30 ACEA C3, одно из наиболее распространённых для смазывания бензиновых двигателей и дизелей легковых и лёгких грузовых автомобилей, имеет удовлетворительные показатели по износу и коэффициенту трения. Масло судовое М-20Г₂СД и для транспортных дизелей М-5з/16Д₂ имеют минимальный износ, а по коэффициенту трения примерно аналогичны маслу SAE 5W30. Трибоактивные добавки улучшают противоизносные свойства масла SAE 5W30, не влияя при этом на коэффициент трения. Одна из добавок – АРВК существенно улучшает противоизносные свойства масла SAE 5W30, при этом подвижный ролик не только не изнашивался, но и показал увеличение массы. Масло МС-20, применяемое в поршневых авиационных двигателях и в качестве компонента газотурбинных масел для турбовинтовых двигателей, выявило противоизносные свойства, втрое меньшие, чем у масла SAE 5W30 при меньшем почти в два раза коэффициенте трения. ПЭТ, являющийся основой газотурбинных масел для турбореактивных и турбовальных двигателей, а также масел для холодильных машин, работающих на R-134а, обладает весьма низким коэффициентом трения и противоизносными свойствами, близкими к маслу SAE 5W30. Некоторые результаты испытаний масел показаны в таблице. Экологически безопасное рыжиковое масло РМ, потенциально применимое для смазывания механизмов, соприкасающихся с пищевыми продуктами или природой, демонстрирует неожиданно высокий износ роликов при относительно небольшом коэффициенте трения.

Таблица. Трибологические характеристики масел.

Масла	Коэф. трения	Износ, мг
SAE 5W30	0,095	14,9
5W30+АРВК	0,090	3,3
М-20Г ₂ СД	0,091	1,7
М-5з/16Д ₂	0,090	1,2
МС-20	0,044	4,6
ПЭТ	0,036	12,5
РМ	0,055	149,6

Резюмируя изложенное, можно утверждать, что применённый в данной работе метод оценки трибологических свойств смазочных масел дифференцирует масла по противоизносным свойствам и его можно рекомендовать для сравнительных испытаний моторных, газотурбинных, компрессорных, турбинных и гидравлических масел

вплоть до установления предельных величин износа для отдельных групп масел.

[1] Цветков О.Н. Трибология в масловедении // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2015, № 5, 39-45.

[2] Трибология — машиностроению. Труды десятой юбилейной Всерос. науч.-техн. конф. с участием иностранных специалистов. М.: Перо, 2014. 170 с.

ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СВЯЗИ В УПРУГОМ КОНТАКТЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ С РЕГУЛЯРНЫМИ НЕРОВНОСТЯМИ

Цуканов И.Ю. (ivan.yu.tsukanov@gmail.com), Албагачиев А.Ю.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия.

Рассмотрено влияние геометрических факторов – формы и наличия дополнительной гармоник неровностей на эволюцию параметров упругого контакта – давления и полной силы. Показано, что контактную силу и нормализованное давление для регулярных неровностей при малых нагрузках можно определить непосредственно из их геометрии, что позволяет упростить анализ моделей упругого контакта шероховатых поверхностей.

Ключевые слова: регулярные неровности, упругий контакт, геометрия, форма, контактное давление, контактная сила.

Геометрия контактирующих упругих тел оказывает определяющее влияние на их контактные параметры: эпюру давлений и контактную силу при увеличении площадки контакта. Для поверхностей, форма которой отличается от параболической, уравнения теории Герца не могут быть применены к анализу контактных характеристик при значительных размерах площадки контакта [1]. Для одиночного контакта неровности, выраженной степенной функцией, замкнутое решение для плоской задачи в виде ряда получено в работе [2]. При контакте металлической поверхности с упругим полимером неровности более жесткого тела могут внедряться на значительную глубину, при которой влияние соседних неровностей может сильно изменить эпюру давлений [3]. В связи с этим интерес представляет рассмотрение геометрической нелинейности в связи с периодичностью контактной задачи. Кроме того, важным является вопрос взаимного влияния неровностей различных уровней («масштабов»), т.е. например шероховатости и волнистости.

Для анализа рассмотренных геометрических эффектов была решена задача о контакте регулярной шероховатой поверхности, имеющей различную геометрию, и полуплоскости в упругой постановке без учета трения.

Регулярные неровности моделировали двумя гармониками:

$$f(x, m) = w(x, m) + r(x), \quad (1)$$

где гармоника $w(x, m)$ имеет произвольную форму волн и описывается геометрически обобщенной синусоидой:

$$w(x, m) = \frac{H_w(m+1) \cos(\pi x / b_w)}{|m \cos(\pi x / b_w)| + 1}, \quad (2)$$

а гармоника $r(x)$ – синусоидой:

$$r(x) = H_r \cos(\pi x / b_r) = H_r \cos(\pi n x / b_w). \quad (3)$$

В зависимостях (1-3) H_w, H_r – высоты неровностей двух гармоник; b_w, b_r – ширина неровностей по средней линии, m – параметр формы; $n = b_w/b_r$ – волновой коэффициент. Графики функции $f(x)$ приведены на рис. 1.

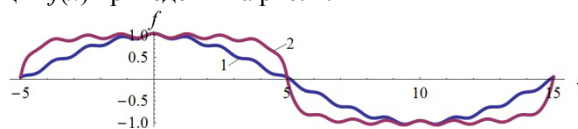


Рис. 1. Графики профиля регулярной шероховатости при $n = 16$; $m = 0$ (1) и $m = 10$ (2).

При решении задачи был использован математический подход Дж.М. Блока и Л.М. Кира [4] для плоской задачи теории упругости. Применяя принцип суперпозиции, были получены следующие выражения для определения контактного давления для составляющих неровностей различных гармоник.

$$p(x, m) = p_w(x, m) + p_r(x); \quad (4)$$

$$p_w(x, m) = \frac{(m+1)^2}{(|m \cos(\pi x / b_w)| + 1)^2 (m \cos(\pi a / b_w) + 1)} \times \frac{\sqrt{2\pi H_w E^*}}{2b_w} |\cos(\pi x / 2b_w)| \sqrt{\cos(\pi x / b_w) - \cos(\pi a / b_w)}; \quad (5)$$

$$p_r(x) = \frac{E^* H_r n^2}{2} \sqrt{\operatorname{tg}\left(\frac{\pi a}{2b_w}\right)^2 - \operatorname{tg}\left(\frac{\pi x}{2b_w}\right)^2} \times \sum_{i=1}^n \frac{k_i}{\left(\operatorname{tg}(\pi a / 2b_w)^2 + 1\right)^{i/2} \left(\operatorname{tg}(\pi x / 2b_w)^2 + 1\right)^i}, \quad (6)$$

где a – полудлина контакта; E^* – приведенный мо-

дуль упругости; i – степень дроби при разложении приведенного выражения для производной разности перемещений внутри площадки контакта на простые дроби; k_i – коэффициенты разложения. Для четного n данное выражение имеет вид:

$$-n^2 \frac{2u}{1+u^2} \frac{1-u^2}{1+u^2} \prod_{k=1}^{\frac{n-2}{2}} \left(1 - \frac{4u^2}{(1+u^2)^2 \sin^2(2\pi k/n)} \right), \quad (7)$$

где $u = \operatorname{tg}(\xi/2)$; $v = \operatorname{tg}(x/2)$; $\alpha = \operatorname{tg}(a/2)$; ξ – локальная координата внутри площадки контакта.

Формула (5) адекватна на интервалах $a \leq 0.5b_w$ при $m < 10$ и $a \leq 0.3b_w$ при любом m , в том случае если $b_w \gg H_w$. На интервале $a > 0.5b_w$ формула (5) адекватна только при $m < 1$. Формула (6) адекватна на интервале $a < b_w/n$. Полная нагрузка определяется численным интегрированием формулы (4) с использованием компонент (5) и (6):

$$P = \int_{-a}^a p(x) dx. \quad (8)$$

Для компоненты первой гармоники с произвольной формой волн $w(x, m)$ на интервале $a \leq 0.5b_w$ было получено замкнутое выражение для определения полной нагрузки:

$$P_w(a, m) = \frac{\pi H_w E^* (m+1)^{1/2} \sin^2(\pi a / 2b_w)}{(m \cos(\pi a / b_w) + 1)^{3/2}}. \quad (9)$$

Анализ эпюр давлений, полученных по формулам (4-6) показал, что распределение давлений сильно чувствительно к градиенту формы неровности.

На рис. 2. представлены зависимости доли длины контакта $a' = a/b_w$ плоской и регулярной волнистой поверхности от среднего (нормализованного) давления $p'_w = P_w / \pi H_w E^*$ для одномасштабной волнистости $w(x, m)$ с произвольной формой волн.

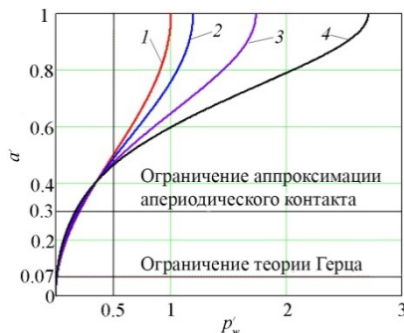


Рис. 2. Графики зависимостей доли длины контакта от нормализованного давления: (1) $m = 0$; (2) $m = 0.1$; (3) $m = 0.3$; (4) $m = 0.5$.

Из рис. 2. видно, что для произвольной формы неровности теория Герца, предполагающая аппроксимацию параболой области, близкой к вершине неровности, дает хороший результат только при $a \leq 0.07b_w$. В то же время решение (5) хорошо аппроксимирует контакт единичной неровности на большем интервале $a \leq 0.3b_w$, что по-

зволяет использовать его для анализа аперидического контакта. Рис. 2 также показывает, что с ростом m полная нагрузка, необходимая для создания зоны контакта $a \leq 0.4b_w$ падает, а для деформирования при $a > 0.4b_w$ – резко возрастает. Это связано с резким изменением градиента формы неровности в совокупности с эффектом взаимного влияния.

Следует отметить, что в отсутствие сильного эффекта взаимного влияния ($a \leq 0.3b_w$) при $m \leq 3$ зависимость полной силы от полудлины контакта пропорциональна гладкой кривой (2), описывающей геометрию неровности. Данное геометрическое соотношение можно представить в следующем виде:

$$\frac{\partial P_w}{\partial a} \approx 0.5\pi K E^* \nabla_w, \quad (10)$$

где K – коэффициент пропорциональности, в среднем равный $\approx 1,04$. ∇_w – градиент формы неровности.

Анализ вклада второй гармоники неровностей $r(x)$ (формулы (6-7)) показал, что суммарное распределение давлений $p(x)$ может быть определено суперпозицией известных решений для отдельных гармоник, не только при полном контакте ($a = b_w$) [1], но также при начальном ($a < 0.4b_w$) и почти полном ($b_w - 0.4b_w < a < b_w$) контакте. Таким образом, принимая во внимание данный результат, в совокупности с выражением (10) можно заключить, что для плоской задачи и малых нагрузок контактная сила линейно зависит от геометрии неровности.

На рис. 3. показана зависимость доли длины контакта плоской и регулярной волнистой поверхности от среднего давления для волнистости с двумя гармониками $f(x, m)$ при $a' = 1/n$ и $m = 0$ (кривые 2, 3) в сравнении с зависимостью для одномасштабной волнистости при $m = 0$ (кривая 1).

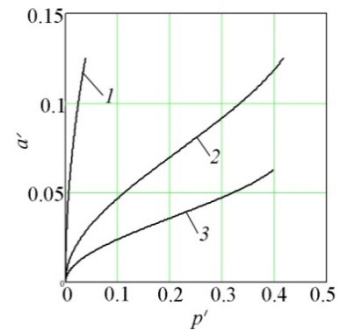


Рис. 3. Зависимости доли длины контакта от среднего давления: (2) $n = 8$; (3) $n = 16$.

Рис. 3 показывает, что при начальном контакте плоской поверхности с двухмасштабной волнистостью наблюдается линейный участок кривой, отражающий пропорциональное изменение длины контакта в зависимости от приложенной нагрузки. Т.е. при малых нагрузках закон трения Амонтона-Кулона может выполняться не только для случайно шероховатых поверхностей, но и для квазирегулярных, и иметь в основе многомасштабность неровностей.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (проект RFMEFI57815X0108).

- [1] Джонсон К. Механика контактного взаимодействия / Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 510 с.
 [2] Штаерман И.Я. Контактная задача теории упругости. М.-Л.: Гостехиздат, 1949. 270 с.
 [3] Горячева И.Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. 478 с.

К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ МОДЕЛИ НЕРОВНОСТИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ В ИНЖЕНЕРНОМ АНАЛИЗЕ КОНТАКТА ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Цуканов И.Ю. (ivan.yu.tsukanov@gmail.com), Угурчиев У.Х., Новикова Н.Н.

Институт машиноведения РАН, Москва, Россия;

Представлены зависимости для учета формы неровности в классических моделях упругого взаимодействия шероховатых поверхностей, включающих модель контакта единичных неровностей и распределение неровностей по высоте. Также рассмотрен способ экспериментальной проверки полученных зависимостей.

Ключевые слова: шероховатость, неровности, упругий контакт, форма, контактное сближение, контактная сила.

Классические модели контактного взаимодействия шероховатых поверхностей [1, 2] включают две составляющие: единичный контакт и распределение выступов по высоте, которое имеет вероятностный характер. Традиционно первая составляющая включает модельное описание неровности в виде выступов правильной формы: сфер, конусов, параболоидов и т.д. Форма неровности оказывает существенное влияние на контактные параметры единичной неровности, поэтому интерес представляют параметрические зависимости контактных параметров для единичной неровности произвольной формы.

Классические модели контакта предполагают выражение основных контактных характеристик единичной неровности – силы и площади контакта через величину контактного сближения δ . Поэтому, как правило, рассматривают осесимметричный контакт эквивалентной неровности и плоской поверхности [1, 2, 3], где данные параметры можно выразить явно. Для малых упругих площадок в упругопластических моделях с гладкими неровностями используют теорию Герца [1, 2, 3]. Для полимеров с низким модулем упругости площадки контакта могут быть сравнимыми с размерами неровности и допущения теории Герца могут не выполняться.

При условии, что ширина неровности значительно больше ее высоты, ее градиент считается достаточно малым для применения аппроксимации полупространством. В таком случае для определения сближения и силы в контакте тел вращения могут быть применены уравнения Снеддона [4]. Для профиля неровности, выраженного степенной функцией в работе [4] были получены данные зависимости. Однако сложность параметризации данных выражений приводит к затруднению использования их в инженерных моделях шерохо-

ватого контакта.

Более гибкую параметризацию может обеспечить функция следующего вида (рис. 1):

$$z(r, m) = \frac{H(m+1) \cos(\pi r / b)}{m \cos(\pi r / b) + 1}, \quad (1)$$

где H – высота неровности; b – ширина (диаметр) неровности по средней линии, m – параметр формы.

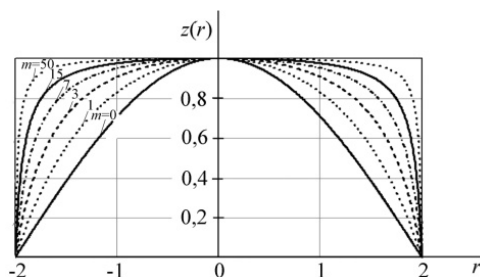


Рис. 1. Графики функции (1) (сечения неровности) при различном параметре m .

Для радиуса контакта $a < 0.3b$ с применением уравнений Снеддона [4] были получены приближенные зависимости для расчета контактной силы и сближения эквивалентной неровности и плоской поверхности:

$$P(a, m) \approx \frac{1.6\pi H E^* (m+1)^{1/2} \sin^2(\pi a / 2b) a}{(m \cos(\pi a / b) + 1)^{3/2}}. \quad (2)$$

$$\delta(a, m) \approx 0.63 H \pi \left[1 - \frac{(m+1) \cos(\pi a / b)}{m \cos(\pi a / b) + 1} \right]. \quad (3)$$

Следует обратить внимание, что выражение в квадратных скобках в формуле (3) идентично уравнению функции формы неровности в контактной задаче. Необходимо отметить, что выражение (2) можно использовать при любом m , в то время как погрешность формулы (3) значительно увели-

чивается при $m > 3$. Для определения сближения δ получено более точное выражение, действительное при любом m , но выразить из него величину a можно только численным решением, что затрудняет его использование:

$$\delta(a, m) \approx \frac{1.2\pi H(m+1)^{1/2} \sin^2(\pi a / 2b)}{(m \cos(\pi a / b) + 1)^{3/2}}. \quad (4)$$

Из формулы (3) выражение для радиуса контакта a через сближение δ можно получить в явном виде:

$$a = \frac{b}{\pi} \left(\pi - \arccos \left(\frac{\delta - 0.63\pi H}{m\delta + 0.63\pi H} \right) \right), \quad (5)$$

соответственно подстановкой (5) в (2) может быть найдена аналитическая зависимость полной нагрузки от сближения, используемая в моделях шероховатого контакта.

Для проверки полученной зависимости проводился эксперимент с использованием осесимметричных упругих тел, имеющих различную форму. Данные тела моделировали единичную неровность и были напечатаны на 3D принтере Picaso 3D designer. Использовали упругий пластик Flex фирмы REC. Модуль Юнга материала образцов – 30 МПа. Для получения деталей из пластика были выбраны следующие оптимальные режимы печати: температура экструдера – 240 °С; температура стола – 30 °С; коэффициент подачи – 0,97; процент заполнения – 85%; скорость печати 30 мм/с. Необходимым условием печати из материала Flex являлось строго вертикальная подача прутка, что достигалось внешней установкой катушки.

Образцы были напечатаны при $m = 0; 1; 7$. Размеры образцов: диаметр $b = 15$ мм; высота криволинейной части $H = 4$ мм; высота цилиндрической части – 5 мм. Фотография образцов представлена на рис. 2.

Образцы испытывали на сжатие на установке ТОЧПРИБОР ИР 5081-20 в контакте с плоской поверхностью (рис. 3). Записывались значения нагрузки, измеряемой динамометром и перемещения плоской поверхности.

Рис. 4 показывает, что при малом m результаты эксперимента хорошо соотносятся с данными, рассчитанными по формулам (2) и (5), что позволяет напрямую использовать разработанную модель единичной неровности произвольной формы в моделях стохастического шероховатого контакта. При $m = 7$ наблюдается значительное расхождение результатов, связанное с погрешностью формулы (3). Поэтому в таких случаях необходимо вводить поправочный коэффициент или определять величину a численно, используя более точную формулу (4).

Сравнение экспериментальных данных с результатами расчета по формулам (2) и (5) приведены на рис. 4.

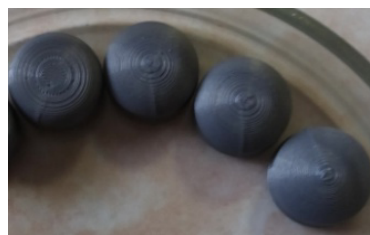


Рис. 2. Фотографии образцов, моделирующих единичную неровность.



Рис. 3. Испытание образца.

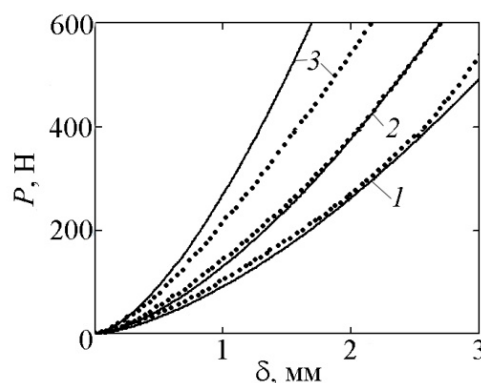


Рис. 4. Кривые нагрузка – сближение согласно модели (сплошные линии) и результатам эксперимента (штриховые линии): 1 – $m = 0$; 2 – $m = 1$; 3 – $m = 7$.

Полученные результаты могут быть также применены для анализа первичных данных при определении свойств компактных материалов микро- и наноиндентированием криволинейным индентором, а также в атомно-силовой микроскопии.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (проект RFMEFI57815X0108).

- [1] Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.
- [2] Greenwood J.A., Williamson J.B.R. Contact of nominally flat surfaces. Proc. Roy. Soc., 1966. p. 300.
- [3] Цуканов И.Ю. Параметрическая инженерная модель упругопластического контакта шероховатых поверхностей с учетом упрочнения материала // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 12. С. 17-25.
- [4] Sneddon I.N. The relation between load and penetration in the axisymmetric Boussinesq problem for a punch of arbitrary profile // Int. J. Eng. Sci. 1965. T. 3. С. 47-57.

РАЗВИТИЕ СЛОЯ С ВЫСОКИМ ГРАДИЕНТОМ СВОЙСТВ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ

Ченцов А.В. (chentsov@ipmnet.ru)

Институт проблем механики РАН, Москва, Россия.

В процессах обработки материалов давлением вблизи поверхностей с высокими удельными силами трения часто формируется тонкий слой материала с сильно измененными (по сравнению с исходным состоянием) свойствами материала. В настоящей работе излагается общий экспериментально – теоретический подход к построению модели материала, учитывающий характерные особенности процесса пластической деформации в этом слое.

Ключевые слова: обработка давлением, поверхностный слой, поверхность трения.

В процессах обработки материалов давлением в окрестности поверхностей с высокими удельными силами трения обычно формируется тонкий слой, свойства материала в котором существенно отличаются от свойств материала в исходном состоянии и от свойств материала в основном объеме изделия после процесса обработки давлением, например [1-3]. Основными факторами, определяющими свойства материала в этом слое, являются пластическая деформация и температура [4]. Теоретические исследования, например [5], показывают, что при применении закона максимального трения пластические деформации действительно локализируются около поверхности трения (то есть находятся в соответствии с отмеченными выше экспериментальными результатами). При применении модели идеально жесткопластического материала закон максимального трения определяется условием, что удельные силы трения при проскальзывании равны пределу текучести при чистом сдвиге. Однако, непосредственное применение результатов работы [5] к анализу процесса формирования тонкого слоя материала с сильно измененными свойствами вблизи поверхности трения невозможно, так как теоретическая эквивалентная скорость деформации (квадратичный инвариант тензора скорости деформации) стремится к бесконечности при приближении к поверхности максимального трения. В частности, при $s \rightarrow 0$ эквивалентная скорость деформации ξ_{eq} выражается как

$$\xi_{eq} = \frac{D}{\sqrt{s}} + o\left(\frac{1}{\sqrt{s}}\right). \quad (1)$$

Здесь D – коэффициент интенсивности скорости деформации, s – расстояние до поверхности максимального трения. Из (1) очевидно, что коэффициент интенсивности скорости деформации контролирует величину эквивалентной скорости деформации в непосредственной окрестности поверхности максимального трения. В связи с этим, в [6] предлагается использовать коэффициент интенсивности скорости деформации для предсказания формирования тонкого слоя с сильно измененными свойствами вблизи поверхностей трения в процессах обработки материалов давлением. Для развития этого подхода необходимо разработать и

выполнить экспериментальную программу, результаты которой позволили бы связать коэффициент интенсивности скорости деформации и параметры, характеризующие свойства тонкого слоя материала с сильно измененными свойствами вблизи поверхностей трения.

Осесимметричная экструзия через длинную матрицу с небольшими углами конусности является, вероятно, одним из наиболее подходящих процессов для установления связи между коэффициентом интенсивности скорости деформации и параметрами, характеризующими тонкий слой с сильно измененными свойствами материала вблизи поверхности трения. В этом случае приближенное значение коэффициента интенсивности скорости деформации может быть определено из полуаналитического решения [7]. В работе [7] показано, что коэффициент интенсивности скорости деформации зависит от угла конусности матрицы. Таким образом, если коэффициент интенсивности скорости деформации связан со свойствами материала в тонком слое вблизи поверхности трения, то эти свойства также должны зависеть от угла конусности. Сопоставление зависимостей коэффициента интенсивности скорости деформации и параметров, характеризующих свойства материала в тонком слое вблизи поверхностей трения, от угла конусности матрицы должно позволить показать возможность реализации подхода [6]. В настоящей работе исследуется зависимость толщины слоя с сильно измененными свойствами материала вблизи поверхности трения от угла конусности матрицы. На Рис. 1- 3 показана микроструктура материала вблизи поверхности трения после экструзии магниевого сплава через матрицы с углами конусности $\gamma = 5^0$ (рис.1), $\gamma = 10^0$ (рис.2) и $\gamma = 15^0$ (рис.3).

Получена следующая связь толщины слоя с сильно измененными свойствами материала вблизи поверхности трения от угла конусности матрицы: 26μm при $\gamma = 5^0$, 32μm при $\gamma = 10^0$ и 36μm при $\gamma = 15^0$.

Экспериментальные результаты, дополненные теоретическим решением задачи об осесимметричной экструзии через длинную матрицу с небольшими углами конусности в работе [6] составляют экспериментально – теоретический под-

ход к построению модели материала, учитывающий характерные особенности процесса пластической деформации в слое с сильно измененными свойствами материала вблизи поверхности трения.

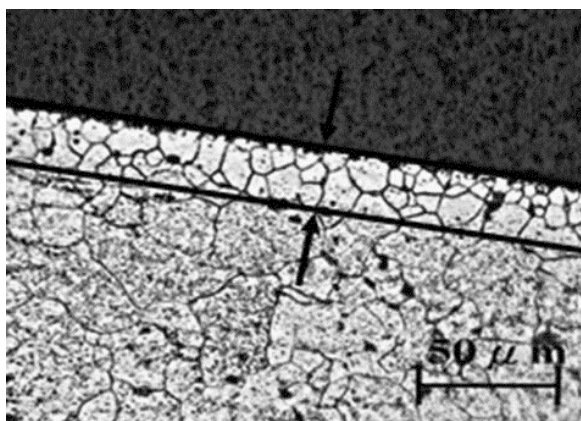


Рис. 1. Микроструктура материала вблизи поверхности трения после экструзии через матрицу с углом конусности $\gamma = 5^\circ$

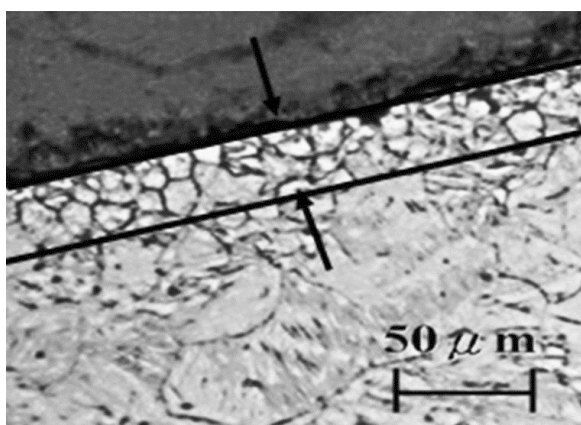


Рис. 2. Микроструктура материала вблизи поверхности трения после экструзии через матрицу с углом конусности $\gamma = 10^\circ$

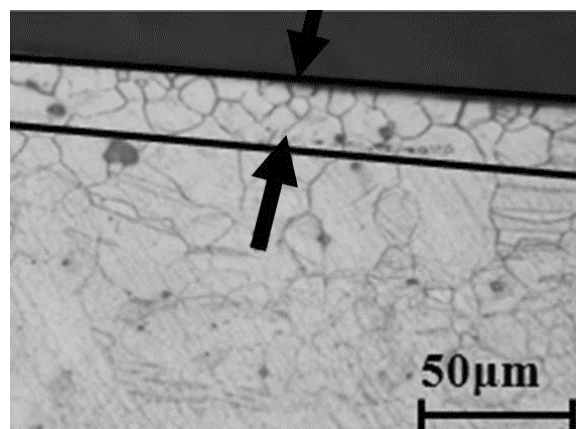


Рис. 3. Микроструктура материала вблизи поверхности трения после экструзии через матрицу с углом конусности $\gamma = 15^\circ$

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №16-49-02026).

- [1] Kajino S., Asakawa M. Effect of “additional shear strain layer” on tensile strength and microstructure of fine drawn wire //J. Mater. Process. Technol. –2006 (177), 704–708
- [2] Трунина Т.А., Коковихин Е.А. Формирование мелкодисперсной структуры в поверхностных слоях стали при комбинированной обработке с применением гидропрессования //Пробл. Машиностр. Надежн. Машин. –2008, № 2, 71–74
- [3] Hwang Y.-M., Huang T.-H., Alexandrov S. Manufacture of gradient microstructures of magnesium alloys using two - stage extrusion dies //Steel Res. Int. –2015 (86), № 8, 956–961
- [4] Griffiths B.J. Mechanisms of white layer generation with reference to machining and deformation processes //Trans. ASME J. Trib. –1987, (109), 525–530
- [5] Alexandrov S., Richmond O. Singular plastic flow fields near surfaces of maximum friction stress //Int. J. Non-Linear Mech. – 2001 (36), № 1, 1–11
- [6] Александров С.Е., Гольдштейн Р.В. К построению определяющих уравнений в тонком слое материала вблизи поверхностей трения в процессах обработки материалов давлением //Докл. РАН. – 2015 (460), № 3, 283–285
- [7] Alexandrov S. The strain rate intensity factor and its applications: a review //Mater. Sci. Forum. – 2009 (623), 1–20

ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОСТРУКТУРНОГО СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

¹Чертовских С.В. (chertovskikh@mail.ru), ¹Шустер Л.Ш., ^{2,3}Мисоченко А.А.,
^{2,3}Столяров В.В.

¹ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия;

²Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия;

³Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия.

Приведены результаты экспериментального исследования влияния измельчения структуры и температуры контакта на триботехнические характеристики сплава $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ с памятью формы, полученного прокаткой с импульсным током и последующим отжигом при различных температурах.

Ключевые слова: триботехнические характеристики, прочность адгезионных связей на срез, молекулярная составляющая коэффициента трения, наноструктура, сплав $Ti_{49,7}Ni_{50,3}$.

Введение.

TiNi-сплавы с эффектом запоминания формы обладают высоким комплексом механических и

функциональных свойств (память формы, сверхупругость, биосовместимость, коррозионная стойкость), особенно в ультрамелкозернистом

(УМЗ) [1] и наноструктурном (НС) [2] состояниях. Триботехнические свойства данных сплавов, изучены в УМЗ состоянии (средний размер зерна $d_{cp} = 250 \div 300$ нм), полученном методом равноканального углового прессования [3], а также в НС состоянии ($d_{cp} \approx 80$ нм), полученном электро-пластической деформацией [4]. Особый интерес представляет определение температурных зависимостей триботехнических характеристик при разном размере зерен. Данная работа посвящена изучению влияния размера зерен и температуры фрикционного контакта на триботехнические характеристики сплава $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$.

Материалы и методы исследования.

В качестве исследуемого материала использовали сплав $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ в форме полосы $2 \times 6 \times 150$ мм³, закаленный в воду после выдержки 0,5 часа при температуре 700° С и имеющий крупнозернистую (КЗ) структуру аустенита (В2-фазы) со средним размером зерен 80 мкм. Для измельчения структуры полосу подвергали прокатке с током [2, 4] до степени деформации $\epsilon = 1,54$ и последующему отжигу при температуре 450, 500 и 550° С в течение 0,5 час. Прокатка выполнена в плоских валках при комнатной температуре, со скоростью 50 мм/с, при минимальном разовом обжатии по толщине 25 мкм. В процессе прокатки для повышения технологической пластичности в зону деформации вводили однополярный импульсный ток плотностью 125 А/мм², частотой 610 Гц и длительностью импульса 160 мкс. После каждого шага прокатки образцы охлаждали в воде, чтобы избежать влияния возможного нагрева. В результате для исследования триботехнических характеристик были получены образцы в следующих структурных состояниях: 1 – КЗ, после закалки; $d_{cp} \approx 80$ мкм; 2 – УМЗ, прокатка + отжиг при 550° С, $d_{cp} \approx 250$ нм; 3 – НС, прокатка + отжиг при 500° С, $d_{cp} \approx 100$ нм; 4 – НС, прокатка + отжиг при 450° С, $d_{cp} \approx 20 \div 30$ нм.

Известно [5], что активным фактором, определяющим схватывание трущихся поверхностей, является отношение тангенциальной прочности τ_n адгезионной связи на срез контактирующих в процессе трения тел и нормального напряжения на контакте p_r . Это отношение (τ_n / p_r) является адгезионной (молекулярной) составляющей коэффициента трения f_M , от которого зависит глубинное деформирование приконтактных слоёв.

В данной работе для оценки триботехнических параметров в условиях пластического контакта ($\tau_{nm}, p_{rn}, f_M = \tau_{nm} / p_{rn}$) использовали экспериментальный метод [3, 4, 5], в основе которого принята физическая модель, которая в первом приближении отражает реальные условия трения и изнашивания на локальном контакте.

В качестве индентора использовали двусторонние сферические цилиндрики (радиусом 2,5 мм и высотой 25 мм) из твёрдосплавного инструментального материала ВК8 (8% Со; 92% WC). Выбор материала индентора был сделан из следующих соображений: ВК8, предпочтительно применяющийся при механической обработке деталей из

титана и его сплавов, имеет достаточно высокие жаропрочность и жаростойкость (до 850...900° С), что позволило оценить триботехнические свойства никелида титана (с различным размером зерен структуры) при повышенных температурах контакта. Образцы для трибологических исследований из сплава $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ имели размеры $2 \times 6 \times 20$ мм³. Шероховатость поверхности образцов и индентора $Ra = 0,63 \div 0,80$ мкм. Угловая скорость вращения индентора вокруг собственной оси составляла $0,1 \text{ с}^{-1}$. Нагрев зоны контакта образца и индентора осуществляли до температуры 150, 350, 550 и 800° С электроконтактным способом. Тривоспытания при заданных температурах фрикционного контакта не превышали 1 мин. Все измерения триботехнических характеристик для каждого состояния при комнатной и повышенных температурах были выполнены на одних и тех же образцах. Достоверные данные о величинах τ_{nm}, p_{rn}, f_M получены при 3-х кратном повторении эксперимента с вероятным отклонением, не превышающим $5 \div 8\%$.

Результаты и их обсуждение.

На рис. 1 представлены температурные зависимости триботехнических параметров τ_{nm}, p_{rn} и f_M , полученные в условиях пластического контакта на образцах сплава $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ с различными размерами зерен.

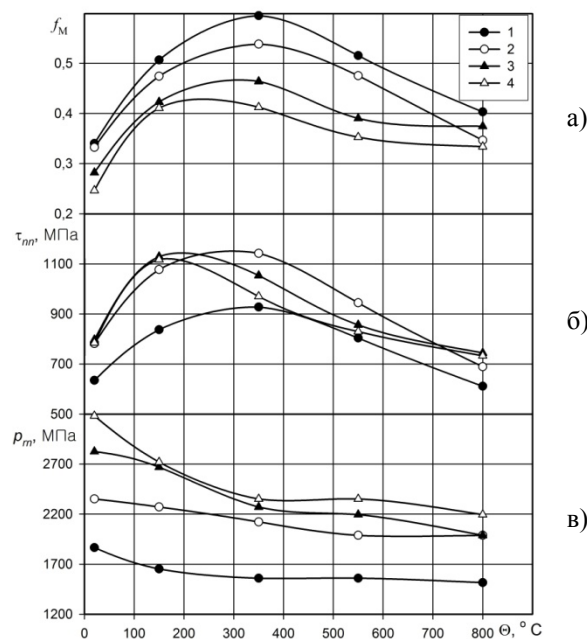


Рис. 1. Влияние температуры контакта на триботехнические характеристики $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$: а) молекулярную составляющую коэффициента трения; б) прочность на срез адгезионных связей; в) нормальные напряжения на контакте. 1 – $d_{cp} \approx 80$ мкм; 2 – $d_{cp} \approx 250$ нм; 3 – $d_{cp} \approx 100$ нм; 4 – $d_{cp} \approx 20 \div 30$ нм

Из рис. 1, б видно, что сдвиговые напряжения τ_{nm} для всех состояний сначала возрастают, достигают максимума, а затем уменьшаются с повышением температуры. При этом соответствующие величины для УМЗ и НС состояний остаются несколько выше, чем для КЗ состояния.

Нормальные напряжения p_{rn} , в отличие от сдвиговых, с повышением температуры контакта для всех состояний исследуемых образцов постоянно уменьшаются (рис. 1, в). Из рис. 1, в видно также, что помимо теплового разупрочнения материала, наблюдается упрочнение, вызванное измельчением структуры, которое существенно повышает предельные нормальные напряжения p_{rn} .

НС материалы имеют повышенную величину p_{rn} (аналог микротвердости), и их неравновесные границы зерен обладают избыточной энергией, что приводит к увеличению τ_{nn} (по сравнению с КЗ состоянием). Но в результате инициирования трением процессов релаксации, возникновения вторичных структур на контакте прочность τ_{nn} адгезионных связей на срез может увеличиваться в меньшей мере, чем величина p_{rn} . В результате этого адгезионная составляющая коэффициента трения f_M может снижаться [3, 4], что и видно на рис. 1, а (значения f_M для никелида титана снижаются с уменьшением размера зерен структуры). Температура Θ контакта, изменяя величины τ_{nn} и p_{rn} , оказывает дополнительное влияние на величину f_M . Максимальные значения f_M для всех структурных состояний наблюдались при температуре 350° С, что может быть связано с локальным переходом структуры из аустенита в мартенсит под воздействием индентора, а также с выпадением частиц вторых фаз, которые, выпадая при температуре выше 400° С, способствуют упрочнению матрицы. Такое поведение f_M не является типичным для титановых сплавов, что подтверждают работы [6, 7, 8], в которых f_M от температуры зависит линейно, практически не изменяясь (в сплаве ВТ6), либо снижаясь (в сплаве ВТ1-0).

Таким образом, с уменьшением размера зерен структуры сплава $Ti_{49,3}Ni_{50,7}$ (особенно при формировании наноструктуры) повышаются его прочно-

стные характеристики, существенно снижается адгезионная (молекулярная) составляющая коэффициента трения f_M и уменьшается его склонность к схватыванию в процессе трения. Максимальные значения f_M для всех структурных состояний наблюдались при температуре 350° С. Полученные результаты расширяют представление о трибологическом поведении сплава в наноразмерной области, согласуются с результатами [3, 4] и позволяют прогнозировать улучшение эксплуатационных характеристик при использовании НС никелида титана в трибосопряжениях деталей машин при различных температурно-силовых условиях работы.

[1] Столяров В.В., Прокофьев Е.А., Прокошкин С.Д., Добаткин С.В. и др. Структурные особенности, механические свойства и эффект памяти формы в TiNi сплаве, полученном равноканальным угловым прессованием // ФММ. – 2005. – Т. 100, № 6. – С. 91 – 102.

[2] Stolyarov V.V., Ugurchiev U. Kh., Trubitsyna I. B., Prokoshkin S.D., Prokofiev E.A. Severe electroplastic deformation of TiNi alloy // Физика и техника высоких давлений. – 2008. – Т. 16, № 4. – С. 64 – 67.

[3] Чертовских С.В., Шустер Л.Ш., Столяров В.В. Триботехнические свойства нитинола, полученного интенсивной пластической деформацией // Трение и износ. – 2005. – Т. 26, № 1. – С. 80 – 83.

[4] Чертовских С. В., Шустер Л. Ш., Столяров В. В. Триботехнические характеристики наноструктурного сплава $Ti_{49,7}Ni_{50,3}$, полученного электропластической деформацией // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2010. – № 2. – С. 17 – 21.

[5] Шустер Л. Ш. Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем. – 1999. – 198 с.

[6] Столяров В.В., Шустер Л.Ш., Чертовских С.В., Трибологическое поведение ультрамелкозернистых титановых сплавов // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2006. – № 10. – С. 11 – 19.

[7] Чертовских С.В., Шустер Л. Ш. Зависимость триботехнических характеристик титановых сплавов от дисперсности микроструктуры // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2008. – № 12. – С. 18 – 24.

[8] Chertovskikh S.V., Shuster L.Sh., Semenov V.I., Huang S.-J. Thermodynamic analysis of friction and wear of ultrafine-grained materials // Machines, Technologies, Materials, Issue. 11/2015, p.p. 13-16.

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ И МАШИНА ТРЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ОТ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ В РАДИАЛЬНЫХ ОДНОРЯДНЫХ ШАРИКОПОДШИПНИКАХ

Чхетиани П.Д. (Pavelnew1@yandex.ru), Щербаков Ю.И.

Институт Машиноведения РАН, Москва, Россия.

Приведены описание метода и конструкции машины трения, предназначенных для исследования коэффициентов трения от частоты вращения подшипников качения. Показано, что наличие аэростатических устройств является эффективным конструкторским решением, обеспечивающим отсутствие паразитной составляющей в измеряемой величине коэффициента трения.

Ключевые слова: Радиальный однорядный подшипник, коэффициент трения, частота вращения.

Корректные измерения коэффициентов трения в экспериментальной трибологии и, в частности, при испытаниях подшипников качения до настоящего времени не материализовались в соответствующие методики и испытательное оборудование.

Основополагающий принцип корректности испытаний – измерение определяющих параметров или обеспечение их постоянства в течение опыта и от опыта к опыту.

Для подшипников качения определяющими параметрами являются: нагрузка, температура и

частота вращения одного из колец. При этом следует иметь в виду, что в отличие от температуры и частоты вращения кольца, обеспечение постоянства нагрузки отнюдь не гарантирует постоянства формы (форм) эпюры (эпюр) давлений между телом (телами) качения и кольцами испытуемого подшипника.

МТ для прецизионных измерений сил трения должны, в том числе, характеризоваться:

1. Способностью в течение всего опыта и от опыта к опыту, поддерживать постоянными размеры зоны трения, давления и форму эпюры давлений в ней;

2. Отсутствием паразитных потерь на трение;

3. Достаточно широкими поддиапазонами внутри диапазонов технических характеристик, свободными от больших амплитуд колебаний, совпадающих с осью действия сил трения.

В основе конструкции описываемой МТ лежит классический принцип физического маятника, подвешенного на горизонтально расположенной вращающейся оси. Ось – вал вращается в корпусе на 2-х ПС или 2-х ПК посредством электродвигателя постоянного тока мощностью 1,25 кВт и $n_{\max}=3500$ об/мин, либо электрошпинделем мощностью 2,2 кВт и $n_{\max}=48.000$ об/мин. Один конец вала электрошпинделя смонтирован на высокоскоростном шарикоподшипнике, другой же на аэростатических опорах. На свободном консольном конце вала устанавливается внутреннее кольцо ПС или ПК 9. Наружное же кольцо крепится в обойме 5, которая совместно с подушкой 3, жестко закреп-

ленной на голове 2 маятника, образует ножевую опору. Вертикально направленная нормальная сила, рассчитанная на основании масс отдельных частей маятника включая или исключая грузы 1 и 7, устанавливаемые соответственно на голове 2 маятника и на 2-х площадках продольной балки 10, закрепленной на маятнике, а также массы наружного (неподвижного) кольца подшипника находится в плоскости, которая делит образующую цилиндра наружного кольца на две равные части, одновременно ножевая опора обеспечивает самовосстановку трущихся поверхностей.

Методика измерения сил трения. Известно, что при использовании в качестве силоизмерителей маятников момент сил трения рассчитывается по формуле:

$$M = mg\ell \sin\varphi \text{ или } M = P \ell \sin\varphi,$$

где M – момент сил трения, Нм; m – масса маятника, кг; P – вес маятника в сборе, Н; g – ускорение свободно падающих тел, m/c^2 ; ℓ – расстояние от точки подвеса до центра масс маятника, мм; φ – угол отклонения маятника от положения равновесия, градусы.

Для повышения чувствительности маятничкового силоизмерителя необходимо (при заданной массе маятника, которая определяется на основании поставленной задачи) максимально уменьшить ℓ , что при одной и той же силе трения в подшипнике приведет к увеличению φ .

МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ И МАШИНА ТРЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ОТ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ В УПОРНЫХ ОДНОРЯДНЫХ ШАРИКОПОДШИПНИКАХ

Чхетиани П.Д. (Pavelnew1@yandex.ru), Щербаков Ю.И.

Институт Машиноведения РАН, Москва, Россия.

Приведены описание метода и конструкции машины трения, предназначенных для исследования коэффициентов трения от частоты вращения подшипников качения. Показано, что наличие аэростатических устройств является эффективным конструкторским решением, обеспечивающим отсутствие паразитной составляющей в измеряемой величине коэффициента трения.

Ключевые слова: Упорный однорядный подшипник, коэффициент трения, частота вращения.

Современное состояние экспериментальных исследований трибохарактеристик материалов (смазочных, покрытий, конструкционных, восстановленных поверхностей, медицинского и спортивного назначения), подшипников скольжения (ПС) и подшипников качения (ПК), дизельных и авиационных топлив нельзя признать удовлетворительным. Это обусловлено тем, что из-за отсутствия достаточного количества высококлассных конструкций машин трения (МТ), методик исследований и экспериментаторов, более, чем в 90%

как отечественных, так и зарубежных экспериментальных исследований не реализуется основополагающий принцип корректности опытов – измерение важнейших параметров и (или) обеспечение их постоянства в течение всего опыта и от опыта к опыту.

В случае лабораторных исследований ПС или ПК образуют испытательный узел трения, что предполагает постоянство его механических, геометрических, микрогеометрических и других характеристик. Достигается это благодаря использо-

ванию на всем протяжении экспериментального исследования по возможности одного и того же (единственного) ПС или ПК. Параметры опытов - нагрузка, температура, линейная скорость или частота вращения одного из колец подшипника, колебания корпуса МТ, наличие коррозионноактивных веществ и (или) абразивных частиц в атмосфере и др. не должны приводить к пластическим деформациям и (или) износу тел, образующих испытательный узел трения. В противном случае, при неизменной нагрузке (нормальной силе) площадь зоны трения постоянно нелинейно растет, а эпюра давлений изменяет свою форму, причем ни ту, ни другую в ходе опыта определить почти невозможно. Из-за снижения (как правило) в целом уровня жесткости условий опыта в зоне трения, в ней падают фактические давление и температура, что при исследованиях, например, смазочных материалов и топлив может приводить более жесткий граничный режим смазки к менее жесткому, далее к смешанному (когда нагрузку «несут» одновременно граничные и гидродинамические смазочные пленки) и даже к гидродинамическому. В формирующихся условиях измерения величин трибохарактеристик (например, силы трения или несущей способности) теряют какой-либо смысл.

В случае же стендовых исследований, ПС или ПК сами являются объектами исследований, что предполагает изменение их трибохарактеристик под воздействием параметров опыта.

Ниже описываются МТ для лабораторных и стендовых исследований трибохарактеристик материалов (смазочных, покрытий, конструкцион-

ных, восстановленных поверхностей, медицинского и спортивного назначения), упорных ПС и ПК, дизельных и авиационных топлив, а также соответствующие методики. Как и в МТ [3], прецизионность настоящей зиждется на использовании аэростатических опор, благодаря которым традиционное паразитное трение присущее МТ, уменьшается на 2 порядка радиальное и осевое биения вращающегося образца уменьшаются на один порядок, а кроме того с ее помощью можно исследовать также наиболее важную трибохарактеристику – износостойкость (ресурс) материалов узлов трения, в частности, износостойкость покрытий толщиной порядка – 1,0 мкм, которая до настоящего времени ни разу ни кем не была корректно исследована, тем более, синхронно с прецизионными (без паразитных потерь) измерениями сил трения. Кроме этого, износы порядка 10 мкм и более, также синхронно с прецизионными измерениями сил трения, могут измеряться наиболее прогрессивным методом – непрерывным, без разъединения зоны трения.

В основе конструкции описываемой МТ лежат схемы трения – «упорный ПС» и «упорный ПК».

Схема трения «упорный ПК», также как и схема трения «упорный ПС», может использоваться при исследованиях сил трения и несущей способности материалов и топлив в качестве испытательного узла трения, однако, в отличие от схемы трения «упорный ПС» она не допускает изменений геометрии и микрогеометрии трущихся поверхностей.

ДИАГНОСТИКА СТАДИИ ПОВЕРХНОСТНОГО УСТАЛОСТНОГО ИЗНАШИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ РЕДУКТОРОВ МЕТОДАМИ ФЕРРОГРАФИИ

Шабалинская Л.А. (shabl@ciam.ru), Голованов В.В., Бубнова Е.С., Мельников А.О.

Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, Москва, Россия.

Одним из путей раннего диагностирования технического состояния авиационных редукторов является прогнозирование темпов развития поверхностного усталостного изнашивания по определению видов усталостных частиц изнашивания, появляющихся в узлах трения, проведённое в настоящей работе, на примере главного редуктора типа ВР-294 вертолёта Ми-28-Н и редукторов коробки самолетных агрегатов КСА-33М самолёта МИГ-29К/КУБ в процессе их стендовых испытаний.

Ключевые слова: редуктор, износ, трибодиагностика, феррография, фильтрография, усталостное изнашивание.

Введение

При определении основных причин активного изнашивания машин важную роль играет феррографический и фильтрографический анализы [1-3]. Отличие данных видов анализов от остальных – это достоверное толкование информации о частицах изнашивания, которые образуются в процессе работы механизма.

Поверхностное усталостное изнашивание, преимущественно происходит в зубчатых передачах и в подшипниках качения. Усталостное изнашивание подшипников качения, обычно, начинается с микропиттинга – небольших участков на поверхностях пар трения, где материал был удален из-за циклических нагрузок. Анализ частиц изнашивания дает уникальную возможность заглянуть в процесс усталостного разрушения поверхностей

трения. Поскольку частицы, которые удаляются с поверхности, оседают в масле, они могут стать зеркальным отражением поверхностного разрушения.

Настоящая работа направлена на разработку методики раннего диагностирования технического состояния авиационных редукторов, которая позволит предупредить преждевременный отказ авиатехники.

Экспериментальная часть

В процессе оценки параметров частиц изнашивания, в отобранных пробах масел ЛЗ-240 и ВНИИ НП 50-1-4у были применены следующие средства измерения: атомно-эмиссионный спектрометр Spectroil-M (Spectro Inc.), аналитический феррограф (T2F Spectro Inc, USA), бихроматический микроскоп OLYMPUS BX 40, видеокамера и программное обеспечение (PREDICT/DLI, USA).

Результаты и их обсуждение

Поверхностное усталостное изнашивание, с точки зрения существующих представлений о механизмах данного вида изнашивания, начинается с микротрещин на поверхности или в подповерхностном слое материала. Трещины зарождаются в дефектах материала, включениях и других концентраторах напряжений. При высоких циклических нагрузках микротрещины распространяются либо параллельно поверхности, в результате чего материал, в конечном счете, скалывается с образованием усталостных частиц изнашивания, либо подходят своими открытыми концами (устьями) в область высоких гидродинамических давлений.

При этом обнаруживаются несколько типов частиц, являющиеся представителями усталостного вида изнашивания: частицы микроскалывания, пластинчатые частицы, хлопьевидные частицы и сферические частицы, представленные на рис. 1-4.

Частицы микроскалывания часто присутствуют на феррограммах также как и сферические частицы, поскольку являются продуктами ранней стадии поверхностного усталостного изнашивания. Удаление этих частиц, как правило, вызывает незначительное матирование поверхности без видимых повреждений и сколов и образуются на раннем этапе развития изнашивания. Хлопьевидные и пластинчатые частицы, образующиеся в процессе развитого изнашивания поверхностей трения в зубчатых зацеплениях, имеют большую относительную толщину, чем частицы, в аналогичном режиме изнашивания в подшипниках качения, и могут иметь отношение наибольшего размера к толщине от 4:1 до 10:1.

Следовательно, полученные результаты исследования позволяют выявлять различные стадии изнашивания. Соответственно, наличие хлопьевидных и сферических частиц усталостного изнашивания может быть использовано в качестве важного индикатора контроля в процессе работы узла трения – типа авиационных редукторов.

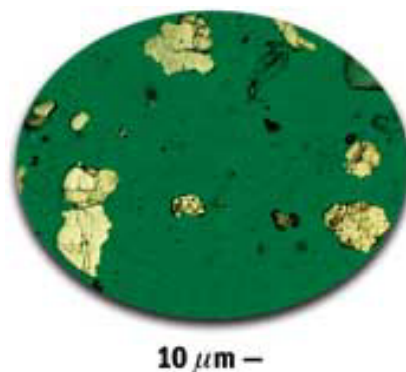


Рис. 1. Частицы микроскалывания (x1000).

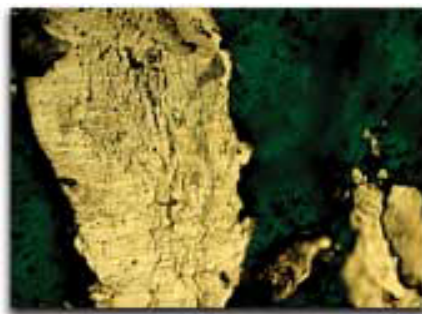


Рис. 2. Пластинчатая частица (x500).



Рис. 3. Сферические частицы (x1000).



Рис. 4. Хлопьевидные частицы (x500).

- [1] Степанов В.А. Диагностика технического состояния узлов трансмиссий газотурбинных двигателей по параметрам продуктов износа в масле. – Рыбинск. «НПО САТУРН» - 2002г., 232 с.
- [2] Wear Particle Atlas. Version 2.0, Lubrosoft, Australia, 1997.
- [3] Jian Ding. Determining Fatigue Wear Using Wear Particle Analysis Tools. Practicing Oil Analysis, №9, 2003. Lubrosoft.
- [4] ГОСТ 27674-88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. Издательство стандартов, 1989.

ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ АВТОБАЛАНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ

Шаталов Л.Н.

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

Работа посвящена решению задачи по созданию автобалансирующих устройств на основе пьезокерамики. Балансировка осуществляется путем нанесения дискретных порций балансирующего вещества на поверхность балансируемого ротора.

Ключевые слова: балансировка, балансирующее устройство, пьезокерамика, обратный пьезоэффект.

Развитие работ по созданию систем автоматической балансировки с использованием импульсных источников энергии [1] выдвинуло задачу исследования исполнительных органов (ИО) автобалансирующих устройств (АБУ), разработанных на основе пьезокерамики с использованием обратного пьезоэффекта.

Если на внутреннюю и внешнюю боковые поверхности полого поляризованного цилиндра, выполненного из пьезокерамики подать напряжение, то это приведет к осевому сжатию

$$S = dE,$$

где S – упругая деформация, d – пьезомодуль, E – напряженность электрического поля.

На рис. представлен ИО АБУс рабочей камерой, выполненной на основе полого пьезокерамического (ЦТС-19) цилиндра с радиальной поляризацией.

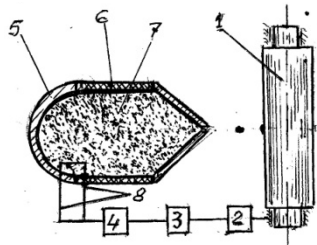


Рис. 1. ИО АБУ на основе пьезокерамики

1 – балансируемый ротор, 2 – датчик вибраций, 3 – блок управления, 4 – генератор импульсных токов, 5 – корпус рабочей камеры, 6 – пьезокерамический цилиндр, 7 – балансирующее вещество, 8 – электроды.

Вопрос радиального перемещения боковой поверхности цилиндрического пьезокерамического полого излучателя рассмотрен в работах [2].

Уравнение движения в радиальном направлении на основании теории упругости и пьезоэффекта с учетом допущений о радиальной поляризации можно записать в виде

$$\rho \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma_{33}}{\partial r} + \frac{\sigma_{33} - \sigma_{11}}{r},$$

где u – радиальное перемещение, ρ – плотность, t – время, σ_{ik} – упругие напряжения.

Опуская преобразования, получим выражение «U» в виде уравнения

$$u_3 = \left[A - \frac{\pi D}{2} F_2(x) \right] I_v(x) + \left[B + \frac{\pi D}{2} F_1(x) \right] N(x),$$

где A, B – постоянные интегрирования, $x = kr$,

$$D = -\frac{2e_{31}}{\epsilon_{33}C_{33}}q, \quad q = \frac{t}{i\omega}$$

цилиндра, C_{ik} – упругие постоянные, e_{ik} – пьезо-константы, $k = \omega/c$.

Выброс дискретных порций балансирующего вещества через сопло рабочей камеры осуществляется под действием управляемых ударных импульсов, создаваемых в рабочей камере за счет обратного пьезоэффекта при подаче электрических импульсов, пропорциональных дисбалансу на пьезоактюатор.

В общем виде давление в камере, необходимое для выброса дискретных порций можно представить в виде

$$p = \frac{\rho v^2}{2} + \frac{k\rho v_2}{2} + \frac{32\rho v^2 l}{d^2} + \frac{2\alpha_d}{d},$$

где p – давление в рабочей камере; ρ, v – плотность и кинематический коэффициент вязкости вещества; k – коэффициент, учитывающий гидравлические потери на входе в сопло; d – диаметр сопла; α_d – динамический коэффициент поперечного натяжения вещества.

Развитие науки в последние годы в области создания высокоэффективных сегнетоэлектрических устройств позволили на их основе провести экспериментальные исследования по созданию высокоточных и компактных автобалансирующих устройств.

Была подтверждена перспективность выбранного научного направления при создании высокоэффективной инновационной технологии и конкурентоспособной продукции на мировом рынке.

[1] Шаталов Л.Н. Инновационные технологии на основе электрогидравлического эффекта при создании автобалансирующих устройств. Научн. труды IV-й Межд.научн.конф. «Фундаментальные исследования и инновационные технологии». М., 2015. С269-270.

[2] Савин В.Г., Дидусенко Ю.А. Уравнения движения тонкостенных пьезокерамических преобразователей с окружной поляризацией. – Тр.акуст.симпоз. КОНСОНАНС. – 2011. С. 230-235.

ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ РАЗРАБОТОК ТЕХНОПАРКА ХТЦ УАИ В ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Шолом В.Ю.

ХТЦ УАИ, Уфа, Россия.

Приведены результаты научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ выполняемых специалистами Технопарка ХТЦ УАИ. Описаны примеры внедрения научных разработок в промышленность в условиях рыночной экономики.

Ключевые слова: технопарк, смазывающе-охлаждающие жидкости, технологические смазки, консервационные материалы, закалочные жидкости, многофункциональные смазочные материалы, ингибиторы коррозии, лабораторное оборудование, газотурбинные компрессорные установки.

На основании приказа № 47 от 24.04.2009 г. Министерства промышленности, инвестиционной и инновационной политики РБ был зарегистрирован Технопарк «Хозрасчетный творческий центр Уфимского авиационного института»

Управляющей компанией Технопарка ХТЦ УАИ является ООО «Хозрасчетный творческий центр Уфимского авиационного института», а основные инновационные тематики деятельности Технопарка формируются из научно-технических заделов подразделений ХТЦ УАИ и УГАТУ и направлены на внедрение в производство законченных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Структура Технопарка ХТЦ УАИ приведена на рисунке 1.

В настоящее время в Технопарке ХТЦ УАИ проводятся работы по следующим направлениям:

1. ВОПРОСЫ ТРЕНИЯ И СМАЗКИ В ТЯЖЕЛО-НАГРУЖЕННЫХ УЗЛАХ ТРЕНИЯ ТИПА «ИНСТРУМЕНТ – ЗАГОТОВКА»
2. ВОПРОСЫ ХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРИСАДОК К СМАЗОЧНЫМ МАТЕРИАЛАМ И ПОЛИМЕРНЫМ КОМПОЗИЦИЯМ
3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ МЕТАЛЛООБРАБОТКИ ЗА СЧЕТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД (смазывающе-охлаждающие жидкости, технологические смазки, консервационные материалы, закалочные жидкости, многофункциональные смазочные материалы, ингибиторы коррозии и т.п.)
4. НАЗЕМНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ, ОТРАБОТАВШИХ ЛЕТНЫЙ РЕСУРС
5. ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОМПРЕССОРНОЙ ТЕХНИКИ НА ОБЪЕКТАХ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА ПРИ ИХ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И РЕМОНТЕ
6. ТЕХНОЛОГИИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЗОРАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ В РАЗЛИЧНЫХ ОБЛАСТЯХ ЭКОНОМИКИ
7. ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ
8. СОЗДАНИЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЛАБОРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Разработанные в лабораториях НИИ «Триботехники и смазки» (ТиС) рецептуры и технологии изготовления смазочных материалов для процессов металлообработки внедрены на ЗАО «Опытный завод смазок и оборудования» и используется на сотнях машиностроительных предприятиях России и ближнего зарубежья, среди которых ОАО АВТОВАЗ (г. Тольятти) ОАО КАМАЗ (г. Наб. Челны), ОАО ГАЗ (г. Н. Новгород), ОАО ММК (г. Магнитогорск), ОАО Белебеевский завод Автономаль, ОАО БМК (Белорецк), ОАО Уралмаш (г. Екатеринбург), ОАО УАЗ (г. Ульяновск), Миттал-Стил Тимертау (Казахстан), ОАО Нижнеднепровский трубопрокатный завод (г. Днепропетровск, Украина) и др.

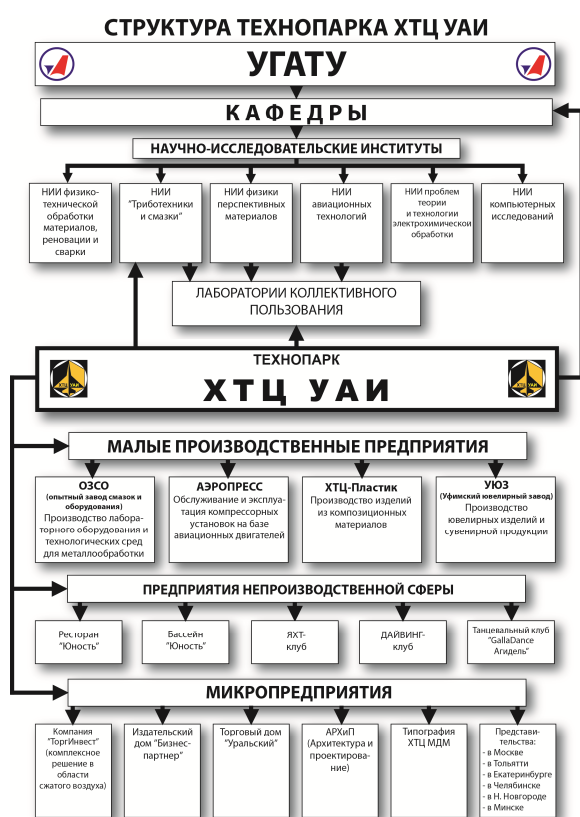


Рисунок 1. Структура Технопарка ХТЦ УАИ.

Кроме этого, сотрудниками НИИ ТиС разработаны отечественные импортзамещающие компрессорные масла для работы в средних режимах и компрессорное масло на синтетической основе для использования в высокопроизводительных винтовых компрессорах, которое в настоящее время проходит испытание по оценке ресурса работы компрессоров Sullair, участвующих в обслуживании магистральных трубопроводов.

Кроме разработки и испытаний смазочных материалов, в лабораториях НИИ ТиС совместно со специалистами ЗАО «Опытный завод смазок и оборудования» создается новое оборудование для испытаний технологический сред. Примером могут служить камера соленого тумана КСТ-2 и установка для определения охлаждающей способности закалочных сред, в создании которых студенты принимали самое активное участие. Созданная установка соответствует международному стандарту. Силами лаборатории были изготовлены 3 установки. В настоящее время одна установка работает на ОАО КАМАЗ.

Другое важное направление деятельности Технопарка ХТЦ УАИ – новые технологии обслуживания магистральных трубопроводов. Эти технологии включают в себя, очистку, диагностику и испытание магистральных трубопроводов.

С помощью газотурбинных компрессорных установок (ГТКУ), созданных совместно сотрудниками НИИ ТиС и технопарка ХТЦ УАИ на базе отработавших летный ресурс авиационных двигателей, производится очистка полости трубопроводов от воды после гидроиспытаний, от нефти и нефтепродуктов строящихся, ремонтируемых и демонтируемых магистралей. Уникальностью этих установок является сверхвысокая производительность, как минимум в 30 раз превышающая производительность любых, выпускаемых в мире, передвижных компрессоров, низкая масса оборудования, быстрая привязка к трубопроводу в любой точке, минимальный набор дополнительного оборудования. Сверхвысокая производительность обеспечивает уникальную технологию очистки трубопроводов сжатым воздухом.

С помощью таких установок выполнены работы более чем на 2000 участках трубопроводов общей протяженностью более 30 000 км, расположенных на территориях Российской Федерации, Казахстана и Белоруссии.

Уже завоевав определенный статус и интерес со стороны заказчиков, в 2011 году специалисты этого направления получили крупнейший и очень почетный заказ, подряд по очистке полости магистрального трубопровода «Восточная Сибирь – Тихий Океан» (ВСТО), общей длиной 4800 км.

Сотрудниками технопарка ХТЦ УАИ были созданы мобильные азотные комплексы МСА-38/20, производительностью до 40нм³/мин. Созданные комплексы удовлетворяют требованиям безопасных технологий по вытеснению нефти из выводимых из эксплуатации нефтепроводов.

В настоящее время освоены технологии консервации трубопроводов заполнением им азотом. Разрабатывается технология консервации трубопровода путем нанесением на них консервационных составов, которые разрабатываются в НИИ ТиС. Изучается востребованность азотных установок и в других сферах и областях промышленности. Научная деятельность в этой области продолжается, в разработке находятся, как легкие азотные установки малой производительности, так и компактные машины большой производительности.

Кроме описанных выше тематик в НИИ ТиС выполняются и другие научные разработки, часть из которых уже сегодня реализованы в технопарке ХТЦ УАИ:

- технология изготовления корпусных деталей из композиционных материалов холодного формования;
- технология вакуумного формования;
- технология нанесения композитных антикоррозионных покрытий;
- технология и устройства наливных полов на базе отечественных компонентов;
- технология изготовления «жидкого» камня.

СКОЛЬЖЕНИЕ ШЕРОХОВАТОГО ЦИЛИНДРА ПО ВЯЗКОУПРУГОМУ ОСНОВАНИЮ В УСЛОВИЯХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СМАЗЫВАНИЯ

¹Шпенёв А.Г. (kel-a-kris@list.ru)

¹Институт проблем механики РАН, Москва, Россия;

В данной работе будет рассмотрен метод моделирования вязкоупругого основания, основанный на замене модулей упругости интегральными операторами, и на его основании получено решение задачи об УГД смазывании шероховатого цилиндра, скользящего по вязкоупругому основанию.

Ключевые слова: вязкоупругость, УГД смазывание, граничные элементы.

Постановка задачи. Рассмотрим длинный жёсткий шероховатый цилиндр, скользящий по вязкоупругой полуплоскости с постоянной скоро-

стью V в направлении оси Ox , системы координат, связанной с цилиндром (рис. 1). В подвижной системе координат распределение давлений в жидко-

сти и деформаций поверхности вязкоупругого основания не будут в явном виде зависеть от времени (квазистационарная задача). Принимаем, что длина цилиндра много больше его радиуса и поэтому параметры потока жидкости и деформации полупространства мало зависят от координаты y , то есть задачу можно рассмотреть в плоской постановке.

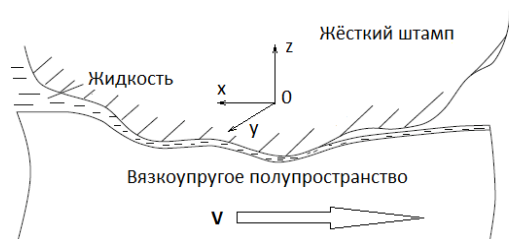


Рис. 1. Общий вид течения УГД смазочного слоя.

Для описания течения смазочного слоя используется уравнение Рейнольдса:

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{h(x)^3}{\mu} \frac{dp(x)}{dx} \right) - 6V \frac{dh(x)}{dx} = 0, \quad (1)$$

где μ – вязкость жидкости, $h(x)$ – толщина смазочного слоя.

Моделирование поведения вязкоупругого основания. Для системы распределённых нормальных усилий, движущихся вдоль вязкоупругого основания со скоростью V в направлении оси Ox можно записать выражение для перемещений $w(x, y)$ в направлении оси Oz границы вязкоупругого полупространства, характеризуемого постоянным коэффициентом Пуассона и ядром ползучести $K(t)$ [1]:

$$w(x, y)|_{z=0} = -\frac{1-\nu}{2\pi G} \iint p(\xi, \eta) \left[\frac{1}{R} + \int_{-\infty}^0 K(-\tau) \frac{1}{R_*} d\tau \right] d\xi d\eta$$

$$R = \sqrt{(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2} \quad (2)$$

$$R_* = \sqrt{(\xi - x - V\tau)^2 + (\eta - y)^2}$$

Ядро ползучести материала берём в форме:

$$K(t) = \frac{1}{T_s} \exp\left(-\frac{t}{T_e}\right),$$

где T_s и T_e – времена релаксации и запаздывания соответственно.

Решение задачи. Для решения задачи вводим неравномерную сетку $x_1 \dots x_N$ в интервале $(-R, R)$. Значения функций $p(x)$, $h(x)$ и $w(x)$ отыскиваем в узлах сетки: $p_i, h_i, w_i; i=1..N$. Уравнение Рейнольдса (1) решаем заменой его на конечно-разностную схему. Уравнения (2) решаются методом граничных элементов [2], в результате чего получается матрица взаимного влияния K_{ij} (i, j) элементом которой является нормальное смещение поверхности в точке i под действием единичного давления в точке j .

Решение контактной задачи ищем итерационным методом при фиксированном внедрении штампа по следующему алгоритму:

0. Назначаем начальное значение h_i :

1. При заданных значениях h_i вычисляем значения p_i , решая уравнение (1).
2. Вычисляем соответствующие полученному распределению давлений p_i смещения поверхности эластомера:

$$w_i = \sum_{j=1}^N K_{i,j} p_j$$

3. Вычисляем соответствующую этим смещениям поверхности новую толщину смазочного слоя:

$$h_i^n = \frac{x_i^2}{2R} + h_0 \cos\left(\frac{2\pi x_i}{L}\right) + \Delta - w_i$$

4. Определяем величину отличия новой толщины смазочного слоя от старой:

$$\varepsilon = \max_{i=1..N} \left(\frac{|h_i - h_i^n|}{h_i} \right)$$

5. Если ε меньше заданной малой величины ε_0 , прекращаем расчет. Если больше – модифицируем толщину смазочного слоя и переходим к пункту 1.

Результаты и выводы. Построено численно-аналитическое решение задачи о движении тонкого слоя вязкой жидкости между неподвижным жестким шероховатым цилиндром и движущимся с постоянной скоростью перпендикулярно образующей цилиндра вязкоупругим основанием (модель вязкоупругого смазанного контакта шероховатых тел). Построенная модель позволяет проанализировать совместное влияние рельефа поверхности и несовершенной упругости основания на характеристики смазанного контакта (рис. 2). По сравнению с известными моделями на основе Винклеровского подхода [3], данная модель даёт более точное решение и не требует определения нефизичных констант. Полученные результаты могут быть использованы для расчета характеристик смазанного контакта при учете шероховатости и гистерезисных потерь в уплотнениях и других трибосопряжениях с высокоэластичными деталями.

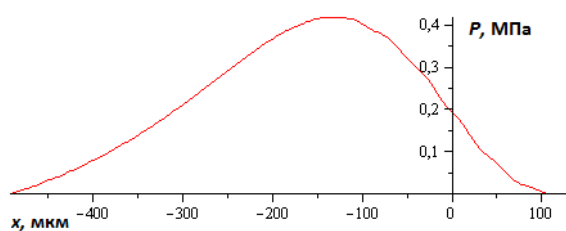


Рис. 2. Распределение давлений в смазочном слое.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 14-29-00198.

[1] Александров В.М., Горячева И.Г., Торская Е.В. Пространственная задача о движении гладкого штампа по вязкоупругому полупространству. // Докл. РАН. 2010. Т. 430. №4. С.490-493.
 [2] И. Г. Горячева, Ф. И. Степанов, Е. В. Торская Скольжение гладкого индентора при наличии трения по вязкоупругому полупространству // ПММ. 2015. Т. 79. Вып. 6. С.853-863.
 [3] И. Г. Горячева, П. П. Усов. Численный анализ контакта вязкоупругих шероховатых тел при наличии слоя вязкой смазки // ПММ. 2012. Т.76. Вып. 5. С. 764-776.

РОЛЬ КЕРМЕТОВ В МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗНОСА ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ

¹Шустер Л.Ш., ¹Камалетдинова Р.Р.

¹ФГБОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа, Россия.
(okmim@ugatu.ac.ru)

Исследовано изнашивание прямых и обратных пар трения, изготовленных из жаропрочного сплава и керамико-металлического материала (кермета) на основе карбида титана. Представлены механизмы формирования износа для изученных пар трения, в которых применялись керметы. Установлено, что для уменьшения износа трибосопряжений следует использовать керметы в обеих парах трения.

Ключевые слова: абразивно-механический износ, адгезионно-усталостный износ, абразивно-окислительный износ, износ трибосопряжений.

Введение

Герметичность запорной арматуры трубопроводов (в том числе, шаровых кранов) в значительной мере зависит от степени износа сопрягаемых поверхностей деталей арматуры[1]. Так, при работе шаровых кранов одновременно происходит изнашивание и шара, и седла. По существу, каждая из сопрягаемых деталей, является источником, причиной износа другой детали. При этом, в зависимости от твердости контактирующих поверхностей, пары трения могут быть **прямыми** и **обратными** [2,3]. В случае **прямой** пары трения по большей поверхности скользит **более твердое** тело, а в случае **обратной** пары – **более мягкое** тело.

Целью данной работы является установление зависимости преобладающего вида изнашивания поверхностей, работающих в контакте с керметом на основе карбида титана (при наличии и отсутствии износостойких покрытий).

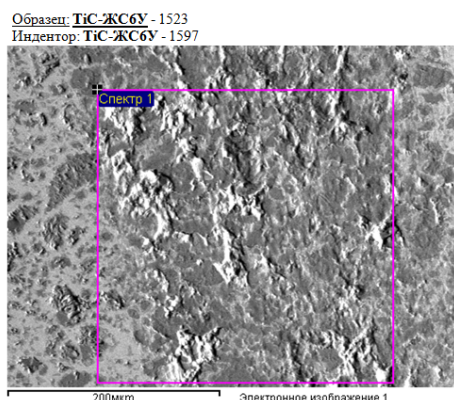
Методика исследования

Исследования по изнашиванию пар трения выполняли на одношариковом трибометре «NANOVEA TRB» по схеме «шар-диск». В качестве шарика использовали сферические инденторы (радиусом сферы 2,5 – 3мм), а в качестве дисков образцы (диаметром 25 мм и толщиной 5-7мм). Образцы и инденторы изготавливались из материалов: жаропрочного сплава ЖС6У и керамико-металлического материала (кермета) на основе карбида титана TiC-ЖС6У (без покрытий и с износостойким покрытием Zr-Ti-N-C). Результаты трибологических испытаний представляли как усредненное значение, полученное по трем экспериментам.

Металлографические исследования изношенных поверхностей выполнены на растровом электронном микроскопе «JSM-6490LV» и оптическом микроскопе «Olympus GX51».

Результаты и их обсуждение.

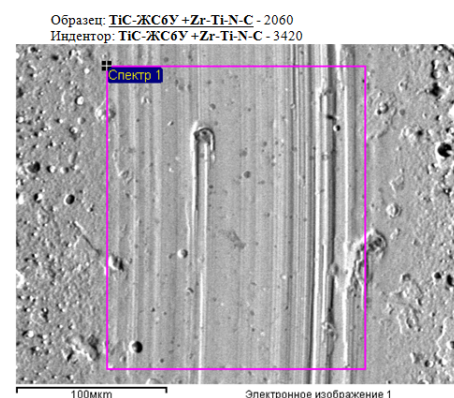
На основании результатов металлографических исследований поверхностей трения (рис.1 и 2), можно представить следующие механизмы формирования износа для изученных пар трения, в которых применялись керметы.



Образец: TiC-ЖС6У- 1523 с индентором TiC-ЖС6У - 1597

Состав	Ni	C	Cr	Mo	Al	Ti	Fe	Nb	O
Спектр 1	22,83	10,27	6,48	2,04	0,54	32,17	3,43	1,54	20,7

Рис. 1 Вид и микрохимсостав изношенной поверхности образца из кермета TiC-ЖС6У при контактировании с индентором из кермета TiC-ЖС6У.



Образец: TiC-ЖС6У+Zr-Ti-N-C - 2060 с индентором TiC-ЖС6У+Zr-Ti-N-C - 3420

Состав	N	C	Zr	Ni	Ti
Спектр 1	5,44	8,41	62,54	0,47	23,14

Рис. 2 Вид и микрохимсостав изношенной поверхности образца из кермета TiC-ЖС6У + Zr-Ti-N-C при контактировании с индентором из кермета TiC-ЖС6У + Zr-Ti-N-C.

На рис. 3 и 4 представлено предложенное нами формирование износа трибосопряжений с обратной (рис.3) и прямой (рис.4) парами трения, в которых в качестве твердого тела использовался кермет.

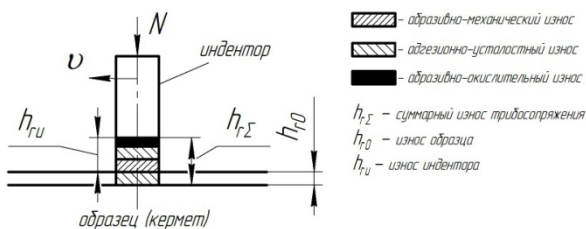


Рис. 3 Формирование износа трибосопряжения, в котором твердым телом (образец) является кермет.

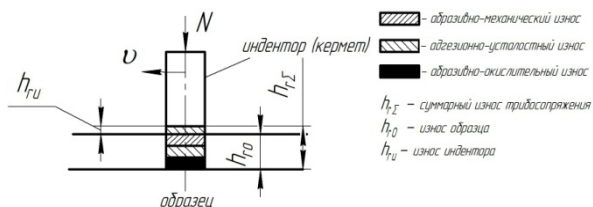


Рис. 4 Формирование износа трибосопряжения, в котором твердым телом (индентор) является кермет.

Из этих рисунков следует, что применение кермета в паре трения с более мягким материалом увеличивает износ трибосопряжения, так как при этом происходят все изученные виды изнашивания: абразивно-механический, адгезионно-усталостный и окислительный.

Для смешанных пар трения с участием кермета (с покрытием и без покрытия), как видно из рис.5 и 6, практически исключается абразивно-механическое изнашивание, а для пар с покрытием исключается также окислительное изнашивание.

Таким образом, износостойкие покрытия не только экранируют технологические поры в кермете, но и экранируют твердые включения, имеющиеся на поверхностях трения керметов, этим самым препятствуя абразивно-механическому и окислительному изнашиванию в парах трения.

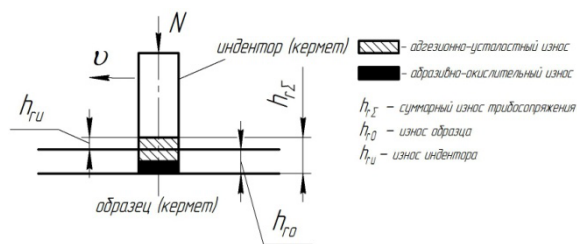


Рис. 5 Формирование износа трибосопряжения, в котором оба контактирующих тела из кермета

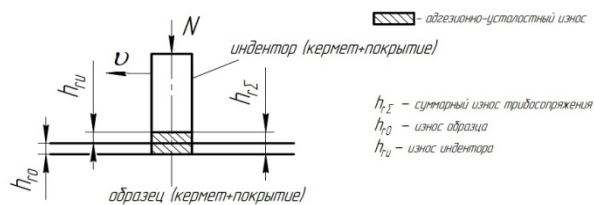


Рис. 6 Формирование износа трибосопряжения, в котором оба контактирующих тела из кермета с износостойким покрытием.

Вывод: для уменьшения износа трибосопряжений следует при изготовлении деталей запорной арматуры использовать керметы в обеих парах трения. Наибольший эффект по износостойкости можно получить, если на поверхности этих деталей нанести износостойкие покрытия.

[1] Мамлеев Руст. Ф., Мамлеев Раф.Ф., Науширванов Р.Г. Изделия из высокотемпературных керметов TiC-Me для нефтепереработки и нефтехимии // Нефтепереработка и нефтехимия, 2010, №4. – С. 33- 38.

[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] Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники. – М.: Инфра-М, 2014. – 336 с.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Абрамов А.Н. МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И ВЫБОРА СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ	3
Авилкин Ю.М. О ВЛИЯНИИ НЕПОЛНОЦЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА КАЧЕСТВО ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ СОЗДАВАЕМЫХ МАШИН	4
Азоян А.И., Иваночкин П.Г. МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЖЕСТКОГО ШТАМПА С ДВУХСЛОЙНЫМ ПОКРЫТИЕМ ПРИ УЧЕТЕ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ В ЗОНЕ КОНТАКТА	6
Алеутдинова М.И., Фадин В.В., Алеутдинов К.А. ВЗАИМОСВЯЗЬ ИЗНОСА И СПОСОБА РЕЛАКСАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ МЕДЬСОДЕРЖАЩИХ КОМПОЗИТОВ ПРИ СКОЛЬЖЕНИИ С ВЫСОКОЙ ПЛОТНОСТЬЮ ТОКА	8
Алисин В.В., Покидько Б.В., Рошин М.Н., Силова Т.В., Юдкин В.Ф. ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЛУБРИКАЦИИ СИСТЕМЫ «КОЛЕСО-РЕЛЬС» ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА	9
Безносков А.В., Бокова Т.А., Шумилков А.И. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНТАКТНЫХ ПАР ТРЕНИЯ В МЕХАНИЗМАХ, РАБОТАЮЩИХ В ТЯЖЕЛОМ ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ	11
Бекаев А.А., Тюляева Е.А. ПРИМЕНЕНИЕ РЕГУЛЯРНОГО МИКРОРЕЛЬЕФА В МЕТОДАХ ППД	12
Бердичевский Е.Г. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ ДЛЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	13
Березина Е.В., Годлевский В.А., Марков В.В. ГИБРИДИЗАЦИЯ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ СОВМЕСТНОГО ДЕЙСТВИЯ РАЗНОТИПНЫХ ТРИБОАКТИВНЫХ ПРИСАДОК	15
Бирюков В.П., Татаркин Д.Ю., Хриптович Е.В., Фишков А.А. ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО КРИТЕРИЮ АБРАЗИВНОЙ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ	17
Бирюков В.П., Фишков А.А., Чурляева О.Н. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛАЗЕРНОЙ НАПЛАВКИ	19
Бледнова Ж.М., Русинов П.О., Балаев Э.Ю. КОМПОЗИЦИОННОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ТРИБОТЕХНИЧЕСКО- ГО НАЗНАЧЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕРИАЛОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ	21
Бодачевский Ю.С., Поп Г.С., Железный Л.В. СИНТЕЗ АНТИЗАДИРНЫХ ПРИСАДОК НА ОСНОВЕ ЭФИРОВ ЖИРНЫХ КИСЛОТ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ И ЖИВОТНЫХ ЖИРОВ	23
Бокова Т.А., Боков П.А., Зудин А.Д., Приказчиков Г.С. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗНОСА СТАЛЬНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОД ДЕЙ- СТВИЕМ ПОСТОРОННИХ ПРЕДМЕТОВ (ДЕБРИСА) В СВИНЦОВОМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ ПРИ- МЕНИТЕЛЬНО К УСЛОВИЯМ КОНТУРОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ	24
Болотов А.Н., Новикова О.О., Новиков В.В. ЗАВИСИМОСТЬ СМАЗОЧНЫХ СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ МАСЕЛ ОТ СОСТАВА ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЫ	26

Большаков А.Н., Буяновский И.А., Правоторова Е.А., Левченко В.А. ВЛИЯНИЕ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ПОВЕДЕНИЕ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ МИНИМИЗАЦИИ ОБЪЕМА ИСПЫТАНИЙ	27
Бородай А.В. О ВОЗНИКНОВЕНИИ СИСТЕМ ПРИСОЕДИНЕННЫХ ПОТОКОВ В ЗОНЕ КОНТАКТА ТЕЛ КАК ФАКТОРЕ СИНЕРГЕТИКИ	29
Бородай А.В., Скринников Е.В., Васильев Б.Н. О РЕАЛИЗАЦИИ ЕСТЕСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ФОРМЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СОСТОЯНИЙ	31
Броновец М.А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОСТИЖЕНИЙ ТРИБОЛОГИИ В КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ	32
Булгаревич С.Б., Бойко М.В., Лебединский К.С. ЦЕЛЕНАПРАВЛЕННЫЙ ВЫБОР ПРИСАДОК К ЖИДКИМ СМАЗОЧНЫМ МАТЕРИАЛАМ ПРИ СМЕШАННОМ И ГРАНИЧНОМ ТРЕНИИ	33
Булгаревич С.Б., Бойко М.В., Фейзова В.А. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОТНОСИТЕЛЬНАЯ ФЛУКТУАЦИЯ СИЛЫ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ	35
Бурлакова В.Э., Дроган Е.Г. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ МЕТОДОМ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ	37
Буяновский И.А. ВЫДАЮЩИЙСЯ ТРИБОЛОГ РОСТИСЛАВ МИТРОФАНОВИЧ МАТВЕЕВСКИЙ (к 100 – летию со дня рождения)	39
Буяновский И.А., Лашхи В.Л., Самусенко В.Д. РАЗВИТИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ СМАЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТОЙКОСТИ МОТОРНЫХ МАСЕЛ	41
Викулова А.А. ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСИОННОЙ СРЕДЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ДОБАВОК В СУЛЬФОНАТНЫХ СМАЗКАХ	42
Воронин Н.А. ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТОПОКОМПЗИТОВ ПРИ ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ ИНДЕНТИРОВАНИИ И УЧЕТ ЭТИХ ОСОБЕННОСТЕЙ ДЛЯ РАСЧЕТА УПРУГОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЯ	43
Гадолина И.В., Петрова И.М., Черезов А.А. АНАЛИЗ СЛУЧАЙНОГО ПРОЦЕССА НАГРУЖЕНИЯ ГОРНЫХ МАШИН И ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОЙ ДЛИНЫ РЕАЛИЗАЦИИ	44
Горошков М.В., Шапошникова В.В., Салазкин С.Н., Донсков Е.А., Панова М.О., Краснов А.П. ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НОВЫХ ПОЛИМЕРОВ, ВЛИЯНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОЙ МАССЫ НА ТРЕНИЕ	46
Григорьев С.Н., Мандель А.М., Ошурко В.Б., Соломахо Г.И., Шарц А.А. ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ НА СУХОЕ ТРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИКОВ	47
Гвоздев А.А., Казак А.В., Смирнова А.И., Усольцева Н.В., Козинец М.В., Рожкова Н.Н., Ермаков С.Ф. ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПРИСАДОК В МИНЕРАЛЬНОМ МАСЛЕ НА ОСНОВНЫЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРЫ "СТАЛЬ-ЧУГУН"	49
Гологан В.Ф., Ажаронков В.В., Анисович А.Г., Бобанова Ж.И., Ивашку С.Х., Кройтору Д.М. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ГАЛЬВАНИЧЕ- СКИХ ПОКРЫТИЙ	51
Горюнова А.К., Шаталов К.В., Лихтерова Н.М., Кондратенко В.В. ЖИРНЫЕ КИСЛОТЫ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ КОМПОНЕНТ ПРОТИВОИЗНОСНЫХ ПРИСАДОК К ТОПЛИВАМ ДЛЯ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	52

	Стр.
Гриб В.В., Петрова И.М. ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ МЕХАНИЗМОВ ПО СОВОКУПНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИНАМИКИ, ИЗНАШИВАНИЯ, УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ	54
Григорьев А.Я., Ковалёва И.Н., Кудрицкий В.Г., Гуцев Д.М., Мышкин Н.К. СМАЗОЧНЫЕ СВОЙСТВА ПИЩЕВЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАСЕЛ	55
Гришин Н.Н., Степанова С.Е. ПРОТИВОПИТТИНГОВЫЕ СВОЙСТВА СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ	56
Гришин Н.Н., Орешенков А.В. ТВЕРДЫЕ СМАЗОЧНЫЕ ПОКРЫТИЯ	58
Густов Д.Ю., Густов Ю.И., Воронина И.В. ТРИБОТЕХНИКА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАШИН И ОБОРУДОВАНИЯ	59
Даровской Г.В., Кохановский В.А., Буракова М.А., Поляков В.Н. ВЛИЯНИЕ РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА НА ГИДРОДИНАМИЧЕСКУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ МОДЕЛИ ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ «ВАЛ–КОЛОДКА»	61
Даровской Г.В., Дюргеров Н.Г., Шеховцов К.В. РЕМОНТ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ УЗЛОВ МЕТОДОМ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ	63
Дегтярева А.Г., Попцов В.В., Васильев С.Г. Симонов В.Н. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПАРЫ ТРЕНИЯ СТАЛЬ 35-ВК8 НА СТРУКТУРУ И ПАРАМЕТРЫ ТРЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ, УПРОЧНЕННОЙ МЕТОДОМ ДЕФОРМИРУЮЩЕГО РЕЗАНИЯ	64
Дунаев А.В. ПОВЫШЕНИЕ АКТИВНОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ	65
Евдокимов А.Ю. СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ТЕХНОСФЕРЕ И БИОСФЕРЕ	67
Евельсон Л.И., Камынин В.В., Кузнецов С.С., Ротарь Д.В. ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ФРАКТАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ АНТИФРИКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	68
Евельсон Л.И., Цыганков А.Г., Ширяева Л.И., Памфилов Е.А. К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ СКОРОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ НА ТРЕНИЕ И ИЗНОС	69
Егоров И.М. ОПЫТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИЗНАШИВАНИЯ ПЕРЕДАЧ ЗАЦЕПЛЕНИЕМ	71
Ежов Ю.Е. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРУКТУРНО–ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ МОЩНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ПРОИСХОДЯЩИХ В ОСНОВНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЯХ ДНОУГЛУБИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ	73
Емаев И.И., Криони Н.К., Шустер Л.Ш. ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАТОРОВ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АДГЕЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ТРЕНИИ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ	75
Еремин В.Н., Зарецер Я.М., Лисовский В.А., Овчинин Д.И. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ПАР ТРЕНИЯ УПЛОТНЕНИЙ ВРАЩАЮЩИХСЯ ВАЛОВ НА НАДЕЖНОСТЬ	77
Ермаков С.Ф., Мышкин Н.К., Усольцева Н.В. ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ АЛКИЛЬНОГО РАДИКАЛА НА СМАЗОЧНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ХОЛЕСТЕРИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ И ИХ СМЕСЕЙ	78
Есипова Н.Е., Лознецова Н.Н., Малкин А.И., Павелко Г.Ф., Соболев В.Д., Топоров Ю.П. ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДНЫХ ЭМУЛЬСИЙ ОЛЕИНОВОЙ КИСЛОТЫ	80

Жорник В.И., Ивахник А.В., Ивахник В.П., Бухтилова М.А. СТРУКТУРА И СВОЙСТВА КОМПЛЕКСНОЙ СУЛЬФОНАТ КАЛЬЦИЕВОЙ СМАЗКИ	81
Задошенко Е.Г., Бурлакова В.Э., Новикова А.А. ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ НИКЕЛЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ СТРУКТУР ПРИ ФРИКЦИОННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ	83
Зайнетдинов Р.И., Гадолина И.В. НАКОПЛЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ В МЕТАЛЛЕ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОГО ПОДХОДА	84
Залеснов А.И., Петухов Е.Н., Аборкин А.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА ПРИ КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫМ КОМПОЗИЦИОННЫМ СПЛАВОМ	86
Зарецер Я.М., Думболов Д.У., Еремин В.Н., Асметков И.Д. ВЛИЯНИЕ ГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ РАЗГРУЗКИ НА ТРЕНИЕ В ЦАПФАХ РОЛИКОВ-РАЗДЕЛИТЕЛЕЙ РОЛИКО-ЛОПАСТНЫХ ГИДРОМАШИН	88
Захаров С.М., Гершман И.С., Миронов А.Е. РАЗВИТИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ Н.А.БУШЕ (к 100- летию со дня рождения)	90
Захаров С.М., Жаров И.А. СЛОЖНЫЕ ТРИБОСИСТЕМЫ: МОДЕЛИРОВАНИЕ, ИССЛЕДОВАНИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ	91
Захарычев С.П., Иванов В.А. САМОСМАЗЫВАЮЩИЕСЯ ЭПОКСИДОФТОРОПЛАСТЫ ДЛЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ	93
Золотов В.А., Селезнев М.В., Морозов А.В. ТРИБОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ БЕЗЗОЛЬНЫХ ДИТИОФОСФАТОВ В КОМПОЗИЦИИ С ДЕТЕРГЕНТАМИ В СРЕДЕ УГЛЕВОДОРОДНОГО МАСЛА	95
Иванов А.С., Муркин С.В. ЗАТЯЖКА ДИНАМИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ ВИНТОВ	97
Ивасышин Г.С. ПРИЛОЖЕНИЯ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ. АТТОСЕКУНДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В МИКРО- НАНО-ПИКО- И ФЕМТОТРИБОЛОГИИ	98
Измайлов В.В., Чаплыгин С.А. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ УДЕЛЬНОЙ СИЛЫ ТРЕНИЯ	100
Измеров М.А., Тихомиров В.П. МОДЕЛЬ ПРОТЕКАНИЯ ЧЕРЕЗ ТОРЦОВОЕ УПЛОТНЕНИЕ	102
Израилович М.Я., Эрлих Б.М., Рочагов А.В. АКТИВНОЕ ГАШЕНИЕ ФРИКЦИОННЫХ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ВОЗМУЩЕНИЯ	104
Илясов В.В. ОТНОСИТЕЛЬНЫЙ АБРАЗИВНЫЙ ИЗНОС ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ ПЕРВЫХ ПРИНЦИПОВ	105
Казаков А.М., Кузвесова А.А. РАЗРАБОТКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА КОНСЕРВАЦИОННЫХ, ЗАЩИТНЫХ И ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ	106
Калугин И.А., Сафонов Б.П. РАЗРАБОТКА СКЛЕРОМЕТРА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ГАЗОПРОМЫСЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ	108

Керопян А.М., Басов Р.К. СВЯЗЬ КОЭФФИЦИЕНТА СЦЕПЛЕНИЯ С ШЕРОХОВАТОСТЬЮ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПАРЫ КОЛЕСО - РЕЛЬС	110
Клишин П.В., Латышев А.П., Моисеев А.А., Юнисов И.К. ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ ПУТЁМ ПРИМЕНЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ МОТОРНЫХ МАСЕЛ С УЛУЧШЕННЫМИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ	112
Ковалёва И.Н., Григорьев А.Я. ПЛАСТИЧЕСКАЯ СМАЗКА НА ОСНОВЕ РАПСОВОГО МАСЛА И ПЧЕЛИНОГО ВОСКА	113
Колесников В.И., Мигаль Ю.Ф., Савенкова М.А., Колесников И.В. КВАНТОВО-ХИМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИСАДКИ ФОСФОМОЛИБДАТА КОБАЛЬТА С ПОВЕРХНОСТЬЮ МЕТАЛЛА	114
Колубаев А.В., Сизова О.В., Заикина А.А., Иванов К.В., Филиппов А.В., Колубаев Е.А., Псахье С.Г. О РОЛИ ЗЕРНОГРАНИЧНОГО СКОЛЬЖЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ И ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ	116
Колубаев Е.А., Рубцов В.Е., Фортуна С.В., Елисеев А.А., Калашникова Т.А., Колубаев А.В. ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ	118
Кондратенко В.В., Сузиков В.В., Никитин И.М., Прокопцова М.Д. ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОТИВОИЗНОСНЫХ СВОЙСТВ РЕАКТИВНЫХ ТОПЛИВ В УСЛОВИЯХ КОМБИНИРОВАННОГО ТРЕНИЯ В ПАРЕ «ШАР-ЦИЛИНДР»	120
Копченков В.Г., Мацко А.В. ОЦЕНКА МЕХАНИЗМОВ ИЗНАШИВАНИЯ ЭЛАСТОМЕРНОГО УПЛОТНИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ГЕРМЕТИЗАТОРА КОЛТЮБИНГОВОЙ УСТАНОВКИ	121
Короткевич С.В., Пинчук В.Г., Ковалёв Е.А., Бобович С.О. ВЗАИМОСВЯЗЬ КИНЕТИКИ МИКРОСТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ МЕТАЛЛА И ГРАНИЧНОГО СМАЗОЧНОГО СЛОЯ С ИЗНАШИВАНИЕМ	122
Коршунов А.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СМАЗОЧНО - ОХЛАЖДАЮЩИХ ЖИДКОСТЕЙ НА ПРОЦЕССЫ ЛЕЗВИЙНОЙ И АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ	124
Кошелев В.Н., Тонконогов Б.П., Килякова А.Ю., Алексанян К.Г., Мовсумзаде Э.М., Алексанян Д.Р., Гличева К.Р. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПИГМЕНТОВ РАЗЛИЧНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА АНТИФРИКЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМОЧЕВИННЫХ СМАЗОК	126
Крамер О.Л., Трофимов А.С., Никольская В.В. РЕЗУЛЬТАТЫ РАЗРАБОТКИ, ИСПЫТАНИЙ И ВНЕДРЕНИЙ КАНАТНЫХ СМАЗОК	127
Краснов А.П., Буяев Д.И., Наумкин А.В., Горошков М.В. НОВЫЕ ПОЛИМЕРЫ И ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ НА ИХ ОСНОВЕ	128
Крахмалев С.И., Платонова Р.Г. ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ МЫЛЬНЫХ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК НА ФОРМИРОВАНИЕ СМАЗОЧНОГО СЛОЯ В ЗОНЕ ТРЕНИЯ	130
Кужаров А.А., Лукьянов Б.С. НЕКОТОРЫЕ ТРИБОХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ ГЛИЦЕРИНА	130
Кужаров А.А., Милов А.А., Герасина Ю.С. ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ И ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОКЛАСТЕРОВ МЕДИ	131
Кузнецов В.П., Скоробогатов А.С., Червач Ю.Б. ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ	133

Купрянов А.А., Румянцев Е.О. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭЛАСТОМЕРОВ НА ПОВЕРХНОСТЯХ, ПОКРЫТЫХ СЛОЕМ ЛЬДА, ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ТЯГОВО-СЦЕПНЫХ СВОЙСТВ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН	135
Курапов П.А., Новиков В.С., Эфрос Д.Г., Федош Д.А. О МЕХАНИЗМЕ ИЗНАШИВАНИЯ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС РЕДУКТОРНЫХ СИСТЕМ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ	137
Лашхи В.Л., Чудиновских А.Л. ОПИСАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ОБЩЕГО СОСТОЯНИЯ МАСЛА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ИЗНОС ТРУЩИХСЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ	138
Лахоткин Ю.В., Головин Ю.И., Душик В.В., Шуклинов А.А., Кузьмин В.П., Рожанский Н.В., Рыбкина Т.В., Шапоренков А.А. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ ВОЛЬФРАМА	139
Левченко В.А., Буяновский И.А., Большаков А.Н., Зеленская М.Н., Матвеев В.Н. УСПЕХИ В СИНТЕЗЕ И ИССЛЕДОВАНИИ НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ – ОРИЕНТАНТОВ	141
Лешок А.В., Ильющенко А.Ф., Роговой А.Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ КОНТРЕЛА ИЗ СТАЛИ 65Г РАБОТАЮЩЕГО В ПАРЕ С МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИМ ФРИКЦИОННЫМ МАТЕРИАЛОМ МК-5	143
Лисицын Р.Ю., Новиков В.В., Бурченков К.С., Афанасьева О.В., Сырбу С.А. УСТРОЙСТВО И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТРИБОМЕТРА ТЛПТ-01	144
Любинин И.А. ХИММОТОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ИСПЫТАНИЙ И ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОК	146
Лядов А.С., Шахматова А.С., Максимова Ю.М., Кириллов В.В., Окнина Н.В. ПЛАСТИЧНЫЕ СМАЗКИ С ПОЛИМОЧЕВИННЫМИ ЗАГУСТИТЕЛЯМИ ДЛЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ В АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ	147
Малафеев С.И., Копейкин А.И. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС В ТРИБОМЕТРИЧЕСКОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ	148
Малафеев С.И., Малафеева А.А., Коняшин В.И. ОГРАНИЧЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК В МЕХАТРОННОЙ СИСТЕМЕ ПРОКАТНОГО СТАНА	150
Маленко П.И., Леонов А.Ю., Релмасира К.Д. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВОСХОДЯЩЕЙ ДИФфуЗИИ В ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЯХ СТАЛЕЙ С ПОКРЫТИЕМ ПРИ ТРЕНИИ СКОЛЬЖЕНИЯ С РЕСУРСНЫМ СМАЗЫВАНИЕМ	151
Малютин К.В., Мисоченко А.А., Столяров В.В. МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КЕРАМИЧЕСКОГО НАНОКОМПОЗИТА ГРАФЕН/AL ₂ O ₃	153
Мандель А.М., Ошурко В.Б., Соломахо Г.И., Соломахо К.Г., Шарц А.А. ТУННЕЛЬНОЕ БЕСКОНТАКТНОЕ ТРЕНИЕ МЕТАЛЛОВ	154
Матвеевский В.Р. РОСТИСЛАВ МИТРОФАНОВИЧ МАТВЕЕВСКИЙ – ГЛАЗАМИ СЫНА	156
Матвеевский В.Р., [Матвеевский Б.Р.] К ВОПРОСУ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ ПРИ КОНТРОЛЕ ИЗНОСА ОБОРУДОВАНИЯ МЕТОДАМИ БОРТОВОЙ ТРИБОДИАГНОСТИКИ	157
Миронов А.Е., Гершман Е.И., Гершман И.С. ЗАМЕНА БРОНЗ НА АЛЮМИНИЕВЫЕ ЛИТЕЙНЫЕ СПЛАВЫ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ МОНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ	158

	Стр.
Михеев Р.С., Коберник Н.В., Калашников И.Е., Болотова Л.К., Быков П.А., Кобелева Л.И., Колмаков А.Г. ИЗНАШИВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ БАББИТА Б83, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ДУГОВОЙ НАПЛАВКИ, В УСЛОВИЯХ СУХОГО ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ	160
Моисеев А.А. КРИТЕРИАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ФОРМИРОВАНИИ КВАЛИФИКАЦИОННЫХ НОРМАТИВОВ	161
Мотова Е.А. ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННО-МЕХАНИЧЕСКОГО ИЗНАШИВАНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	163
Мышкин Н.К. ГРАНИЧНАЯ СМАЗКА И МАССОПЕРЕНОС ПРИ ТРЕНИИ	164
Наумов А.Г., Латышев В.Н., Раднюк В.С., Наумова О.А. О МЕХАНИЗМЕ ДЕЙСТВИЯ СОТС ПРИ ЛЕЗВИЙНОМ РЕЗАНИИ МЕТАЛЛОВ	165
Никольская В.В., Головин В.П., Казаков А.М., Юсупов М.Р. ИСПЫТАНИЕ СТАЛЬНЫХ КАНАТОВ НА ВЫНОСЛИВОСТЬ	166
Новиков В.В., Афанасьева О.В. РАСЧЕТ ДЕФОРМАЦИЙ И УГЛОВ СДВИГА В СТРУЖКЕ С ПОМОЩЬЮ ТРИБОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СТРУЖКООБРАЗОВАНИЯ	167
Новиков В.И. ТРИБОЛОГИЯ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЮ	169
Новиков В.И. СЕТЕВОЙ МАРКЕТИНГ КАК ИНСТРУМЕНТ ВЫВОДА РОССИЙСКИХ ИННОВАЦИОННЫХ ПРОДУКТОВ НА МИРОВОЙ РЫНОК	171
Ноженков М.В. СВЕРХНИЗКОЕ ТРЕНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ	172
Носко А.Л. МЕТОДИКА РАСЧЕТА НАГРЕВА ЭЛЕМЕНТОВ ФРИКЦИОННЫХ ПАР ТОРМОЗОВ ПОДЪЕМНО-ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН	173
Оганесова Э.Ю., Займовская Т.А., Бордубанова Е.Г., Лядов А.С., Паренаго О.П. ТРИБОЛОГИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАНОРАЗМЕРНЫХ ЧАСТИЦ СУЛЬФИДОВ ВОЛЬФРАМА КАК ПРИСАДОК К СМАЗОЧНЫМ МАСЛАМ	175
Огар П.М., Горохов Д.Б., Кожевников А.С. ЖЕСТКОСТНАЯ МОДЕЛЬ СЛОИСТОГО УПРУГОГО ТЕЛА И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ В ТРИБОМЕХАНИКЕ	176
Огар П.М., Горохов Д.Б., Кожевников А.С. ПРИМЕНЕНИЕ ЭМПИРИЧЕСКОГО ЗАКОНА МАЙЕРА ДЛЯ УЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК УПРОЧНЯЕМОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ВНЕДРЕНИИ СФЕРЫ	177
Орешенков А.В., Степанова С.Е. ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГОРЮЧЕ-СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ	179
Павелко Г.Ф., Бондаренко Г.Н., Бордубанова Е.Г., Займовская Т.А., Лядов А.С., Паренаго О.П. НЕОБЫЧНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ПРОТИВОИЗНОСНЫХ СВОЙСТВ ОТ СОСТАВА СМЕСИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ МАСЕЛ С ПОЛИОРГАНОСИЛОКСАНАМИ	181
Памфилов Е.А., Шевелева Е.В., Прусс Б.Н. КОМПОЗИЦИОННЫЕ АНТИФРИКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСИНЫ	182
Памфилов Е.А., Сиваков В.В., Грядунов С.С. ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА, РАБОТАЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР	183

	Стр.
Памфилов Е.А., Пилюшина Г.А.	
ОСОБЕННОСТИ ИЗНАШИВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ	185
Панайоти В.А.	
ОЦЕНКА СМАЗЫВАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ТСМ ПО КОЭФФИЦИЕНТУ АБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ	187
Перекрестов А.П., Свекольников С.А., Чанчиков В.А.	
ПРИМЕНЕНИЕ МИЦЕЛЛЯРНОЙ ПРОТИВОИЗНОСНОЙ НАНОПРИСАДКИ НА ОСНОВЕ ДИСЕЛЕНИДА МОЛИБДЕНА В СМАЗОЧНОМ МАСЛЕ СУДОВЫХ ДВС	188
Перекрестов А.П., Гужвенко И.Н., Чанчиков В.А.	
ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ ДИСПЕРГАЦИИ МОДИФИКАТОРА ТРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ДИСЕЛЕНИДА МОЛИБДЕНА НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПРОТИВОИЗНОСНЫХ ПРИСАДОК	189
Петухов А.Н.	
ФРЕТТИНГ И ФРЕТТИНГ-УСТАЛОСТЬ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ МАЛОПОДВИЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ГТД И ГТУ	191
Пинчук В.Г., Короткевич С.В., Бобович С.О., Кравченко В.В.	
РАЗРАБОТКА ЛИТИЕВЫХ ПЛАСТИЧНЫХ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ДОБАВКОЙ ПОЛИТРИФТОРХЛОРЕТИЛЕНА И ДИФЕНИЛАМИНА	192
Погодаев Л. И., Ежов Ю. Е., Кузьмин В. Н.	
ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ГРУНТОВЫХ НАСОСОВ ЗЕМСНАРЯДОВ	193
Покидько Б.В., Роцин М.Н., Абринова Э.С., Симакова Г.А.	
РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ОРГАНОБЕНТОНИТА. ВЛИЯНИЕ СТРОЕНИЯ АДСОРБЦИОННЫХ СЛОЕВ	194
Поляков С.А., Лычагин В.В., Захаров М.Н., Гончаров С.Ю., Куксенова Л.И.	
ПОВЫШЕНИЕ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ ЧЕРВЯЧНЫХ ПЕРЕДАЧ ПОДБОРОМ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ	196
Прожега М.В., Смирнов Н.И., Смирнов Н.Н.	
СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДИКИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ВАКУУМЕ	197
Прокопенко А.К., Голубев А.П.	
ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В РЕЖИМЕ "БЕЗЫЗНОСНОГО ТРЕНИЯ"	198
Пузырьков Д.Ф., Саранцева С.А., Корнилова О.П.	
РАЗРАБОТКА И ОПЫТНО - ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ МАСЕЛ ДЛЯ ВИНТОВЫХ КОМПРЕССОРОВ	199
Пучков В.Н., Дунаев В.В.	
ПРИМЕНЕНИЕ ТВЕРДЫХ СМАЗОЧНЫХ ПОКРЫТИЙ В БОЛТОВЫХ И ЗАКЛЕПОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ	201
Рачишкин А.А., Сутягин О.В., Болотов А.Н., Измайлов В.В.	
РАСЧЁТ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ НОМИНАЛЬНО НЕПОДВИЖНЫХ ШЕРОХОВАТЫХ СТЫКОВ МЕТОДОМ 3-Х МЕРНОГО КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	202
Рогов В.Е., Бохоева Л.А.	
ДИСПЕРСНЫЕ ЧАСТИЦЫ КАК ЛОКАЛЬНЫЕ ТРЕХМЕРНЫЕ НЕСПЛОШНОСТИ В ОБЪЕМЕ МАТРИЦЫ ИЗ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ	203
Русин Н.М., Скоренцев А.Л., Мишин И.П.	
ВЛИЯНИЕ МАКРО- И МИКРОСТРУКТУРЫ СПЕЧЕННЫХ СПЛАВОВ Al-Sn НА ИХ ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ ПРИ СУХОМ ТРЕНИИ	205
Самусенко В.Д., Доценко А.И., Зеленская М.Н.	
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДЕТЕРГЕНТОВ С ДИАЛКИЛДИТИОФОСФАТОМ ЦИНКА	207

	Стр.
Сафонов Б.П., Бегова А.В. ОЦЕНКА ПЛАСТИЧНОСТИ И ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРОЧНЕНИЯ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ КОНТАКТНОГО НАГРУЖЕНИЯ	209
Сачек Б.Я., Мезрин А.М., Муравьёва Т.И., Столярова О.О. РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ЗАДИРОСТОЙКОСТИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ АЛЮМИ- НИЕВЫХ СПЛАВОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИХ СКЛЕРОМЕТРИИ	211
Седакова Е.Б., Козырев Ю.П. ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМОСТОЙКИХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УЗЛАХ ТРЕНИЯ	213
Семенов М.Ю., Фахуртдинов Р.С., Дин Кай Цзянь О МЕХАНИЗМЕ КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ	214
Сербин В.М. КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ОРГАНОВ БИСЕРНЫХ ДИСПЕРГАТОРОВ	216
Сережкин М.А., Лавриненко В.Ю., Ступников В.П., Мельников Э.Л., Ларина А.В. СПОСОБ СНИЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ТРЕНИЯ И КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПРИ ВЫТЯЖКЕ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО АЛЮМИНИЯ	218
Скоробогатов А.С., Кузнецов В.П., Столяров В.В., Малютин К.В. ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЗАКАЛЁННЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ ПОДВЕРГ- НУТЫХ НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕМУ ВЫГЛАЖИВАНИЮ	220
Скоромнов В.М., Филина Н.А., Высокок М.И. ВОЛОЧЕНИЕ ЛАТУННЫХ ЗАГОТОВОК ИНСТРУМЕНТОМ С РЕГУЛЯРНОЙ МИКРОГЕОМЕТ- РИЕЙ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ	222
Скоромнов В.М., Филина Н.А., Высокок М.И. УЛУЧШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МЕТОДОВ ВОЛОЧЕНИЯ	224
Скотникова М.А., Полковникова М.К. ПРИМЕНЕНИЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОДШИПНИКОВ	225
Смирнов Н.И., Албагачиев А.Ю., Смирнов Н.Н., Прожега М.В. КОСМИЧЕСКАЯ ТРИБОЛОГИЯ: ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ МЕХАНИЗМОВ ДЛЯ РАБОТЫ В КОСМОСЕ	227
Смирнов Н.И., Яговкина А.Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В АБРАЗИВОСО- ДЕРЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ	228
Столяров В.В., Мисоченко А.А., Малютин К.В., Григорьев Е.Г., Жолнин А.Г., Кляцкина Е.А., Bogas V.A. ВЛИЯНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ГРАФЕНА НА ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НАНОКОМПОЗИ- ТА Al ₂ O ₃ - ГРАФЕН (Influence of grafene content on tribological properties of nanocomposite Al ₂ O ₃ - G)	229
Суслов А.Г., Шалыгин М.Г. ДЕФОРМАЦИОННО-АДГЕЗИОННАЯ МОДЕЛЬ ИЗНАШИВАНИЯ НА УРОВНЕ СУБШЕРОХО- ВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ	231
Титов В.В. ПРОБЛЕМЫ РАСЧЕТА, ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИСПЫТАНИЙ ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ОКБ СУХОГО	233
Топоров Ю.П., Савенко В.И., Клюев В.А., Малкин А.И. ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СМАЗОЧНО-РАЗМОЛЬНЫХ СРЕД НА ГРАНУЛОМЕТРИЧЕ- СКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ, МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ	235

Торская Е.В., Мезрин А.М. КОНТАКТНО-УСТАЛОСТНОЕ РАЗРУШЕНИЕ ПО ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ПОКРЫТИЯ С ПОДЛОЖКОЙ ПРИ МНОГОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ	236
Торская Е.В., Ляховецкий М.А., Корнев Ю.В. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ И ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ТРЕНИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ	238
Тюленев Д.Г., Фазлиахметов Ф.Н. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ СМАЗОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ ДЛЯ ВОЛОЧЕНИЯ ТРУБ ИЗ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ И НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ	240
Тюрин А.И., Пирожкова Т.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ТВЕРДЫХ ТЕЛ В НАНО- И МИКРОШКАЛЕ	241
Усов П.П. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА РЕШЕНИЙ ОДНОЙ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ СМАЗКИ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ	243
Усов П.П. ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ВЯЗКОГО СМАЗОЧНОГО СЛОЯ МЕЖДУ ПОВЕРХНОСТЯМИ ВЯЗКОУПРУГИХ ТЕЛ	245
Фадин В.В., Алеутдинова М.И., Алеутдинов К.А. ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ПАРЫ ТРЕНИЯ СТАЛЬНОЙ КОМПОЗИТ/МЕДЬ ПРИ СКОЛЬЖЕНИИ С ТОКОСЪЕМОМ	247
Федоров С.В. НАНОКВАНТОВАЯ ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛА ГИББСА КАК ХАРАКТЕРИСТИКИ НАСЛЕДСТВЕННЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА	248
Федоров С.В. ПРИНЦИП НАНОРАЗМЕРНОГО СТРУКТУРИРОВАНИЯ КОНТАКТА ТРЕНИЯ	249
Фильков М.Н., Дунаев А.В., Крушенко Г.Г. ИННОВАЦИОННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ В ТРИБОТЕХНИКЕ	251
Хасьянова Д.У. ПРИМЕНЕНИЕ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ МУФТ ИЗ МАТЕРИАЛА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ ПРИ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ	252
Хопин П.Н. ТЕРМОКОРРЕЛЯЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПАР ТРЕНИЯ С ТВЁРДОСМАЗОЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ ДЛЯ УСЛОВИЙ НОРМАЛЬНОЙ АТМОСФЕРЫ	254
Хопин П.Н. ТЕРМОКОРРЕЛЯЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ПАР ТРЕНИЯ С ТВЁРДОСМАЗОЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ ДЛЯ УСЛОВИЙ ВАКУУМА	255
Хрущов М.М., Левин И.С., Марченко Е.А., Шальнов С.А., Шергунов В.А. НАНОКОМПОЗИТНАЯ СТРУКТУРА АЛМАЗОПОДОБНЫХ УГЛЕРОДНЫХ ПОКРЫТИЙ, ЛЕГИРОВАННЫХ МЕТАЛЛАМИ ГРУППЫ ХРОМА, И ИХ ТРИБОЛОГИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ	257
Хрущов М.М., Марченко Е.А., Антонова О.С., Токарев Д.А. ОСОБЕННОСТИ ПОВЕРХНОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ТРЕНИИ АЛМАЗОПОДОБНЫХ ПОКРЫТИЙ ТОЛЩИНОЙ < 500 нм	258
Цветков О.Н., Черемискин А.Л. ТРИБОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА СВОЙСТВ СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ	260

	Стр.
Цуканов И.Ю., Албагачиев А.Ю. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ СВЯЗИ В УПРУГОМ КОНТАКТЕ ПОВЕРХНОСТЕЙ С РЕГУЛЯРНЫМИ НЕРОВНОСТЯМИ	262
Цуканов И.Ю., Угурчиев У.Х., Новикова Н.Н. К ВОПРОСУ О ПРИМЕНЕНИИ МОДЕЛИ НЕРОВНОСТИ ПРОИЗВОЛЬНОЙ ФОРМЫ В ИНЖЕНЕРНОМ АНАЛИЗЕ КОНТАКТА ШЕРОХОВАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	264
Ченцов А.В. РАЗВИТИЕ СЛОЯ С ВЫСОКИМ ГРАДИЕНТОМ СВОЙСТВ ВБЛИЗИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДАВЛЕНИЕМ	266
Чертовских С.В., Шустер Л.Ш., Мисоченко А.А., Столяров В.В. ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАНОСТРУК- ТУРНОГО СПЛАВА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ	267
Чхетиани П.Д., Щербаков Ю.И. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ И МАШИНА ТРЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ОТ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ В РАДИАЛЬНЫХ ОДНОРЯДНЫХ ШАРИКОПОДШИПНИКАХ	269
Чхетиани П.Д., Щербаков Ю.И. МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ И МАШИНА ТРЕНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАВИСИМОСТИ КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ОТ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ В УПОРНЫХ ОДНОРЯДНЫХ ШАРИКОПОДШИПНИКАХ	270
Шабалинская Л.А., Голованов В.В., Бубнова Е.С., Мельников А.О. ДИАГНОСТИКА СТАДИИ ПОВЕРХНОСТНОГО УСТАЛОСТНОГО ИЗНАШИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ АВИАЦИОННЫХ РЕДУКТОРОВ МЕТОДАМИ ФЕРРОГРАФИИ	271
Шаталов Л.Н. ИССЛЕДОВАНИЕ ИСПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОРГАНОВ АВТОБАЛАНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОКЕРАМИКИ	273
Шолом В.Ю. ОПЫТ ВНЕДРЕНИЯ РАЗРАБОТОК ТЕХНОПАРКА ХТЦ УАИ В ПРОМЫШЛЕННОСТЬ	274
Шпенёв А.Г. СКОЛЬЖЕНИЕ ШЕРОХОВАТОГО ЦИЛИНДРА ПО ВЯЗКОУПРУГОМУ ОСНОВАНИЮ В УСЛОВИЯХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СМАЗЫВАНИЯ	275
Шустер Л.Ш., Камалетдинова Р.Р. РОЛЬ КЕРМЕТОВ В МЕХАНИЗМЕ ФОРМИРОВАНИЯ ИЗНОСА ТРИБОСОПРЯЖЕНИЙ	277

ТРИБОЛОГИЯ – МАШИНОСТРОЕНИЮ

**Труды XI Международной научно-технической конференции,
посвящённой 100-летию со дня рождения выдающегося
учёного проф. Р.М. Матвеевского**

1–3 ноября 2016 года

Сборник тезисов докладов

Подписано в печать 22.09.2016. Формат 60×84 ¹/₁₆.

Гарнитура «Таймс». Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 33,71. Уч.-изд. л. 36,21. Заказ № 16-70.

Отпечатано в АНО «Ижевский институт компьютерных исследований»

426034, г. Ижевск, ул. Кооперативная, д. 5

Тел./факс: +7 (3412) 50-02-95