

На правах рукописи

Больших Иван Валерьевич

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРИБОСИСТЕМ
С КОМПОЗИЦИОННЫМ ПОКРЫТИЕМ ХОЛОДНОГО ОТВЕРЖДЕНИЯ**

Специальность 05.02.04 – «Трение и износ в машинах»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Ростов – на – Дону
2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС)

Научный руководитель - Кохановский Вадим Алексеевич,
доктор технических наук, профессор кафедры
«Технология металлов»
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный
университет путей сообщения»

Официальные оппоненты - Бутенко Виктор Иванович,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Технология машиностроения»
ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет»;

Памфилов Евгений Анатольевич,
доктор технических наук, профессор
кафедры «Триботехническое материаловедение
и технологии материалов» ФГБОУ ВО «Брянский
государственный технический университет»

Ведущее предприятие - ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный
политехнический университет (НПИ) им. М.И.
Платова»

Защита диссертации состоится «23» декабря 2019 года в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 218.010.02 при ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО РГУПС по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, Ростовской обл., пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2 и на сайте <http://www.rgups.ru>.

Автореферат разослан «__» ноября 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 218.010.02,
доктор технических наук, профессор

П. Н. Щербак

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Увеличение ресурса трибосистем, а также снижение потерь на трение является основной задачей машиностроения в области трибологии. Перспективным методом улучшения параметров трибосистем представляется нанесение на их контактные поверхности различных типов износостойких покрытий. К подобным материалам относятся и антифрикционные полимерные композиты, фиксированные на одной из контактных поверхностей и обеспечивающие высокую несущую способность, низкие потери на трение и значительный ресурс.

Исследуемые антифрикционные полимерные композиционные покрытия предназначены для эксплуатации при высоких нагрузках в самых разных отраслях машиностроения. Они применяются в авиакосмической технике, автомобилестроении, станкостроении, подъемно-транспортных и других машинах. Эти материалы работают в режиме граничного трения при самосмазывании фторопластом и практически не требуют текущего технического обслуживания.

Композиционная структура полимерных покрытий исследуемого класса образована специальным тканым каркасом и, как правило, фенольной матрицей. Ткани имеют рабочую поверхность из антифрикционных нитей фторопласта («полифен»), а изнанку – из прочных нитей полиимида («аримид Т»).

Фенолоформальдегидное матричное связующее, являющееся также адгезивом для фиксации покрытия, требует горячего (200°С) отверждения, что значительно усложняет технологию нанесения покрытия, и даже препятствует его применению для крупногабаритных трибоузлов, термообработанных сталей и старящихся сплавов.

Расширение области промышленного применения высокоэффективных антифрикционных покрытий требует разработки нового матричного связующего холодного отверждения. Это вызывает необходимость в решении целого комплекса связанных задач о технологических режимах нанесения покрытия и его триботехнических характеристиках.

Применение связующего холодного отверждения на основе эпоксидной смолы требует повышения прочностных и теплофизических характеристик композиционного покрытия, что достигается введением в его состав мелкодисперсной меди. Одновременно снижение общего уровня генерации тепла в процессе трения осуществляется добавкой масла, совместимого со связующим.

Таким образом, работа, посвященная исследованию антифрикционных композиционных покрытий с матричным связующим холодного отверждения, является актуальной.

Степень разработанности проблемы. Конструкция и технология применения фторопластсодержащих антифрикционных покрытий, рассматриваемого класса, достаточно хорошо исследованы для относительно малогабаритных деталей. Их разработкой и применением занимались как ученые нашей страны Г.П. Барчан, В.А. Кохановский, А.С. Кужаров, так и зарубежные W.D. Craig, J.K. Lancaster и др. При этом нанесение композиционного покрытия выполнялось, в основном, при горячем отверждении, а некоторые результаты

применения холодноотверждаемой матрицы носят разовый несистематический характер. Всё это значительно снижает возможности применения антифрикционных покрытий данного класса и требует дальнейших исследований.

Цель диссертационной работы - расширение области применения антифрикционных полимерных композиционных покрытий на основе модификации матричного связующего холодного отверждения.

Выполнение поставленной цели требует решения следующего **комплекса задач**.

1. Разработать антифрикционное композиционное покрытие с матричным связующим холодного отверждения, обеспечивающим работоспособность тяжело нагруженных крупногабаритных трибосистем.

2. Установить основные закономерности изменения адгезионных и вязкоупругих характеристик модифицированных антифрикционных покрытий от режимов нагружения.

3. Отработать технологию нанесения композиционных покрытий, обеспечивающую уровень требуемых эксплуатационных параметров.

4. Определить рациональные нагрузочно-скоростные режимы эксплуатации металлополимерных трибосистем с исследуемым композиционным покрытием.

5. Выполнить проверку эффективности разработок, значимость выводов и рекомендаций в промышленных условиях.

Объектом исследований являются процессы трения и изнашивания металлополимерных трибосистем, работающих в режиме граничного смазывания.

Предмет исследований – это металлополимерная трибосистема с композиционным покрытием и матричным связующим холодного отверждения.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработка матричного компаунда холодного отверждения для крупногабаритных трибосистем, который является одновременно адгезивом для нанесения покрытия, обеспечивающий достаточную прочность и адгезию.

2. Результаты многокритериальной оптимизации в виде композиционного антифрикционного материала с матрицей холодного отверждения для тяжело нагруженных крупногабаритных узлов трения.

3. Итоги выполненных теоретических исследований контактной температуры в зоне трения, численные результаты компьютерного моделирования и данные экспериментальных температурных исследований.

4. Комплекс моделей, отражающих зависимость триботехнических параметров металлополимерной пары трения (коэффициент трения, температура контактной зоны, интенсивность изнашивания, ресурс) от эксплуатационных режимов нагружения трибосистем.

Научная новизна результатов исследований.

1. Установлен оптимальный состав матричного связующего холодного отверждения на основе эпоксидной смолы, обеспечивающий работоспособность покрытий благодаря требуемой прочности и адгезии при закреплении на субстрате.

2. Разработан композиционный полимерный материал с матрицей холодного отверждения и технология его нанесения в виде антифрикционных покрытий на крупногабаритные или не допускающие дополнительного нагрева детали.

3. Методика и результаты реализации многокритериальной (прочность, адгезия, вязкоупругие свойства, коэффициент трения, износ) оптимизации композиционного состава антифрикционного покрытия на основе симплекс-решётчатых экспериментальных планов.

4. Основные закономерности влияния эксплуатационных нагрузочно-скоростных режимов на триботехнические характеристики металлополимерных трибосистем с покрытием оптимального состава, имеющим холодноотверждающееся матричное связующее.

Теоретическая и практическая значимость исследований.

Теоретическая часть работы включает следующее.

1. Расчёт пороговой и фактической величины, допустимой при эксплуатации покрытия, температуры и установленная зависимость температуры зоны трения в исследуемой металлополимерной трибосистеме от режимов нагружения.

2. Компьютерное моделирование методом конечных элементов (комплекс COMSOL Multiphysics) распределения температуры в зоне контакта и прилегающих областях.

Практическая значимость работы заключается в следующем.

1. Установлен оптимальный состав полимерного матричного связующего холодного отверждения, обеспечивающий требуемые прочностные, адгезионные, вязкоупругие и триботехнические характеристики антифрикционных покрытий.

2. Определены параметры технологии нанесения антифрикционных покрытий на субстраты двух типов (сталь и медные сплавы) и определён диапазон рациональных нагрузочно-скоростных режимов эксплуатации антифрикционных композиционных покрытий.

3. Для инженерных расчетов антифрикционных полимерных композиционных покрытий получен комплекс интерполяционных регрессионных моделей, позволяющих определить следующие трибопараметры: ресурс, интенсивность изнашивания, коэффициент трения, температуру.

4. Промышленные испытания подшипников, разработанных по итогам исследований, проведенные на технологическом оборудовании Ростовского-на-Дону электровозоремонтного завода (РЭРЗ), позволили увеличить износостойкость узла трения на 22 – 23,5%.

Степень достоверности результатов работы обеспечивалась обоснованной постановкой исследовательских задач и их полным выполнением в ходе исследований. Теоретические результаты получены на основе известных классических законов физики (Фурье, Ньютона-Рихмана), а также численных расчетов, выполненными при помощи современных компьютерных программ (COMSOL Multiphysics).

Контрольно-измерительные средства при проведении экспериментальных исследований подвергались своевременной поверке. Все экспериментальные исследования проводились по полнофакторным и симплекс-решетчатым планам с последующей статистической обработкой результатов. Число параллельных опытов составляло не менее 3 - 5.

Апробация работы. Основные положения работы обсуждались на: 13-й Международной научно-практической конференции Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова «Проблемы синергетики в трибологии, трибоэлектрохимии материаловедении и мехатронике»; научно-технической профессорско-преподавательской конференции ДГТУ в 2015 г.; Международной научной конференции «МЕХТРИБО-ТРАНС-2016»; Всероссийской национальной научно-практической конференции «Наука-2017»; Всероссийской национальной научно-практической конференции «Наука-2018».

Промышленные испытания разработанных подшипников в опорных узлах бандажировочного станка Ростовского-на-Дону электровозоремонтного завода показали удовлетворительные результаты, увеличив ресурс узла на 22 - 23,5%.

Полученные результаты нашли применение при проведении исследований, выполненных при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 10-08-00777 А.

Диссертация выполнялась в лабораториях кафедры «Технология металлов» и «Теоретическая механика» Ростовского государственного университета путей сообщения.

Публикации. Основное содержание диссертации и результаты исследований опубликованы в 14 научных работах (общим объёмом 6,44 п. л. лично автору принадлежат 3,51 п. л.), в том числе 4 работы - в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования в науки РФ, 1 публикация в издании, включённом в базу данных Web of Science и Scopus.

Структура и объём работ определены целью и задачами, поставленными и решенными в ходе исследования. Работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов, библиографического списка из 167 наименований. Общий объём работы составляет 134 страниц, включает 62 рисунка и 22 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований и показана степень их разработанности. Сформулирована общая цель и основные задачи диссертационной работы, приведена научная новизна, показана теоретическая и практическая значимость исследований.

В первой главе выполнен аналитический обзор области применения металлополимерных фторопластсодержащих трибосистем с композиционными антифрикционными покрытиями, описан их состав и композиционная структура, обоснованы потребности современной техники в холодной технологии нанесения покрытий, сделан анализ существующих матричных связующих, приведены их достоинства и недостатки. Отмечена особенность фторопласта в

достижении антифрикционных свойств покрытия и отсутствии адгезии к матричному связующему. Установлена важность выполнения рациональной технологии склеивания, обеспечивающей требуемую прочность клеевого соединения и работоспособность антифрикционного покрытия. Материал антифрикционных покрытий представляет собой гибридный композит с армирующим каркасом из специальной ткани, состоящей из антифрикционных фторопластовых нитей (полифен) и прочных – полиимидных (аримид Т). На лицевую рабочую сторону покрытия выведено 93-97% фторопластовых нитей, а на изнанку до 90% прочных с хорошей адгезией к связующему.

Вторая глава посвящена теоретическим исследованиям стационарной контактной температуры покрытия.

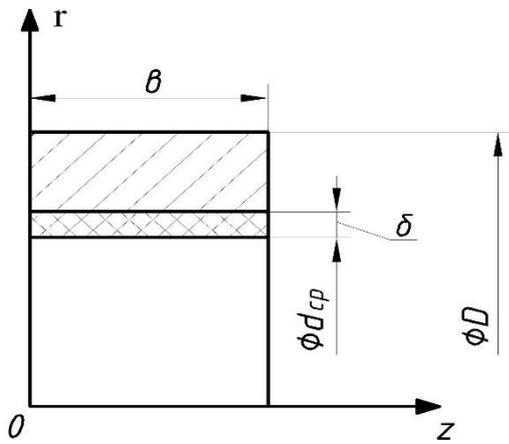


Рисунок - 1 Расчетная схема

Выполнен аналитический расчёт температуры в зоне трения радиально-упорных конических подшипников скольжения. Расчетная схема для среднего значения их диаметра представлена на рисунке 1.

В качестве основных допущений принимаем изотропность композиционного покрытия, наличие неподвижного кольцевого источника тепла и рассеивание тепловой энергии только в окружающую среду. Теплоотдача с торцевых поверхностей покрытия незначительна, поэтому ею пренебрегаем.

Предполагаем, что температурная функция во всей системе не имеет разрывов.

Исходным является дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье, соответствующее стационарным условиям:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

где $T(r, \varphi, z)$ - температурная функция.

Граничные условия для покрытия имеют вид:

$$T(r_0) = t_0 \quad \text{и} \quad T(r_1) = t_1, \quad (2)$$

где $r_0 = 0,5d$, а $r_1 = 0,5d + \delta$;

а для наружной подшипниковой втулки:

$$T(r_1) = t_1 \quad \text{и} \quad T(R) = t_2, \quad (3)$$

где $R = 0,5D$.

Учитывая, что $\frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial T}{\partial \varphi} = 0$, уравнение (1) примет следующий вид:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0, \quad (4)$$

Проинтегрировав его с граничными условиями (2) получим для покрытия:

$$T(r) = t_0 + (t_0 - t_1) \cdot \frac{\ln \frac{r_0}{r}}{\ln \frac{r_1}{r_0}} \quad (5)$$

и аналогичное выражение для подшипниковой втулки. Эти выражения используем для определения количества теплоты, проходящей через контактную и наружную поверхность в единицу времени:

$$Q(r) = \frac{2 \cdot \pi \cdot b \cdot \lambda}{\ln \frac{r_1}{r_0}} \cdot (t_0 - t_1). \quad (6)$$

где λ - коэффициент теплопроводности.

Количество теплоты, отдаваемой с поверхности наружного кольца в окружающую среду, определим по формуле Ньютона-Рихмана:

$$Q^* = \alpha \cdot K_T \cdot F_1 \cdot (t_K - t_C), \quad (7)$$

где α - средний коэффициент теплоотдачи;

K_T - коэффициент неравномерности нагрева;

t_K - температура подшипниковой втулки, К;

t_C - средняя температура окружающей среды, К;

F_1 - площадь поверхности подшипниковой втулки, м².

В итоге получаем выражение для контактной температуры композиционного покрытия:

$$t_0 = t_C + Q \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot b} \cdot \left(\frac{\ln \frac{r_1}{r_0}}{\lambda} + \frac{\ln \frac{R}{r_1}}{\lambda_1} \right) + \frac{1}{\alpha \cdot K_T \cdot F_1} \right]. \quad (8)$$

Разложив $\ln \left(1 + \frac{2 \cdot \delta}{d} \right)$ в степенной ряд и ограничившись линейным членом разложения, а также выразив количество теплоты через триботехнические параметры, получим окончательно:

$$t_0 = t_C + \beta \cdot f \cdot P \cdot V \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot b} \cdot \left(\frac{2\delta}{d\lambda} + \frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{D}{d+2\delta} \right) + \frac{1}{\alpha \cdot K_T \cdot F_1} \right] \quad (9)$$

где β - коэффициент, учитывающий часть общего теплового потока, идущего в подшипниковую втулку, определяемый по Шаррону;

f - коэффициент трения,

P – нагрузка, МПа;

V – скорость, м/с.

Результаты получены в виде конечного выражения, позволяющего выполнить предварительную инженерную оценку контактной температуры в зависимости от нагрузочно-скоростных режимов трения в исследованном диапазоне.

С целью достижения большей точности и устранения некоторых допущений при определении контактной температуры трибосопряжения, ее расчёт, при тех же условиях, был выполнен методом конечных элементов с применением компьютерного моделирования в комплексе COMSOL Multiphysics.

В качестве исходной модели тепловых процессов принято следующее выражение:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q, \quad (10)$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T$$

где ρ - плотность, кг/м³;

C_p - удельная теплоёмкость, Дж/кг·К;

k - коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;

\mathbf{u} - вектор скорости движения, м/с;

∇ - векторный дифференциальный оператор;

\mathbf{q} - поток тепловой энергии, Вт/м²;

Q - коэффициент теплоотдачи, Вт/м³.

В результате получены представленные ниже подробные картины теплового поля для контртел из стали 45 (рисунок 2). Данный материал, из группы исследованных, имеет наилучшие теплофизические характеристики.

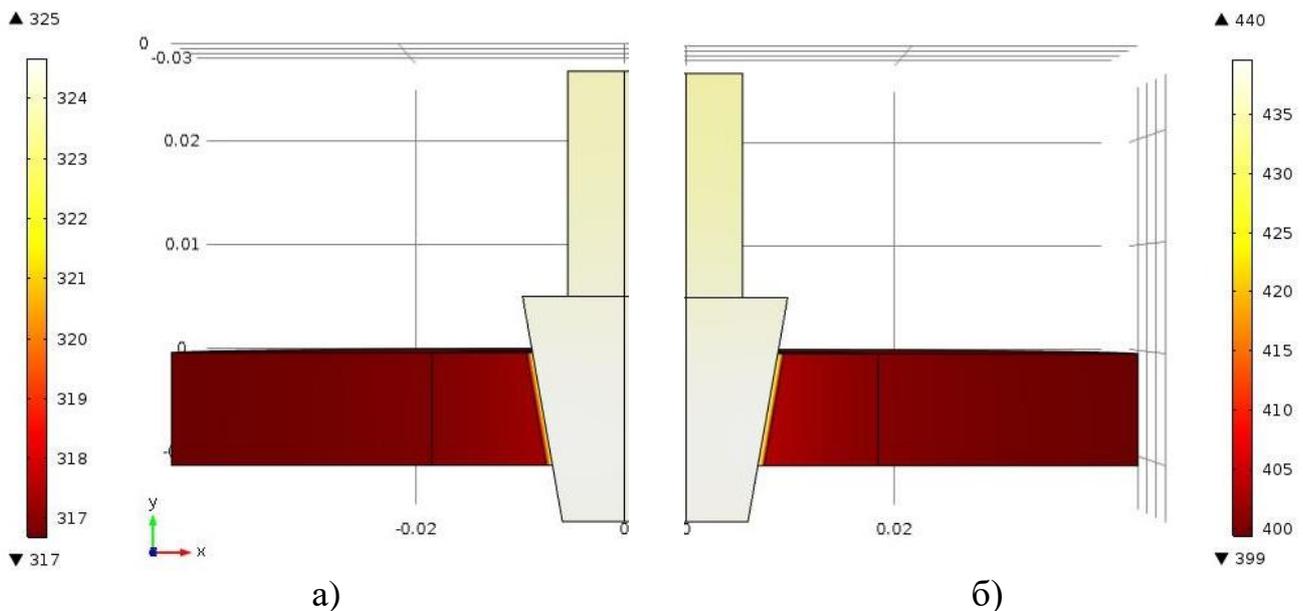


Рисунок - 2 Картина теплового поля (сталь 45):

а) минимальный нагрузочно-скоростной режим ($V = 0,1$ м/с; $\sigma = 5$ МПа);

б) максимальный ($V = 0,2$ м/с; $\sigma = 70$ МПа).

Компьютерные расчёты контактной температуры отличаются от аналитических, в среднем, на 4 % в меньшую сторону. При минимальных нагрузочно-скоростных режимах - на 5,3 %, а при максимальных – 2,8 %.

В третьей главе описана общая методика экспериментальных исследований, приведена их общая схема (рисунок 3) и дана характеристика применяемого оборудования.

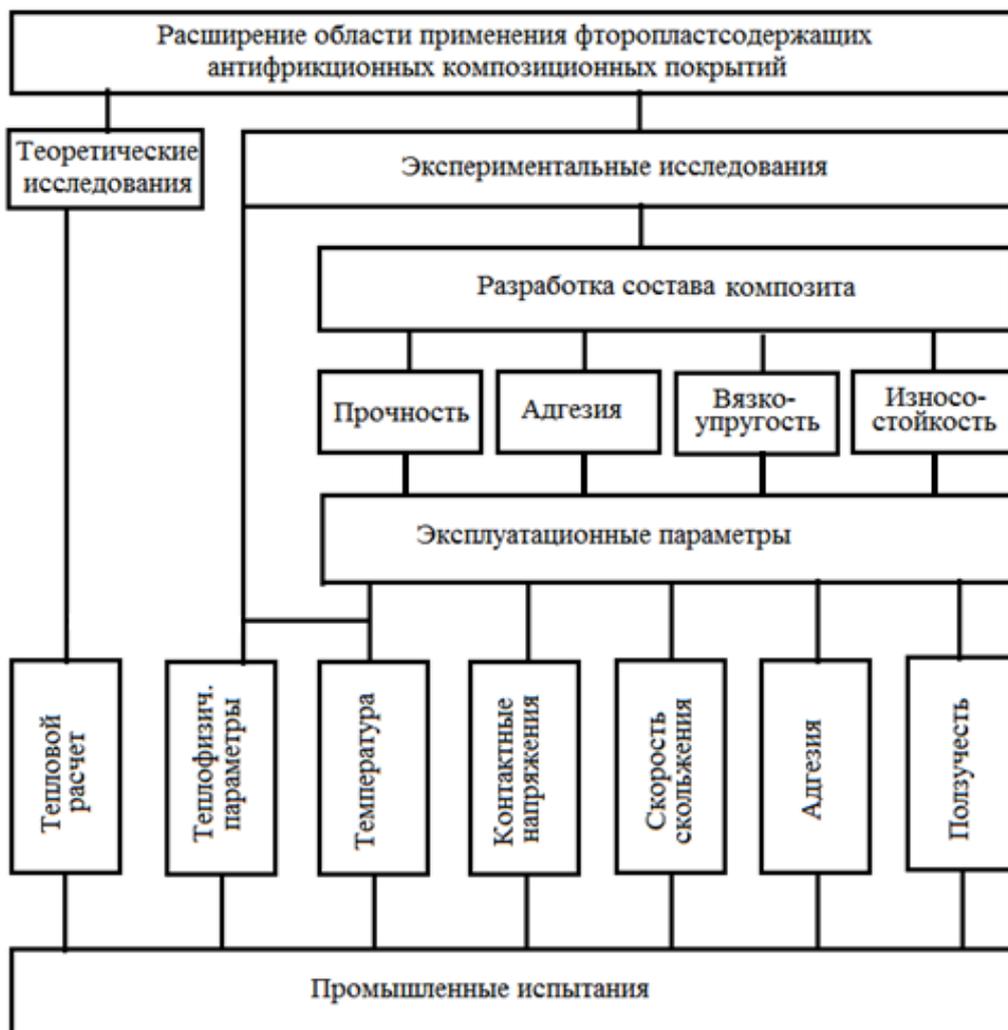


Рисунок - 3 Структурная схема исследований

Комплекс экспериментальных исследований разделён на два основных блока. В первом определялся оптимальный состав антифрикционного полимерного композита. Во втором устанавливался рациональный диапазон эксплуатационных режимов и их влияние на стандартные триботехнические характеристики разработанного покрытия. Все экспериментальные исследования первого блока выполнялись по симплекс решетчатому плану «состав-свойство» 3-го порядка (10 точек).

Адгезионная прочность композиционных покрытий с эпоксидной матрицей оценивалась по стандартной методике - величине усилия на отслаивание при отгибе свободного конца покрытия от плоского образца на 180 градусов.

Изгибная прочность матричного связующего и его вязкоупругие свойства

(ползучесть) исследовались на специальной установке. Усилие создавалось образцовым динамометром сжатия ДОСМ-3-1 (ГОСТ 9500-60), а вязкоупругая деформация измерялась двумя измерительными рычажно-зубчатыми головками с точностью до 0,001мкм.

Второй блок включал триботехнические исследования металлополимерных трибосистем, которые проводились в условиях вращательного движения при граничном режиме самосмазывания фторопластом на специальном стенде, собранном на базе настольно-сверлильного станка 2М112. Нагружение трибосистем осуществлялось динамометром растяжения ДПУ-0,5-2 (ГОСТ 13837 - 79) через рычажную систему. Изменение скорости вращения шпинделя станка выполнялось частотным преобразователем Altivar 312 модели ATV312HU15N4, включенным в цепь питания электродвигателя.

Образцы для триботехнических испытаний представляли собой модель радиально-упорного подшипника в виде втулки с коническим отверстием, облицованной антифрикционным композиционным покрытием. Контртела, сопрягаемые с покрытием, представляли собой конические валики с поверхностью, обработанной до 9 класса шероховатости ($R_a = 0,16 - 0,25$ мкм).

Для численной проверки результатов аналитических расчетов и компьютерного моделирования тепловых процессов были экспериментально определены теплофизические свойства покрытий методом дискретной калориметрии.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований. Оптимизация состава матричного материала композита выполнялась по трем параметрам: изгибной прочности, адгезионным и вязкоупругим свойствам (рисунок 4).

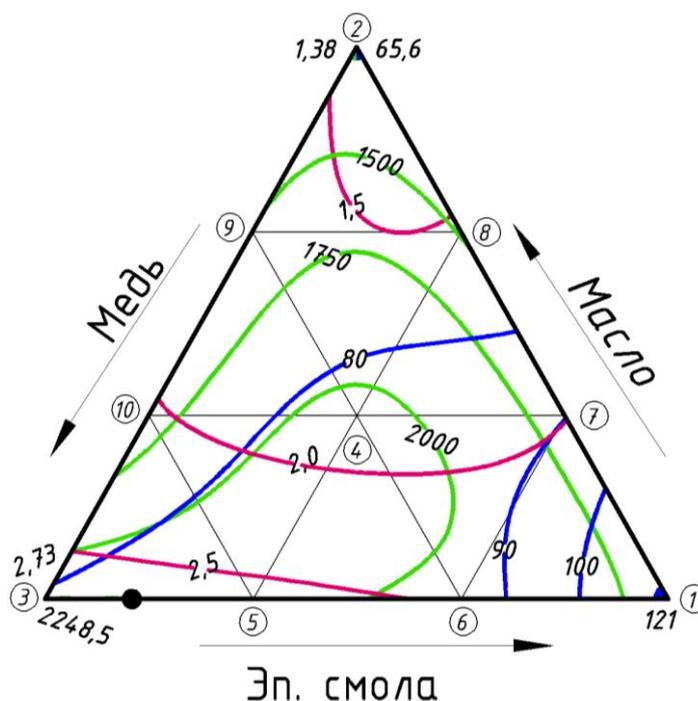


Рисунок - 4 Симплекс с оптимальным составом матричного связующего

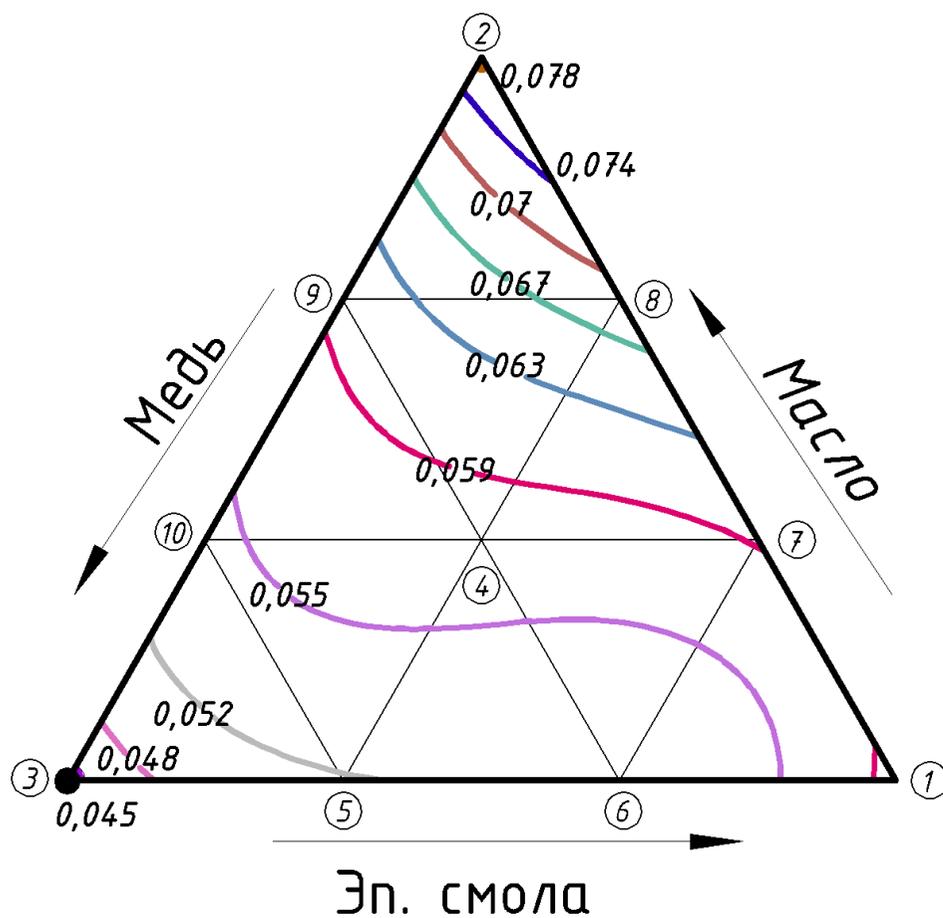


Рисунок - 5 Зависимость износа композиционного покрытия от состава

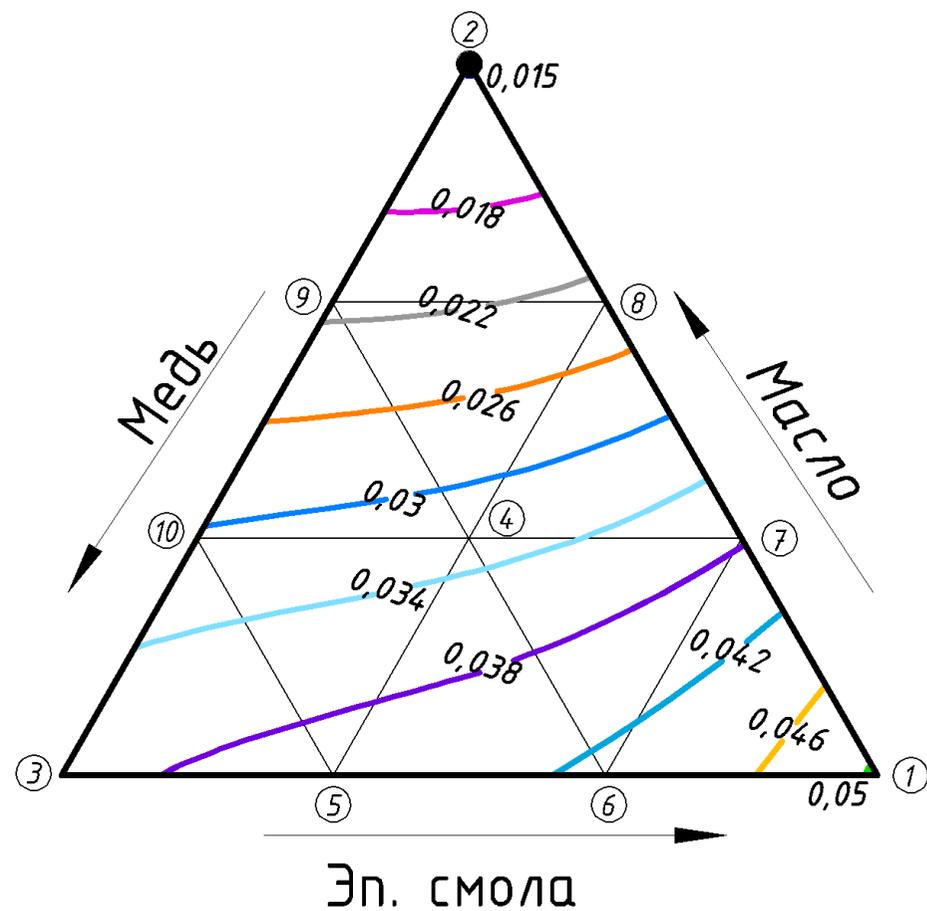


Рисунок - 6 Зависимость коэффициента трения композиционного покрытия от состава

Оптимизация матричного материала выполнялась со следующим условием: ранг адгезионной прочности и жёсткости покрытия (E_0) принят равным 1, а изгибной прочности – 0,2. При этом выполнено наложение трёх симплексов, соответствующих исследуемым параметрам и установлена точка (обозначенная на рисунке 4), отстоящая от частных оптимумов в соответствии с рангом исследуемых параметров. Состав матричного связующего, реализуемый в данной точке, считаем оптимальным для трёх исследованных факторов.

Дальнейшие исследования посвящены определению оптимального состава всего композиционного материала, используемого для покрытий. Учитывается влияние состава покрытия на величину его изнашивания (рисунки 5) и потери энергии, определяемые коэффициентом трения (рисунки 6). При этом учитывались минимальные величины общего износа покрытия за приработочный и стационарный периоды, а также коэффициента трения. Считаем, что оба принятых критерия оптимизации по влиянию на эксплуатационные показатели композита равнозначны.

Симплекс, полученный совмещением двух предыдущих, представлен на рисунке 7.

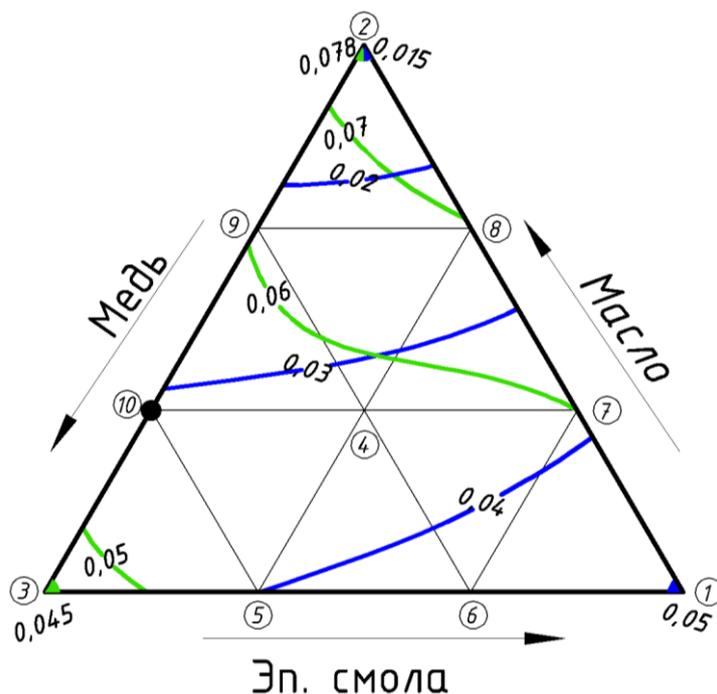


Рисунок - 7 Симплекс с оптимальным составом композита

В рамках технологической задачи было установлено влияние нагрузки отверждения матричного связующего при нанесении покрытия на его основные параметры. К ним относится адгезионная прочность покрытия, определяющая работоспособность трибосистемы, и толщина, обеспечивающая точность рабочего посадочного размера подшипника. Адгезионная прочность нанесенных покрытий с эпоксидной матрицей оценивалась по стандартной методике - величине усилия отслаивания покрытия при отгибе его свободного конца на 180 градусов. Отмечено снижение адгезионной прочности покрытия, нанесенного на поверхность латунного образца в среднем на 4% (рисунок 8). Это может быть объяснено более низкой поверхностной энергией меди и медных сплавов.

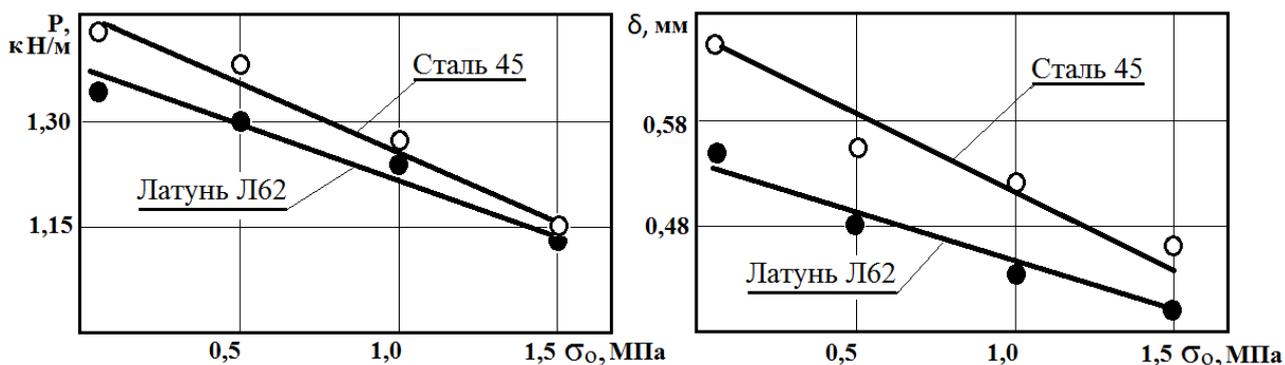


Рисунок - 8 Влияние нагрузки отверждения на адгезионную прочность и толщину покрытия

Далее исследовались триботехнические характеристики покрытия оптимального состава (эпоксидный компаунд с отвердителем – 86,4%; смазочный материал – 8%; порошок меди – 5,6%) и определялся рациональный диапазон его эксплуатационных нагрузочно-скоростных режимов.

Учитывая чувствительность полимерных материалов к росту температуры, генерируемой в процессе трения, исследовалась ее зависимость от нагрузочно-скоростных режимов эксплуатации. Полученная регрессионная модель для интерполяционных расчетов имеет следующий вид:

$$T = 934,7 \cdot \sigma^{0,006} V^{1,441-0,199 \cdot \lg \sigma}, \quad (11)$$

где σ – контактные напряжения, МПа;

Модель адекватна и позволяет вести расчеты с максимальной погрешностью, не превышающей 4,4%. График модели представлен на рисунке 9.

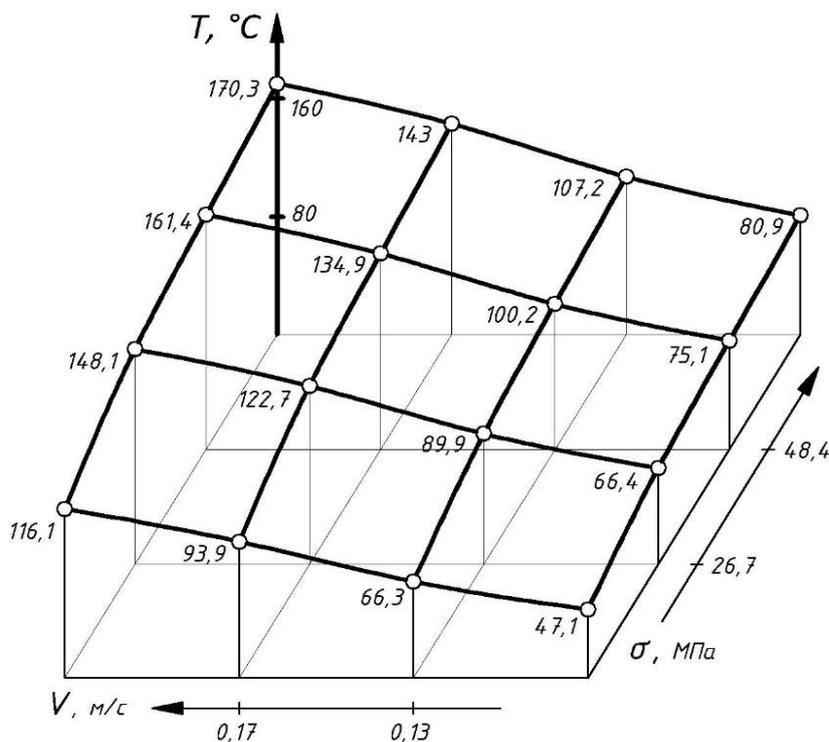


Рисунок - 9 Зависимость температуры покрытий от нагрузочно-скоростных режимов

Все коэффициенты уравнения регрессии значимы, а наличие смешанных взаимодействий свидетельствует о совместном влиянии режимных параметров. Анализ модели и графика показывает, что в исследованном диапазоне режимов наибольший вклад в рост температуры оказывает скорость (в сравнении с напряжениями в среднем на 80% больше).

Для численной оценки теоретических тепловых расчетов и их верификации были экспериментально определены теплофизические константы антифрикционного композита, имеющего оптимальный состав. Использовался метод дискретной калориметрии. Для температурного диапазона 293 – 503К были определены теплоёмкость и средняя теплопроводность (таблица 1).

Таблица - 1 Теплофизические параметры покрытия

№ п/п	Параметр	Размерность	Величина	Доверительный интервал
1	Теплопроводность,	Вт/м·К	0,47	± 0,03
2	Теплоёмкость,	Дж/кг·К	1530	± 20,1
3	Плотность,	кг/м ³	1200	± 15

Результаты измерений обработаны статистически и рассчитаны доверительные интервалы с достоверностью 95%.

Одной из основных характеристик работы исследуемой трибосистемы является коэффициент трения. Влияние на его величину эксплуатационных режимов описывается следующей регрессионной моделью:

$$f = 0,031 \sigma^{0,227} V^{0,146+0,0698 \cdot \lg \sigma} \quad (12)$$

Её графическая интерпретация представлена на рисунке 10.

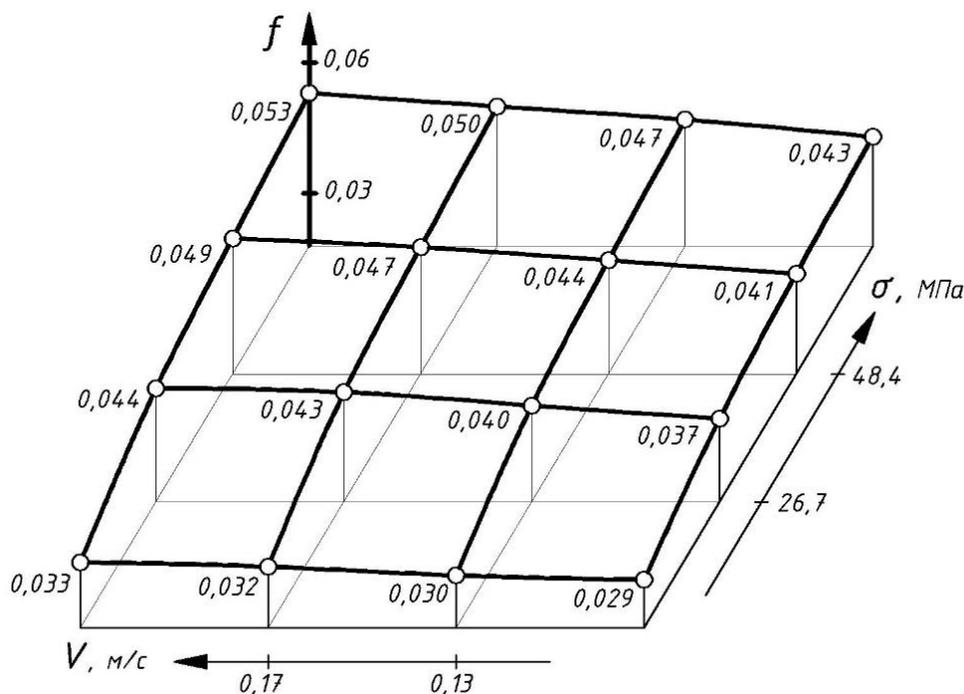


Рисунок - 10 Влияние режимов нагружения на коэффициент трения

Анализ модели и ее графика говорит о близости полученной зависимости линейной. Модель адекватна и обеспечивает погрешность, не превышающую 5%. В этой модели коэффициент при смешанных взаимодействиях значим. Наибольшее влияние на коэффициент трения оказывают контактные напряжения (в сравнении со скоростью в среднем на 21,4%), что можно объяснить относительно низким уровнем скоростей и превалирующей роли напряжений при переносе ПТФЭ.

В связи с различием прочностных показателей полимерного покрытия и металлических контртел на порядки, в металлополимерных трибосистемах изнашивается практически только покрытие.

Величина износа измерялась по разности осевой просадки эталонного конуса в коническое отверстие подшипниковой втулки с покрытием до и после трибоиспытаний. Износ рассчитывался по нормали к рабочей поверхности. Измерения включали приработку. По результатам экспериментальных исследований получена адекватная регрессионная модель зависимости величины износа антифрикционного покрытия от режимов нагружения (рисунок 11).

$$h_{\text{изн.}} = 0,118 \cdot \sigma^{0,161} \cdot V^{0,033+0,08 \lg \sigma} \quad (13)$$

При изнашивании участвуют оба переменных фактора. Наибольшее влияние на износ покрытия оказывают контактные напряжения (в 1,2 раза выше, чем скорость). Это подтверждает известный механизм изнашивания фторопласта в металлополимерных сопряжениях путем его адгезионного переноса на поверхность контртела. Увеличение коэффициента трения с ростом скорости характерно для фторопластсодержащих материалов в низкоскоростном диапазоне.

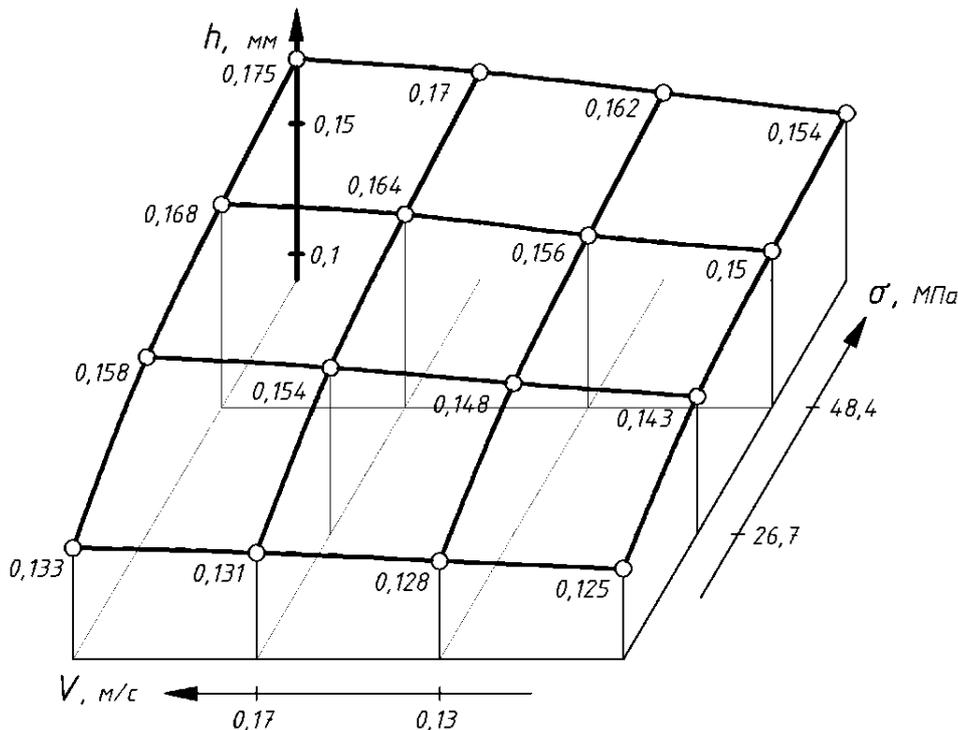


Рисунок - 11 Влияние нагрузочно-скоростных режимов на износ антифрикционного покрытия

Одним из ведущих параметров, характеризующих работу трибосистемы, является скорость стационарного изнашивания, необходимая для расчета как износостойкости одной трибосистемы при разных режимах, так и для различных трибосистем (рисунок 12).

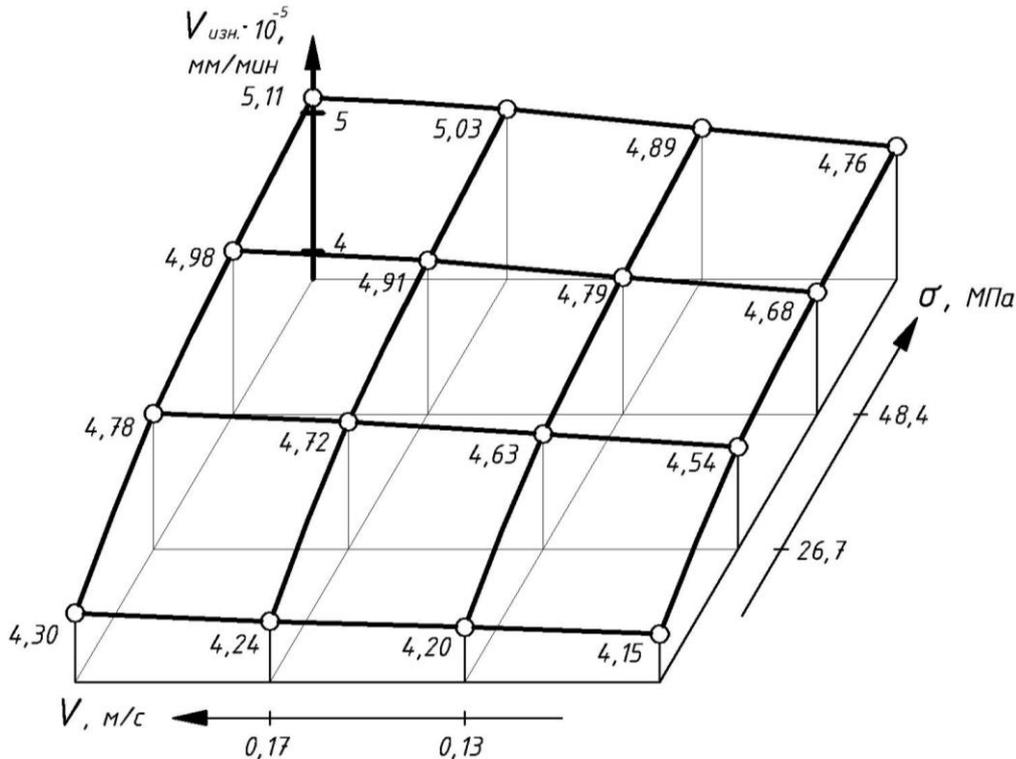


Рисунок - 12 Влияние нагрузочно-скоростных режимов на скорость стационарного изнашивания

Эта величина участвует в определении целого ряда стандартизованных параметров трибосопряжения, как ресурс и интенсивность изнашивания.

Модель зависимости скорости изнашивания антифрикционного покрытия от режимов эксплуатации трибосопряжения адекватна и имеет следующий вид:

$$V_{\text{изн.}} = 3,65 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma^{0,118} V^{-0,026 + 0,069 \lg \sigma} \quad (14)$$

Погрешность модели не превышает 3 %. Контактные напряжения влияют на скорость изнашивания, практически, как и в предыдущем случае, в 1,2 раза интенсивнее.

Основным показателем эффективности работы любой трибосистемы, включая металлополимерную, является величина ресурса и зависимость ее от нагрузочно-скоростных режимов. Ниже зависимость ресурса от режимов эксплуатации представлена в виде регрессионной адекватной модели с выходом, выраженным в часах работы.

$$R = 204,17 \cdot \sigma^{-0,117} V^{-0,06 - 0,06 \lg \sigma} \quad (15)$$

Полученная модель обеспечивает погрешность интерполяционных расчетов в среднем не более 5%. График модели представлен на рисунке 13.

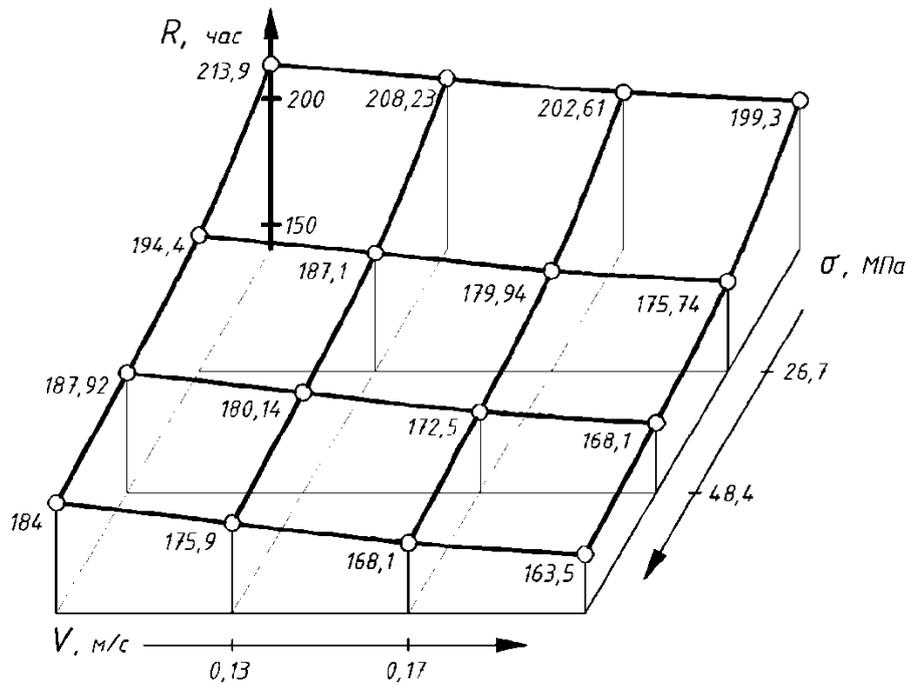


Рисунок - 13 Влияние нагрузочно-скоростных режимов металлополимерных трибосистем с полимерным композиционным покрытием на ресурс

Одной из важных стандартных характеристик трибосистем, включая и металлополимерные, является интенсивность изнашивания. Этот параметр определяет износостойкость любой трибосистемы без отношения к её конструкции и назначению. Поэтому он удобен для сравнения различных трибосистем по износостойкости.

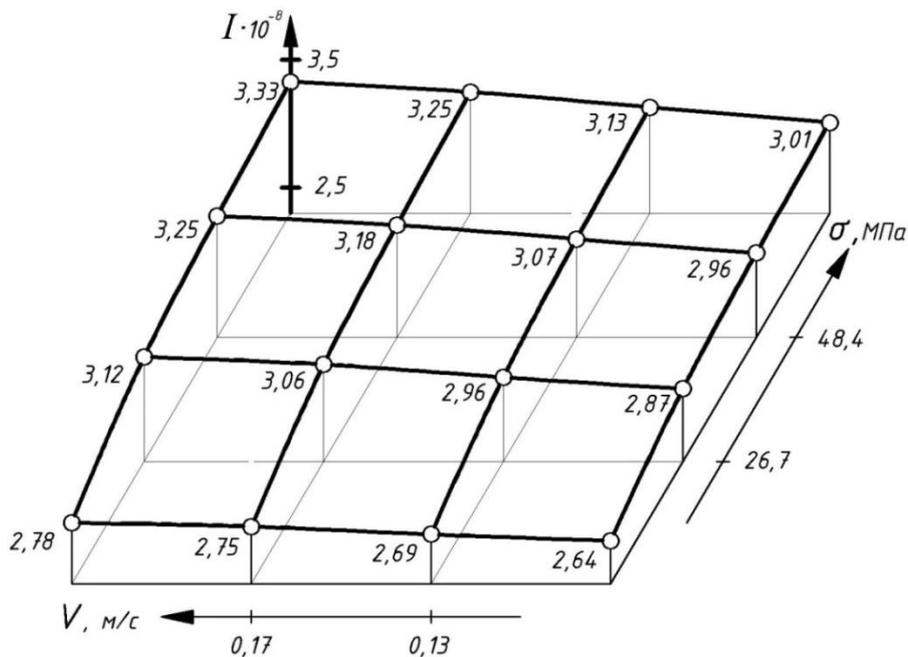


Рисунок - 14 Графическая зависимость влияния нагрузочно-скоростных режимов на интенсивность изнашивания антифрикционного покрытия

Модель зависимости интенсивности изнашивания от нагрузочно-скоростных режимов адекватна, обеспечивает погрешность не более 3 % и имеет следующий вид:

$$I = 2,63 \cdot 10^{-8} \cdot \sigma^{0,11} v^{0,033 + 0,061g\sigma}. \quad (16)$$

График представлен на рисунке 14. Характерен рост интенсивности изнашивания с увеличением как скорости, так и контактных напряжений.

Таким образом, экспериментально установлены основные зависимости триботехнических параметров металлополимерных трибосистем с полимерными фторопластсодержащими композиционными покрытиями от нагрузочно-скоростных режимов.

В пятой главе приводятся экспериментальные результаты, подтверждающие численную оценку теоретических расчетов и итогов компьютерного моделирования методом конечных элементов.

Кроме того, приводятся условия и результаты промышленных испытаний подшипников на технологическом оборудовании Ростовского-на-Дону электровозоремонтного завода (РЭРЗ). Ресурс экспериментальных подшипников, установленных в опорном узле бандажировочного станка, превышает штатный на 22 – 23,5%.

Заключение

По результатам исследований могут быть сформулированы следующие выводы.

1. На основе многопараметрической оптимизации установлен оптимальный состав матричного связующего холодного отверждения, обеспечивающий нанесение на рабочую поверхность крупногабаритных узлов трения и работоспособность композиционных покрытий.

2. Результаты аналитических исследований температурных зависимостей позволили получить приближённую конечную формулу для оценки границы допустимой температуры полимерных покрытий; более точный температурный расчёт сделан на основе компьютерного моделирования методом конечных элементов.

3. Для рассматриваемого покрытия разработано и опробовано оборудование и комплексная методика экспериментальных исследований, позволяющая оптимизировать матричный состав по трём критериям (прочности, вязкоупругим свойствам и адгезии к стальным и латунным субстратам).

4. Полученные частные критерии оптимальности полимерного композиционного покрытия (коэффициент трения, величина нормального износа, адгезионная прочность и ползучесть), в результате совмещения отдельных симплексов и ранжирования выхода, позволили установить оптимальный состав антифрикционного композита.

5. Результаты фрикционных испытаний покрытий с оптимальным составом матричного материала позволили выявить основные закономерности влияния нагрузочно-скоростных режимов на величину эксплуатационных триботехнических параметров: интенсивность изнашивания, ресурс и температуру в зоне трения.

6. В результате статистической обработки итогов экспериментальных исследований, проведённых по полнофакторным планам типа ПФЭ², были получены интерполяционные регрессионные модели, позволяющие рассчитать ве-

личину триботехнических характеристик антифрикционных покрытий в диапазоне нагрузок 5-70 МПа, и скоростей 0,1-0,2 м/с.

7. В результате исследований влияния теплофизических характеристик материалов контртел установлен фактический температурный режим трибосистем и проведено сравнение результатов экспериментальных и теоретических исследований, что позволило установить среднюю величину погрешности, равную 8,2 %.

8. Итоги промышленных испытаний разработанных радиально-упорных подшипников скольжения с антифрикционным композиционным полимерным фторопласт-содержащим покрытием, проведенных на Ростовского-на-Дону электровозоремонтном заводе (РЭРЗ) оцениваются удовлетворительно и обеспечивают повышение ресурса трибосопряжения технологического оборудования на 22 – 23,5%.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. В связи с тем, что в диссертации проводились исследования антифрикционного полимерного композиционного покрытия только для радиально-упорных подшипников, поэтому с целью расширения нагрузочно-скоростных режимов и области применения необходимо выполнить исследования для подшипников других конструкций.:

Основные публикации по теме исследований

*Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК,
и в международных базах данных:*

1. Кохановский В.А. Технология нанесения композиционных покрытий / В.А. Кохановский, И.В. Больших, Д.В. Глазунов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2015. - № 4(60). – С. 8 - 13.

2. Кохановский В.А. Антифрикционные композиционные покрытия с эпоксидной матрицей / В.А. Кохановский, И.В. Больших, Е.С. Новиков // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016. - № 1(61). – С. 8 - 13.

3. Кохановский В.А. Адгезия антифрикционных полимерных покрытий на основе фенилона / В.А. Кохановский, И.В. Больших, Д.С. Мантуров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2017. - № 4(68). – С. 16 - 20.

4. Больших И.В. Зависимость параметров композита от нагрузки отверждения / И.В. Больших, В.А. Кохановский, Д.С. Мантуров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2018. - № 4(72). – С. 25 - 31.

5. Kokhanovskii V.A. Lubricator casings for Locomotive wheel rims / V.A.Kokhanovskii, I.A. Maiba, D.V Glazunov, I.V. Bol'shikh // Russian Engineering Research. 2016. T. 36. № 5. С. 364 - 365.

Прочие публикации

6. Камерова Э.А. Ползучесть антифрикционных полимерных покрытий. / Э.А. Камерова, И.В. Больших // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. - 2014-№ 4(29). - С.33 - 34.

7. Кохановский В.А. Матричный материал для антифрикционного полимерного композита. // В.А. Кохановский, И.В. Больших // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. -№ 5 (спецвыпуск). - С.33 - 34.

8. Глазунов Д.В. Основные технологии смазывания трибоконтакта «гребень колеса-рельс» / Д.В. Глазунов, И.В. Больших // Сборник научных статей по материалам 13-й Международной научно-практической конференции. – Новочеркасск: Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова. 2015. С. 63 - 70.

9. Больших И.В. Вязкоупругие свойства фторопластсодержащих композитов / И.В. Больших, Д.В. Глазунов // Труды международной научно-практической конференции «Транспорт-2015». Ч. 4. – Ростов н/Д: ФГБОУ ВПО РГУПС – 2015. С. 23 - 25.

10. Кохановский В.А. Антифрикционные композиты с эпоксидной матрицей / В.А. Кохановский, И.В. Больших, Е.С. Новиков // Труды международной научно-практической конференции «Транспорт-2015». Ч. 4. – Ростов н/Д: ФГБОУ ВПО РГУПС – 2015. С. 35 - 37.

11. Кохановский В.А. Нанесение полимерных покрытий с матрицей холодного отверждения. // В.А. Кохановский, И.В. Больших, А.В. Илларионов // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2016 - № 3(36). - С.11 - 16.

12. Кохановский В.А. Металлический компонент металлополимерных трибосистем / В.А. Кохановский, С.И. Иванов, А.А. Петренко, И.В. Больших // Механика и трибология транспортных систем: сборник докладов международной научной конференции. – Ростов н/Д: ФГБОУ ВО РГУПС. – 2016. – Т. 2. С. 182 - 185.

13. Кохановский В.А. Износ антифрикционных покрытий в смазочной среде / В.А. Кохановский, И.В. Больших, С.А. Шапшал // Современное развитие науки и техники. («Наука-2017»): сборник научных трудов. Т.1. – Ростов р/Д: ФГБОУ ВО РГУПС. – 2017. – С. 225 - 228.

14. Больших И.В. Адгезионная прочность полимерных покрытий на основе фенилона / И.В. Больших, А.В. Донченко // Сборник научных трудов «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России». Т.1. Технические науки. - Ростов н/Д: ФГБОУ ВО РГУПС. 2018. С. 188 - 190.

Личный вклад соискателя. Автором лично сформированы основные положения, результаты и выводы исследований на базе собственных теоретических расчетов, а также самостоятельно выполненных и обработанных экспериментальных данных. Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, состоит в постановке задач исследований, проведении, обработке и обобщении полученных результатов.

Больших Иван Валерьевич

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРИБОСИСТЕМ
С КОМПОЗИЦИОННЫМ ПОКРЫТИЕМ
ХОЛОДНОГО ОТВЕРЖДЕНИЯ**

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать __.__.__ Формат 60×84/16
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 1
Тираж 100 экз. Заказ № _____

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС

Адрес университета: 344038, г. Ростов-на-Дону,
пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2