

На правах рукописи



Нихотина Надежда Владимировна

**ПРИМЕНЕНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
ФТОРОПЛАСТСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ
ПРИ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ**

Специальность 2.5.3. Трение и износ в машинах

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Ростов – на – Дону
2023

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

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

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Химия», ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону
Бурлакова Виктория Эдуардовна

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Трибология и технология ремонта нефтегазового оборудования» ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина», г. Москва

Елагина Оксана Юрьевна

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова», г. Новочеркасск

Защита диссертации состоится «26» декабря 2023 года в 14:00 на заседании диссертационного совета 44.2.005.01 на базе ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», по адресу: 344038, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2 (главный корпус, читальный зал).

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

Автореферат разослан «__» октября 2023 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета 44.2.005.01

доктор технических наук, профессор



П. Н. Щербак

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В современных машинах широко применяются металлополимерные трибосистемы с покрытиями из полимерных фторопластсодержащих самосмазывающихся композитов выполненных на основе тканых каркасов.

Подобные материалы обеспечивают высокую несущую способность и низкие потери на трение. Однако основная область применения фторопластсодержащих покрытий имеет место в подшипниковых узлах, совершающих вращательное движение, когда коэффициент взаимного перекрытия равен единице. Данные об использовании рассматриваемых покрытий в трибосистемах с возвратно-поступательным движением практически отсутствуют, что объясняется изменением условий контактирования, вызванных наличием коэффициента взаимного перекрытия меньше единицы.

Вместе с тем в современной технике применяется значительное число узлов трения, совершающих возвратно-поступательное движение. Это различные штоки, толкатели, направляющие и т.п. детали. Специфика возвратно-поступательного движения требует специальных исследований в связи с его следующими особенностями:

- увеличенным расходом фторопласта из-за резко возрастающей площади его переноса на контртело;
- изменением распределения генерируемого при трении теплового потока между деталями трибосистемы;
- направлением следа механической обработки контртел перпендикулярно вектору скорости.

Изложенное доказывает, что механический перенос закономерностей эксплуатации антифрикционных покрытий в трибоузлах, совершающих вращательное движение, на узлы с возвратно-поступательным движением нерезультативен и требует дополнительных исследований.

Таким образом, работа, посвященная применению высокоэффективных полимерных фторопластсодержащих покрытий в условиях возвратно-поступательного движения, являются актуальной и перспективной.

Степень разработанности темы. Проблема трения металлополимерных трибосистем с фторопластсодержащим покрытием включает исследования как зарубежных ученых В.Д. Вриско, У.Д. Крайг, Д.С. Эванс, Д.К. Ланкастер и др., так и отечественных Г.П. Барчана, Г.М. Бартенева, В.А. Кохановского, А.С. Кужарова и др. Все они рассматривали трение в условиях вращательного движения при коэффициенте взаимного перекрытия равном единице ($K_{вз} = 1$). Металлополимерные фторопластсодержащие трибосистемы при возвратно-поступательном движении ($K_{вз} < 1$) исследуются впервые.

Объект исследований – это металлополимерные трибосистемы с антифрикционными композиционными покрытиями.

Предметом исследований является изучение параметров самосмазывающихся фторопластсодержащих покрытий в процессах трения при коэффициенте взаимного перекрытия меньше единицы.

Целью исследований является расширение области применения высокоэффективных полимерных композиционных антифрикционных покрытий, включая трибосистемы с коэффициентом взаимного перекрытия меньше единицы.

Задачи исследований

1. Оценить влияние коэффициента взаимного перекрытия на тепловой режим работы металлополимерных трибосистем с фторопластсодержащим композиционным покрытием при возвратно-поступательном движении.

2. Выявить зависимость основных контактных параметров металлополимерных трибосистем от температурно-силовых режимов при возвратно-поступательном движении.

3. Определить рациональную область нагрузочно-скоростных эксплуатационных режимов металлополимерных трибосистем с композиционными полимерными покрытиями в условиях возвратно-поступательного движения.

4. Установить основные закономерности процессов трения и изнашивания фторопластсодержащих композиционных покрытий при значениях коэффициента взаимного перекрытия меньше единицы.

5. Выполнить проверку эффективности сделанных выводов и рекомендаций по результатам промышленных испытаний разработанной трибосистемы в условиях реального производства.

Научная новизна представлена следующими наиболее значимыми результатами:

1. Впервые установлены основные закономерности процесса трения металлополимерных трибосистем с фторопластсодержащим композиционным покрытием на основе тканого каркаса, а также – связь их триботехнических характеристик (ресурс, несущая способность) с эксплуатационными режимами в условиях возвратно-поступательного движения.

2. Впервые определены рациональные конструктивные параметры исследуемых пар трения, включающие характеристики контртел (шероховатость поверхности, теплофизические свойства), а также тканый каркас полимерных покрытий (тип плетения) для эксплуатации при коэффициенте взаимного перекрытия меньше единицы.

3. Определены области рациональных нагрузочно-скоростных режимов эксплуатации металлополимерных фторопластсодержащих трибосистем с композиционным покрытием как в приработочном, так и в стационарном режиме трения при коэффициенте взаимного перекрытия в диапазоне 0,167 – 0,476.

4. Установлена область существования эксплуатационных режимов, вызывающих эффект обратной зависимости интенсивности изнашивания от скорости.

Значимость теоретических исследований включает

1. Выражение, определяющее зависимость величины контактного угла (дуги) от монтажного зазора трибосопряжения и вязкоупругой деформации покрытия, полученное на основе исследования вязкоупругой деформации и геометрических соотношений при нагружении трибосистем.

2. Результаты решения задачи о напряженно-деформированном состоянии вязкоупругого полимерного покрытия в виде конечного выражения для расчета

величины и распределения контактных давлений в трибосопряжении при заданной нагрузке.

3. Аналитическую модель для оценки температурного порога применимости рассматриваемого композиционного покрытия, полученную с учетом коэффициента взаимного перекрытия, особенностями кинематики и контактирования металлополимерной трибосистемы с полимерным покрытием, а также его теплофизическими свойствами.

Значимость практических исследований представлена

1. Выполненными экспериментальными исследованиями по влиянию теплофизических (теплоемкость, теплопроводность) и поверхностных (шероховатость) свойств металлических контртел в комплексе с композиционными свойствами полимерных покрытий, позволившими установить рациональную конструкцию металлополимерной трибосистемы для работы в условиях возвратно-поступательного движения.

2. Учетом особенностей приработки полимерных фторопластсодержащих покрытий, оптимизирующих условия этого нестационарного процесса, позволяющих в определенных пределах, управлять им, сокращая приработочный износ в эксплуатационных условиях или время технологической приработки при изготовлении.

3. Полученным комплексом экспериментальных регрессионных моделей, обеспечивающих выполнение проектных и оценочных расчетов (температуры, ресурса и др. параметров) металлополимерных трибосистемах, работающих при возвратно-поступательном движении в условиях коэффициента взаимного перекрытия меньше единицы.

Методы диссертационных исследований теоретического плана построены на известных классических основополагающих зависимостях. Это - наследственное выражение для вязкоупругой деформации полимеров, напряженно-деформированное состояние материала композиционного покрытия, законы теплопроводности Фурье, теплоотдачи Ньютона, а также полученное А.В. Чичинадзе выражение для коэффициента взаимного перекрытия при температурных исследованиях.

Диссертационные исследования экспериментального плана выполнялись на специально разработанном стенде и своевременно поверенном измерительном оборудовании, по двухуровневым полнофакторным планам с числом 3–5 параллельных опытов с последующей статистической обработкой результатов.

Положения, выносимые на защиту

1 Рациональная конструкция металлополимерных трибосистем с композиционным фторопластсодержащим покрытием, предназначенная для эксплуатации при значениях коэффициента взаимного перекрытия меньше единицы.

2 Расчитанная величина контактной дуги (угла) в металлополимерной трибосистеме с антифрикционными композиционными полимерными покрытиями и распределение по ее длине контактных давлений в процессе температурно-силового нагружения.

3. Область рациональных нагрузочно-скоростных режимов при эксплуатации антифрикционных полимерных покрытий как в приработочном, так и в стационарном периоде трения при возвратно-поступательном движении.

4. Уровень влияние коэффициента взаимного перекрытия на тепловой режим трибосистем с фторопластсодержащим покрытием, а также на их основные триботехнические характеристики: интенсивность изнашивания и ресурс.

Степень достоверности результатов обеспечивается корректным установлением и достижением общей цели исследований, сходимостью теоретических и экспериментальных результатов в пределах 0,72-6,3 %, удовлетворительными результатами промышленных испытаний.

Апробация результатов диссертационной работы прошла на международных научно – практических конференциях «Транспорт: наука, образование, производство» (Ростов-на-Дону, 2020 г.); «Перспективы развития локомотивов вагоностроения и технологии обслуживания подвижного состава» (Ростов-на-Дону, 2021 г.); на всероссийской национальной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России» (г. Ростов-на-Дону, 2018 г., 2020г.)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 2 работы в изданиях, рекомендованных ВАК, 3 изданий включено в базу данных Web of Science и Scopus. 2 патента на полезную модель РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка из 178 наименований и приложения. Общий объем работы составляет 132 страниц текста, включает 40 рисунков и 27 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследований, поставлена их цель и задачи; отмечена научная ценность и практическая значимость работы.

В первой главе выполнен аналитический обзор литературы по области применения и структуре антифрикционных фторопластсодержащих покрытий. а также по влиянию коэффициента взаимного перекрытия на эксплуатационные параметры трибосистем, что позволило определить проблематику и сформулировать общую цель исследований.

Во второй главе представлены решения аналитических задач об условиях контактирования в исследуемых трибосистемах. Рабочая схема представлена на рисунке 1.

В соответствии с рабочей схемой (рисунок 1) радиального перемещения вала под нагрузкой при наличии монтажного зазора трибосопряжения и вязкоупругой деформацией покрытия, получено выражение его контура в полярных координатах ρ - α следующего вида:

$$(\rho \sin \alpha + \Delta + \delta_{\infty})^2 + \rho^2 \cos^2 \alpha = R_2^2. \quad (1)$$

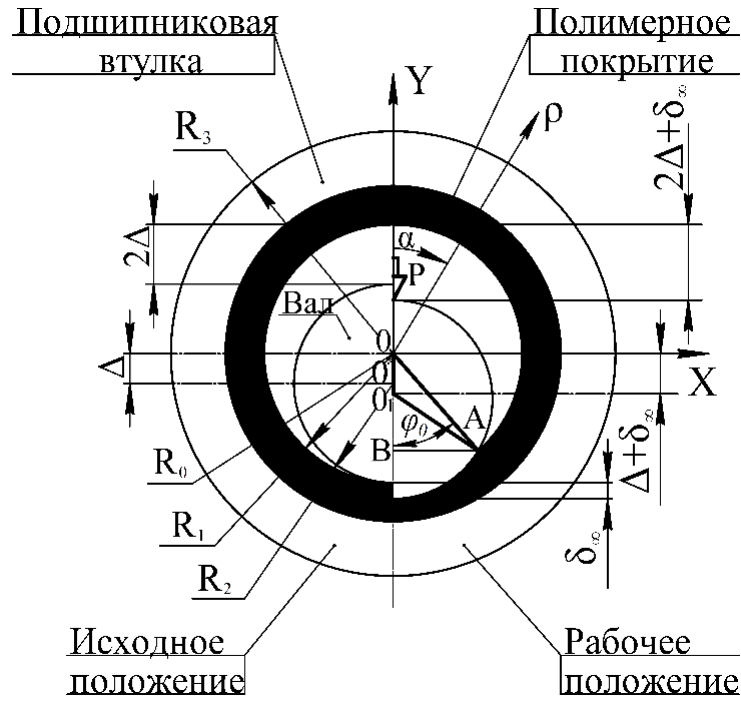


Рисунок 1 - Рабочая схема трибосопряжения

Выполнив преобразования и учтя, что $R_1 \gg \Delta$ и $R_1 \gg \delta$, получим выражение для определения предельной величины угла контакта:

$$\arccos \varphi_0 = \frac{2\Delta \cdot (R_1 + \delta_\infty) + \delta_\infty^2}{2R_1 \cdot (\Delta + \delta_\infty)}. \quad (2)$$

Далее переходим к решению задачи о напряженно-деформированном состоянии покрытия в плоской постановке. Используем уравнение равновесия

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial \rho} + \frac{\sigma_{rr}}{\rho} = 0. \quad (3)$$

С учетом упрощений определяющие уравнения могут быть представлены в следующем виде:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{1}{E_r(t)} \sigma_{rr}; \quad (4)$$

$$\varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{\nu_{r\varphi}(t)}{E_r(t)} \sigma_{rr}, \quad (5)$$

где E_r – радиальный модуль материала покрытия, $\nu_{r\varphi}$ – коэффициент Пуассона.

Граничные условия ставим в соответствии со схемой (рисунок 1). На дуге $-\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_0$ действуют контактные давления $g(\varphi)$.

$$\sigma_{rr}(R_1, \varphi) = g(\varphi), \quad (6)$$

Радиальные перемещения профиля покрытия под действием приложенной силы P являются функцией радиуса и контактного угла:

$$U_r(R_1, \varphi) = -\delta(\varphi). \quad (7)$$

Проинтегрировав уравнение равновесия (3) по дуге контакта получим

$$\sigma_{rr}(\rho, \varphi) = g(\varphi) \frac{R_1}{\rho} \quad (8)$$

Выполнив необходимые математические преобразования, получим конечное выражение для расчета контактных давлений:

$$g(\varphi) = -\frac{E_r(t)}{R_1 \ln \frac{R_1}{R_0}} [(\Delta + \delta) \cos \alpha + \Delta]. \quad (9)$$

Расчет величины контактных напряжений выполнен для подшипника

$\varnothing 40 \frac{H7}{n7} \left(\begin{array}{c} +25 \\ +42 \\ +17 \end{array} \right)$ с покрытием, толщиной 0,54 мм (рисунок 2) и переходной посадкой трибосопряжения.

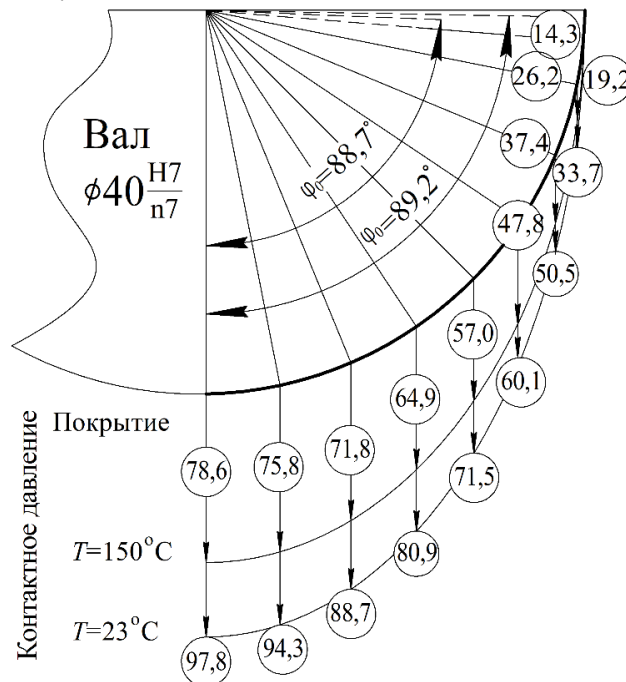


Рисунок 2 - Эпюра контактных давлений ($\sigma = 50\text{МПа}$, $\Delta = 0,004\text{мм}$)

Контактные напряжения в диаметральной сечении рассматриваемой трибосистемы превышают их среднюю величину при приведенных значениях температуры на 95,6%. Рост температуры уменьшает жесткость полимера и, сглаживая воздействие нагрузки, уменьшает максимальные давления на $\approx 19,6\%$.

Далее, в цилиндрических координатах решается температурная задача для стационарных условий трения (рисунок 3).

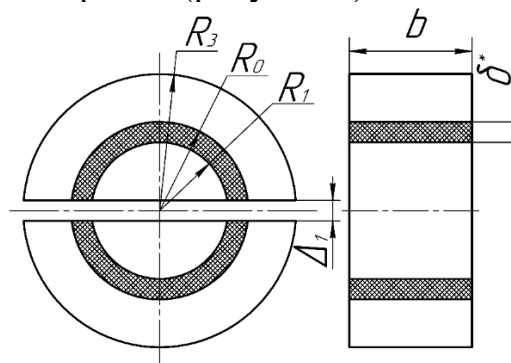


Рисунок 3 - Расчетная схема

Исходным, после принятых упрощений, принимаем уравнение Фурье в виде:

$$\frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial T}{\partial \rho} \right) = 0. \quad (10)$$

Проинтегрировав (10) с граничными условиями для покрытия, получим:

$$T(\rho) = T_1 + (T_1 - T_0) \frac{\ln \frac{R_1}{\rho}}{\ln \frac{R_0}{R_1}}. \quad (11)$$

Аналогичное выражение получим и для металлической втулки:

$$T_0(\rho) = T(\rho) = T_0 + (T_0 - T_3) \frac{\ln \frac{R_0}{\rho}}{\ln \frac{R_3}{R_0}}. \quad (12)$$

Выражения (11) и (12) определяют количество тепла, проходящее через поверхность в единицу времени. Найдем температурные условия на границах различных материалов. Для границы полимерное покрытие – втулка:

$$Q(\rho) = \lambda_n \frac{2\pi b}{\ln \frac{R_0}{R_1}} (T_1 - T_0), \quad (13)$$

для подшипниковой втулки:

$$Q_1(\rho) = \lambda_m \frac{2\pi b}{\ln \frac{R_3}{R_0}} (T_0 - T_3). \quad (14)$$

Теплоотдачу с наружной поверхности подшипниковой втулки найдем по формуле Ньютона:

$$Q_2 = \alpha K_r F_1 (T_3 - T_c). \quad (15)$$

В формулах обозначено: Q, Q_1, Q_2 – зоны теплового потока, $\alpha = 9,5-7,5$ – средний коэффициент теплоотдачи; $K_r = 0,8$ – коэффициент неравномерности нагрева; T_c – температура окружающей среды; $F_1 = 2\pi(R_3^2 - R_0^2 + R_3 b)$ – площадь наружной поверхности втулки; b – ширина подшипника.

Суммируя левые и правые части выражений (13), (14) и (15) получим конечную формулу для температуры покрытия:

$$T_0 = T_c + Q \left[\frac{1}{2\pi b} \left[\frac{\ln \frac{R_0}{R_1}}{\lambda_n} + \frac{\ln \frac{R_3}{R_0}}{\lambda_m} \right] + \frac{1}{\alpha K_r F_1} \right]. \quad (16)$$

Перейдя к диаметральному размерам и сделав ряд преобразований будем иметь:

$$T_0 = T_c + Q \left[\frac{1}{2\pi b} \left(\frac{2\delta^*}{D_0 \lambda_n} + \frac{1}{\lambda_m} \ln \frac{D_3}{D_0 + 2\delta^*} \right) + \frac{1}{\alpha K_r F_1} \right] \quad (17)$$

Количество теплоты, выделяющееся в рабочей контактной зоне, может быть представлено выражением:

$$Q = \alpha_{\text{тн}} \bar{f} P \bar{V}, \quad (18)$$

где \bar{f} – средний коэффициент трения; P – рабочая нагрузка; \bar{V} – средняя скорость; $\alpha_{\text{тн}}$ – коэффициент разделения тепловых потоков.

Поскольку коэффициент взаимного перекрытия меньше единицы, тепловой поток определяется выражением, полученным А.В. Чичинадзе

$$\alpha_{\text{тн}} = \frac{\sqrt{\lambda_1 \cdot C_1 \cdot \gamma_1}}{\sqrt{\lambda_1 \cdot C_1 \cdot \gamma_1} + K_{\text{вз}} \sqrt{\lambda_2 \cdot C_2 \cdot \gamma_2}}, \quad (19)$$

где λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности полимера и металла; C_1, C_2 – теплоемкость полимера и металла; γ_1, γ_2 – плотность полимера и металла; $K_{\text{вз}} = \frac{S_1}{S_2}$ – коэффициент взаимного перекрытия; S_1 и S_2 – площади контактирующих элементов пары трения.

Теоретические расчеты позволяют выполнить проектную или контрольную оценку триботехнических параметров исследованных трибосистем с погрешностью не превышающей 5 %.

Третья глава посвящена описанию методической части работы. Стенд для экспериментальных исследований и образцы представлены на рисунке 4.

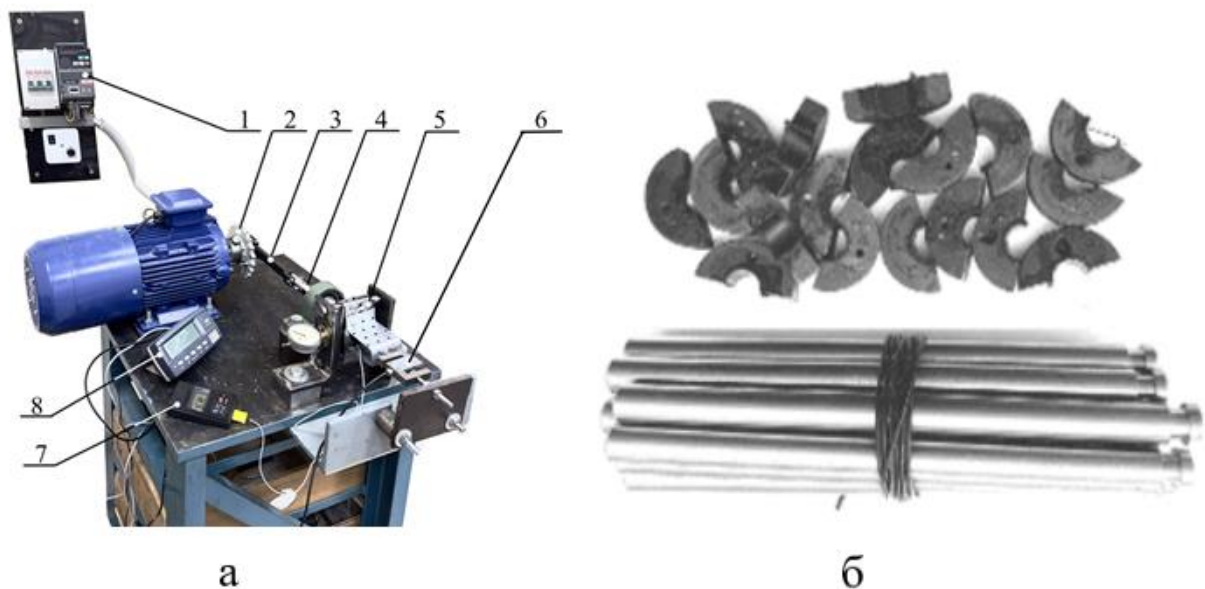


Рисунок 4 - Стенд для экспериментальных исследований (а), образцы и контролы (б): 1 – частотный регулятор, 2 – кривошип, 3 – шатун, 4 – ползун – контролы, 5 – нагружающее устройство, 6 – S образный тензодатчик, 7 – пульт термпары, 8 – пульт тензодатчика

Варьирование скорости выполнялось частотным регулятором ESQ-A500-043-1.5R. Текущий износ покрытия измерялся индикаторной головкой ИГ с точностью до 0,001 мм. Температура определялась термпарой ХК.

Общая схема исследований представлена на рисунке 5. Экспериментальные исследования разделены на два блока: конструкционных и эксплуатационных параметров.

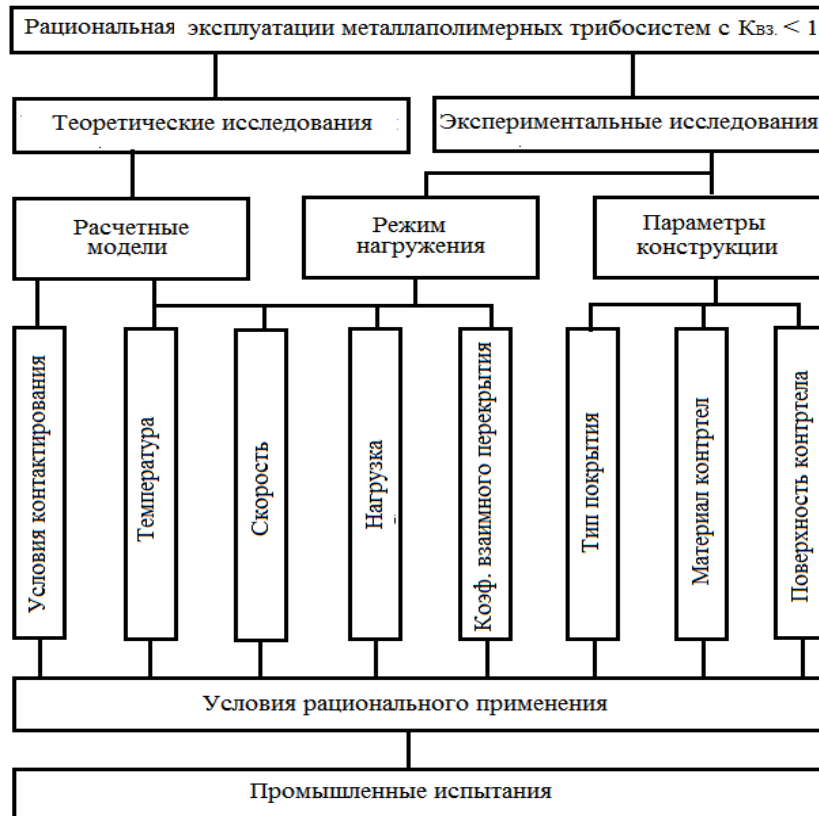


Рисунок 5 - Общая схема исследований

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований.

На первом этапе исследовалась конструкция трибосистемы, включающая материал металлических контртел, шероховатость его контактной поверхности и основной компонент полимерного антифрикционного покрытия - фторопласт-содержащую ткань. Полученные результаты представлены на рисунке 6.

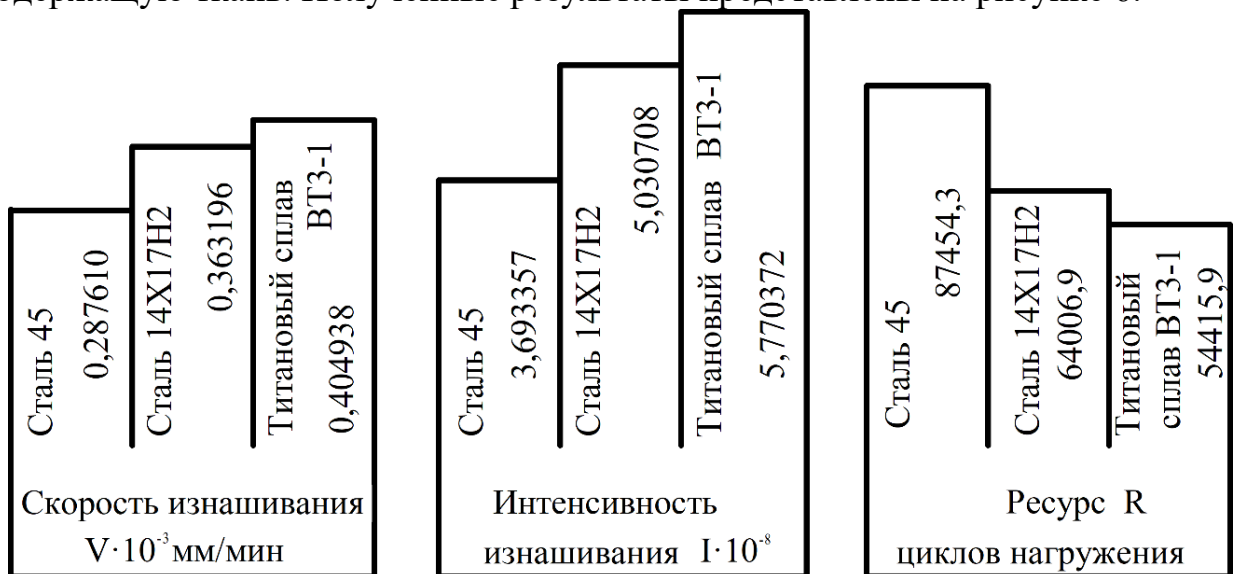


Рисунок 6 - Влияние материала контртела на эксплуатационные параметры трибосистем

Наибольшее влияние на работу рассматриваемых трибосистем оказывает шероховатость поверхности контртел, т.к. движение происходит перпендикулярно ее направлению. Полученные регрессионные модели имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} V_{\text{из}} &= 0,152 \cdot 2,642^{Ra} ; \\ I &= 1,738 \cdot 3,149^{Ra} ; \\ R_{\text{ц}} &= 188911,3 \cdot 0,319^{Ra} . \end{aligned} \quad (20)$$

Их наибольшая погрешность не превышает 6,2 %. Графики моделей представлены на рисунке 7.

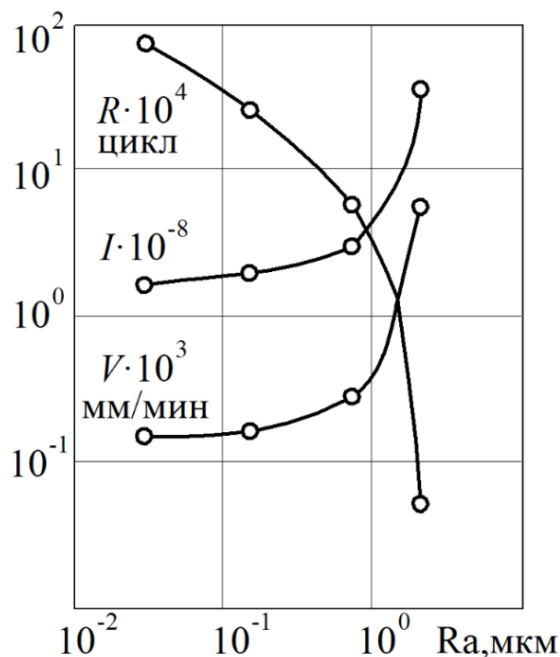


Рисунок 7 - Влияние шероховатости рабочей поверхности контртел на эксплуатационные параметры металлополимерных трибосистем

Анализ результатов доказывает, что шероховатость контртел должна быть не ниже $Ra = 0,2 \mu\text{м}$.

Основным конструктивным элементом исследуемых трибосистем являются композиционные покрытия, выполненные на основе четырех разных тканых каркасов. Результаты их исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Влияние типа каркаса композита на параметры трибосистемы

Каркас покрытия	Скорость изнашивания, $V_{\text{из}} \cdot 10^3$ мм/мин	Ресурс, $R \cdot$ циклов	Интенсивность изнашивания, $I \cdot 10^8$
Атлас 0,55	0,288	87454,3	3,693357
Атлас 0,31	0,387	39611,6	4,569368
Саржа 1/3	0,179	125592,6	2,261287
Саржа 1/1	0,267	39465,5	4,358237

Толстый атлас более универсален, технологичен и экономичен, а саржа 1/3 предназначена для высоких нагрузок порядка 150 МПа и более. Тонкий атлас и саржа 1/1 также могут применяться, но только при обработке рабочей поверхности контртела до 11 – 12 квалитет шероховатости.

Одним из наиболее ответственных этапов работы трибосистемы, влияющим на эффективность ее эксплуатации, является приработочный период. Исключив величину деформации ползучести полимерных покрытий, получены регрессионные модели приработки следующего вида:

для времени приработки

$$t_{\text{пр}} = 10^{2,193} \cdot \sigma^{0,149} \cdot K_{\text{ВЗ}}^{-0,228} \cdot V^{0,583}, \text{ мин}; \quad (21)$$

для приработочного износа

$$h_{\text{пр}} = 10^{-0,0063} \cdot \sigma^{-0,448} \cdot K_{\text{ВЗ}}^{-0,136} \cdot V^{2,102 - \lg \sigma}, \text{ мм}. \quad (22)$$

Модели адекватны и обеспечивают интерполяционные расчеты в пределах погрешности 2,6 % – 4,9%. Графики моделей представлены на рисунке 8.

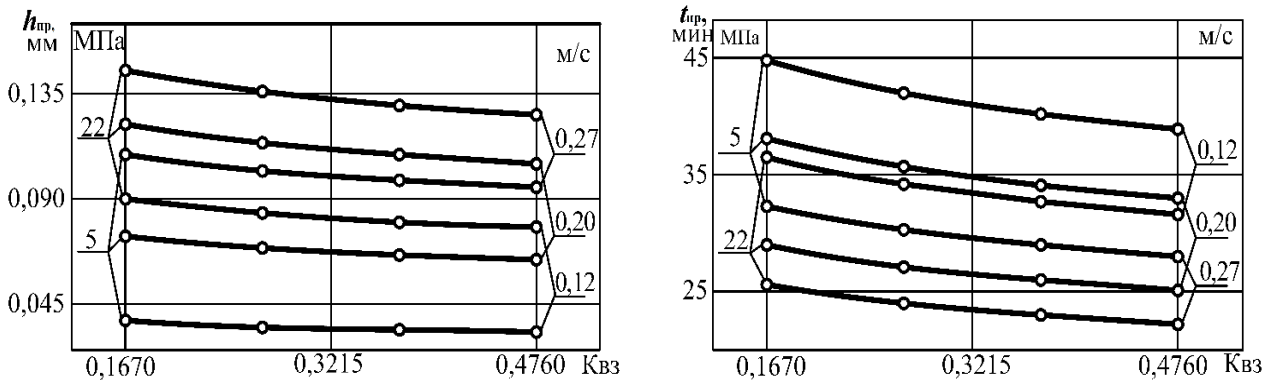


Рисунок 8 - Зависимость приработочного износа $h_{\text{пр}}$ и времени приработки $t_{\text{пр}}$ от эксплуатационных параметров

Анализ полученных результатов доказывает, что наибольшее влияние на приработочные параметры оказывает скорость (таблица 2).

Таблица 2 - Влияние переменных факторов на приработочный износ

Диапазон варьирования переменных факторов			Вклад в рост температуры в % от		
$K_{\text{ВЗ}}$	σ , МПа	V , м/с	$K_{\text{ВЗ}}$	σ , МПа	V , м/с
0,167 – 0,476	5 – 22	0,12 – 0,27	-21,2	24,8	60,4

Учитывая значительное влияние температуры на все характеристики полимерных материалов, исследуем ее изменение в диапазоне применяемых нагрузочно-скоростных режимов. Обработка экспериментальных данных позволила получить модель (23).

$$T = 10^{2,193} \cdot \sigma^{0,149} \cdot K_{\text{ВЗ}}^{-0,228} \cdot V^{0,583}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (23)$$

Модель адекватна и обеспечивает среднюю погрешность в 4,1%. Влияние отдельных переменных факторов на температуру антифрикционного покрытия показано на графике (рисунок 9).

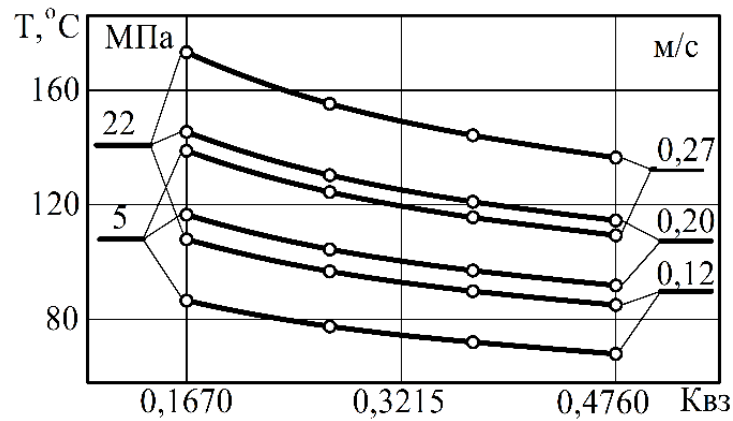


Рисунок 9 - Влияние нагрузочно-скоростных режимов на температуру в зоне трения

Поскольку температура, как результат воздействия на антифрикционное полимерное покрытие трибосистемы нагрузочно-скоростных режимов, оказывает наиболее значимое влияние на физико-механические свойства полимера, а, следовательно, и на условия контактирования и износ, установим непосредственную зависимость приработочных параметров от температуры (рисунок 10).

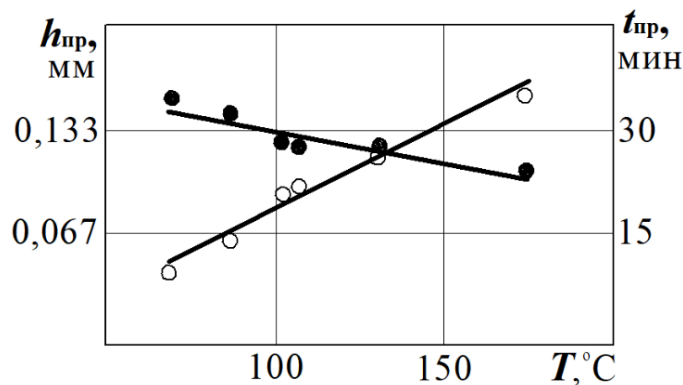


Рисунок 10 - Зависимость приработочных параметров композиционных фторопластсодержащих покрытий от температуры

Полученные результаты позволяют в определенной степени управлять путем принудительного нагрева трибосистемы приработкой.

Одним из важных стандартных параметров трибосистем является интенсивность изнашивания. Она установлена экспериментально для полного и для стационарного периодов трения (таблица 3).

Таблица 3 - Влияние переменных факторов на интенсивность изнашивания

Параметры режима трения			Изменения температуры, %	
К _{ВЗ}	V м/с	σ, МПа	Текущие	Среднее
0,167 – 0,476	0,12 – 0,27	5.– 22	23,5	– 23,5
0,167 – 0,476	0,12 – 0,27	5	14,2	19,7
		22	– 25,3	
	0,12	102,3	67,2	
	0,27	32,2		

Полученная адекватная модель для стационарного периода обеспечивает погрешность не более 3,7%, имеет следующий вид:

$$I_{ст} = 2,93 \cdot \sigma^{-0,445} \cdot K_{вз}^{-0,201} \cdot V^{0,595-0,904 \lg \sigma} \quad (24)$$

и позволяет построить график (рисунок 11).

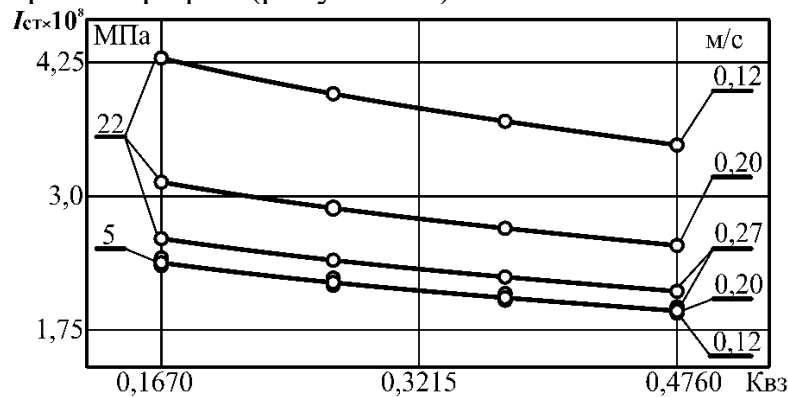


Рисунок 11 - Интенсивность изнашивания покрытия в стационарном периоде трения

Особенностью полученных результатов при нагрузке 22 МПа является рост интенсивности изнашивания при уменьшении скорости, т.е. обратная зависимость. Это может быть объяснено уплотнением композита под нагрузкой или увеличенным выносом фторопласта при пике малой скорости. Однако основным фактором, приводящим к указанному эффекту, является значительное сокращение длины хода за цикл. Указанный эффект может иметь место только при определенном сочетании нагрузочно-скоростных режимов и коэффициента взаимного перекрытия в условиях возвратно-поступательного движения.

Суммарным показателем уровня применимости трибосистемы является ее ресурс, который может быть измерен в часах работы или в количестве циклов нагружения за это время. Регрессионная модель ресурса для стационарного периода трения в циклах нагружения имеет вид:

$$R_{ст} = 5,297 \cdot \sigma^{0,086} \cdot K_{вз}^{2,371+0,834 \lg V} \cdot V^{-0,216+0,677 \lg \sigma} \cdot (10^6 \text{ ц}). \quad (25)$$

Графическая интерпретация модели представлена на рисунке 12

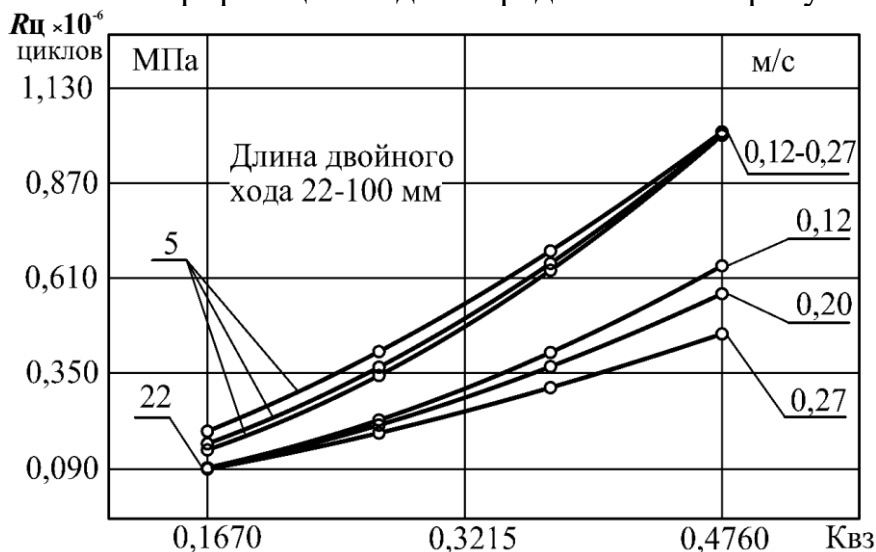


Рисунок 12 - Зависимость стационарного ресурса покрытия от параметров нагружения

Анализ экспериментальных данных позволяет установить, что наибольшее влияние на ресурс фторопластсодержащих покрытий оказывает коэффициент взаимного перекрытия ($K_{ВЗ}$). При меньшем значении $K_{ВЗ}$ и наибольшей нагрузке, а также при наибольшем значении $K_{ВЗ}$ и наименьшей нагрузке, исследованный диапазон скоростей практически не влияет на ресурс покрытия.

В пятой главе приводятся данные по экспериментальной верификации теоретических разработок и результатам промышленных испытаний.

Сравнение величин коэффициента трения, необходимого для вычисления температуры в контактной зоне и самой температуры в исследованном диапазоне нагрузочно-скоростных режимов приводится в таблице 4.

Таблица 4 - Сравнение расчетных и экспериментальных результатов

$K_{ВЗ}$	σ , МПа	V	$\alpha_{тп}$	f	$T_{Э}$	$T_{Р}$	$\Delta\%$
0,167	5	0,12	0,280762	0,093	82,6	79,2	4,2
	22			0,034	104	112,1	7,8
	5	0,27		0,052	150	141,1	5,9
	22			0,016	173	182,2	5,3
0,476	5	0,12	0,120457	0,152	68	63,0	7,4
	22			0,057	92,4	87,7	5,1
	5	0,27		0,086	106	107,4	1,3
	22			0,025	130	130,4	0,3

Анализ табличных данных показывает, что использованная методика температурного расчета обеспечивает удовлетворительную сходимость расчетных результатов с экспериментальными данными. Средняя погрешность сравниваемых величин составляет 4,66 %, а ее диапазон – 0,3-7,8 %.

Данные литературы и опыт эксплуатации вдоль следа шероховатостей поверхности при вращательном движении подтверждает, что движение перпендикулярное следу механической обработки при возвратно-поступательном движении эквивалентно увеличению шероховатости в 2 – 4 и более раз. Сравнение реального влияния шероховатости на ресурс исследуемых трибосистем при разном типе движения приведено в таблице 5.

Таблица 5 - Влияние шероховатости на ресурс покрытия

№ п/п	Тип движения	$K_{ВЗ}$	Расчетные формулы ресурса R	Параметр R_a	Ресурс R, циклов	Снижение ресурса	
						в одном движении	разные движения
1	Вращение	1	$2,045e^{-1,99R_a} \times 10^6$	0,053	1840589	$R_{В1}/R_{В2} = 1,995$	$R_{В1}/R_{П3} = 10,36$
2				0,4	922715		
3	Возвратно-поступател.	0,167	$1,889 \cdot 0,32^{R_a} \times 10^6$	0,053	177602	$R_{П3}/R_{П4} = 1,485$	$R_{В2}/R_{П4} = 7,71$
4				0,4	119612		

Анализ табличных данных позволяет установить, что шероховатость поверхности металлического контртела при изменении с 8 по 11 квалитет обеспечивает при возвратно-поступательном движении ресурс на 25,6 % меньший, чем

при вращательном. Это объясняется более интенсивной деформацией покрытия и микрорезанием фторопласта.

Промышленные испытания разработанной трибосистемы с фторопластсодержащим композиционным антифрикционным покрытием проводились на Лопастном заводе Ростовского-на-Дону ПАО «Роствертол» (акт в приложении А). Объектом испытаний являлся станок для намотки лонжеронов лопастей несущего винта вертолетов лентами из стеклоткани (рисунок 12).



Рисунок 12 - Каретки станка для намотки лонжеронов

На рисунке 12 стрелками указаны места установки подпружиненных контактных элементов с нанесенными антифрикционными фторопластсодержащими покрытиями. При проведении регламентных работ, включающих контроль поверхностей трения, не наблюдалось следов нарушения рабочей поверхности покрытия и его отслаивания. Ресурс трибосистем перемещения каретки после нанесения покрытия увеличился на 13,2 %

Заключение и общие выводы

Проведенный комплекс теоретических и экспериментальных исследований позволил решить поставленную задачу о применении высокоэффективных самосмазывающихся антифрикционных фторопластсодержащих полимерных покрытий в условиях возвратно-поступательного движения при коэффициенте взаимного перекрытия меньше единицы. При этом были учтены все особенности новой области эксплуатации.

Итоги выполненных исследований и промышленных испытаний позволяют сделать следующие выводы.

1. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований установлены основные закономерности работы металлополимерных фторопластсодержащих антифрикционных покрытий при коэффициенте взаимного перекрытия в диапазоне 0,167 – 0,467, средней скорости 0,12 – 0,27 м/с и нагрузки 5-22 МПа.

2. Результатом теоретических исследований геометрических соотношений при рабочем нагружении рассматриваемых трибосистем и анализе напряженно-деформированного состояния вязкоупругого полимерного покрытия являются

конечные выражения для расчета контактного угла и распределения давлений в металлополимерном трибосопряжении.

3. Учитывая влияние коэффициента взаимного перекрытия на распределение тепловых потоков и используя закон теплопроводности Фурье, получено аналитическое выражение для расчета температуры в зоне покрытие-субстрат, влияющей на адгезионную прочность покрытия, работоспособность и износостойкость металлополимерной трибосистемы.

4. Анализ специфики возвратно-поступательного движения и результаты экспериментальных исследований позволили разработать конструкцию металлополимерной трибосистемы, обеспечивающую эффективную эксплуатацию в условиях коэффициента взаимного перекрытия меньше единицы с ресурсом в исследованном диапазоне нагрузочно-скоростных режимов в диапазоне $(0,09 - 1,123) \times 10^6$ циклов нагружения.

5. Учитывая механизм самосмазывания трибосистемы в результате адгезионного переноса фторопласта установлены рациональные режимы приработки, обеспечивающие повышение эффективности как при технологической приработке, так и при эксплуатационной.

6. На базе экспериментальных исследований в условиях возвратно-поступательного движения разработанных трибосистем установлена область их рациональной эксплуатации в широком диапазоне величин коэффициента взаимного перекрытия $(0,167 - 0,467)$ и нагрузочно-скоростных режимов $V=0,12-2,7$ м/с, $\sigma=5-22$ МПа.

7. Дополнительным подтверждением значимости исследований и их востребованности инженерной практикой являются результаты промышленных испытаний, разработанных трибосистем, на Лопастном заводе Ростовском н/Д ПАО «Роствертол», оцененные удовлетворительно (акт в приложении А).

Перспективы дальнейших исследований по теме

В работе исследован ограниченный диапазон нагрузочно-скоростных режимов при самосмазывании фторопластом. Представляется перспективным расширение области применения фторопластсодержащих покрытий дополнительно используя смазочные материалы. Переход на жидкие смазочные материалы позволит, увеличить диапазон применяемых режимов в результате охлаждения полимерного покрытия, а также резко повысить ресурс трибосистемы, так как жидкое смазывание сохранит объем фторопласта, который будет расходоваться только при пусках и выбегах.

Публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Кохановский, В. А.** Влияние окружающей среды на антифрикционные покрытия / В.А. Кохановский, В.В. Рубанов, Н.В. Нихотина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения.–2018.–№3 (71).– С. 22-27.

2. **Нихотина, Н.В.** Приработка фторопластсодержащих покрытий при поступательном движении / Н.В. Нихотина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – №1 (85). – С. 29-35.

Публикации в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science:

3. **Kokhanovskii, V.** Coefficient of mutual overlap in metal-polymer tribosystems / V. Kokhanovskii, N. Nihotina, M. Nikitina // Journal of Physics: Conference Series, Divnomorskoe, 31 мая – 06 2021 года. – Divnomorskoe, 2021. – P. 052031. – DOI 10.1088/1742-6596/2131/5/052031.

4. **Kokhanovskii, V. A.** Metal–Polymer Frictional Contact in Reciprocating Motion / V. A. Kokhanovskii, N. V. Nikhotina // Russian Engineering Research. – 2022. – Vol. 42, No. 3. – P. 223-227. – DOI 10.3103/S1068798X22030091.

5. **Kokhanovskiy, V. A.** Friction of Fluoroplastic Coatings in Swinging Motion / V. A. Kokhanovskiy, N. V. Nikhotina // Russian Engineering Research – 2022. – Vol. 42, No. 4. – P. 339-341. – DOI 10.3103/S1068798X22040177.

Публикации в других изданиях

6. **Кохановский, В. А.** Новое применение коэффициента взаимного перекрытия / В.А. Кохановский, Н.В. Нихотина // В сборнике: Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России. Сборник научных трудов. 2018. С. 207-209.

7. **Кохановский, В. А.** Контактные давления в металлополимерной трибосистеме / В. А. Кохановский, Н. В. Нихотина // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2019. – № 4. – С. 69-72.

8. **Нихотина, Н.В.** Методика исследований антифрикционных полимерных покрытий / Н.В. Нихотина // В сборнике: Сборник научных трудов "Транспорт: наука, образование, производство". Труды Международной научно-практической конференции. – 2020. – С. 301-305.

9. Применение полимерных композитов для снижения шума и вибрации / Е.В. Наливкина, А.А. Феденко, Н.В. Нихотина, Е.В. Рязанова // В сборнике: Сборник научных трудов IV международной научно-практической конференции «Транспорт и логистика: пространственно-технологическая синергия развития» .Ростов-на-Дону, 2020. С. 221-225.

10. **Кохановский, В. А.** Нагружение полимерного покрытия подшипника / В.А. Кохановский, Н.В. Нихотина, А.А. Петренко // В сборнике: Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России. Сборник научных трудов Международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону, 2020. С. 122-125.

11. **Нихотина, Н.В.** Температура в металлополимерных трибосистемах / Н.В. Нихотина, Ю.А. Проскорякова // В сборнике: Повышение эффективности технических систем. сборник научных трудов Всероссийской национальной научно-практической онлайн-конференции. Ростов-на-Дону, 2020. С. 143-147.

Патенты на полезную модель:

12. Патент на полезную модель RU 177431 U1, 21.02.2018, «Узел трения скольжения с плавающим вкладышем для реверсивного движения» Кохановский В.А., Нихотина Н.В., Больших И.В.

13. Патент на полезную модель № RU190621U1, 04.07.2019, «Опорный шкворневой узел» / В.А. Кохановский, П.Г. Иваночкин, М.А. Мукутадзе, Н.В. Нихотина, Е.В. Рязанова, С.С. Черняев. Заявка № 2019113876 от 06.05.2019.

Личный вклад соискателя

Автором самостоятельно спроектирован рабочий стенд для экспериментальных исследований, изготовлены образцы и обработана поверхность контрол. Основные теоретические и экспериментальные исследования выполнены автором самостоятельно. В работах с соавторством личный вклад автора состоит в проведении теоретических, обработке экспериментальных исследований и графической интерпретации полученных результатов. Автор участвовал в подготовке к промышленным испытаниям.

Нихотина Надежда Владимировна

**ПРИМЕНЕНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
ФТОРОПЛАСТСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ
ПРИ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 09.10.2023. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,16.
Тираж 100 экз. Заказ 11420

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС.
Адрес университета: 344038, г Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового
Полка Народного Ополчения, д. 2, www.rgups.ru.