

На правах рукописи

КАМЕРОВА Эльвира Атласовна

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРИБОСИСТЕМ
В ЖИДКИХ СМАЗОЧНЫХ СРЕДАХ**

Специальность 05.02.04 – «Трение и износ в машинах»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону
2016

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, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности» (ФГБОУ ВО РГУПС)
- Официальные оппоненты: Бутенко Виктор Иванович – доктор технических наук, профессор, институт радиотехнических систем и управления ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», профессор кафедры механики
- Задорожная Елена Анатольевна – доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры «Автомобильный транспорт»
- Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова» (ФГБОУ ВО ЮРГПУ (НПИ) им. М.И. Платова)

Защита диссертации состоится « 16 » мая 2017 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 библиотеке 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 «___» марта 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 218.010.02
д.т.н., профессор

Щербак П.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. Полимерные композиционные фторопластсодержащие материалы в виде антифрикционных покрытий в настоящее время широко применяются в тяжелонагруженных низкоскоростных трибосистемах самых разных машин.

Рассматриваемые композиты содержат в своем составе фторопластовые нити «полифен» и полиимидные «аримид Т». Матричным материалом композита и одновременно адгезивом, закрепляющим покрытие на субстрате, является растворное фенольное связующее, модифицированное термостойким каучуком.

Высокая несущая способность этих материалов объясняется их значительной податливостью, что увеличивает фактическую площадь трибоконтакта и, соответственно, снижает величину реальных нормальных контактных напряжений. Существенным недостатком этих материалов являются ограничения скорости скольжения, связанные с их низкой теплостойкостью.

Несмотря на уникальные антифрикционные свойства фторопласта существенным резервом повышения износостойкости рассматриваемых металлополимерных трибосистем и расширения скоростного диапазона их применимости является переход от граничного трения самосмазыванием к жидкостному трению в условиях гидродинамики.

Однако промышленные масла, проникая и агрегируясь в толще композита, инициируют деструктивные процессы в покрытии и снижают его адгезию к субстрату. Существенно ограничить отрицательное влияние жидкой смазочной среды можно, уменьшив контактную площадь адсорбента. Это возможно в радиально-упорных конических подшипниках с самосмазывающимся покрытием.

В этом случае во время пусков, выбегов, срывов гидродинамического клина и низких скоростей покрытие будет работать в режиме самосмазывания и контактировать с жидкой смазочной средой только торцами, т. к. рабочая поверхность заблокирована контртелом.

В стационарный период необходимо обеспечить гидродинамический режим смазывания, что повысит допустимую скорость скольжения в результате дополнительного охлаждения подшипника картерным маслом. При этом существенно повышается износостойкость антифрикционного покрытия и ресурс трибосистем.

Изложенное позволяет сформулировать общую цель исследований.

Цель работы - повышение ресурса и допустимой скорости скольжения металлополимерных трибосистем с композиционными фторопластсодержащими покрытиями путем совершенствования метода смазывания.

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

1. Установить основные закономерности изменения адгезионных и вязкоупругих свойств фторопластсодержащих антифрикционных полимерных покрытий в жидких смазочных средах.

2. Определить рациональный состав и режимы эксплуатации рассматриваемых металлополимерных трибосистем при граничном трении в жидких смазочных средах.

3. Совершенствовать конструкцию трибосистем для создания условий, обеспечивающих режим гидродинамического смазывания.

4. Сформировать расчётные модели, обеспечивающие определение эксплуатационных триботехнических характеристик металлополимерных трибосистем рассматриваемого класса.

5. Выполнить промышленную проверку эффективности результатов исследований, выводов и рекомендаций.

Объектом исследований являются процессы трения и изнашивания металлополимерных трибосистем в жидких смазочных средах.

Предмет исследований – это подшипники скольжения с фторопластсодержащим композиционным покрытием, работающие при граничном и жидкостном смазывании.

Базой теоретических исследований являлись известные закономерности ламинарного течения жидкостей в уравнениях Навье-Стокса и Рейнольдса.

Экспериментальные исследования выполнялись на прецизионном современном оборудовании и специальной установке при планировании полнофакторных экспериментов и статистической обработке результатов.

Научные результаты, выносимые на защиту

1. Закономерности изменения адгезионной прочности фторопластсодержащих композиционных покрытий в жидких смазочных средах в условиях различной температуры, времени экспозиции и вязкости смазочного материала.

2. Особенности вязкоупругой деформации полимерных фторопластсодержащих антифрикционных покрытий в жидких смазочных средах и впервые установленная величина пороговой нагрузки, ограничивающей абсорбционное повышение контактной жесткости покрытий в этих условиях.

3. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, позволившие повысить скоростные режимы и ресурс металлополимерных подшипников скольжения с фторопластсодержащим композиционным покрытием.

4. Триботехнические эксплуатационные характеристики (коэффициент трения, температура, интенсивность изнашивания, ресурс) металлополимерных подшипников скольжения, работающих в среде жидких смазочных материалов в режиме граничного (самосмазывание фторопластом) и жидкостного (гидродинамического) трения.

Научная новизна результатов исследований

1. Выявление закономерности взаимодействия матричного связующего, как адгезива, с жидкими смазочными материалами; установление оценки работоспособности композита в зависимости от времени экспозиции, температуры и вязкости смазочных масел.

2. Результаты анализа вязкоупругого поведения фторопластсодержащих покрытий в жидких смазочных средах, позволившие доказать непротиворечивость гипотезы об абсорбционном повышении контактной жесткости композитов в масляных средах, а также впервые определить критическую нагрузку, блокирующую этот эффект.

3. Итоги экспериментального определения основных триботехнических характеристик металлополимерных пар трения с композиционными полимерными покрытиями, работающими при граничном трении в режиме самосмазывания фторопластом в среде жидких смазочных материалов.

4. Комплекс теоретических и экспериментальных исследований, позволивший разработать конструкцию радиально-упорного подшипника скольжения с осевыми канавками, обеспечивающую переход от граничного трения к устойчивому гидродинамическому режиму.

Практическая значимость работы.

1. Разработан подшипник с полимерным антифрикционным покрытием, на рабочей поверхности которого выполнены две оппозитно расположенные осевые канавки сегментального сечения, обеспечивающие при работе в картерной масляной ванне устойчивый гидродинамический режим трения.

2. Установлены рациональные режимы эксплуатации металлополимерных трибосистем с фторопластсодержащими композиционными покрытиями, позволяющие при переходе от граничного к гидродинамическому трению увеличить допустимую скорость скольжения в 3 раза и при этом повысить ресурс более, чем в 5 раз.

3. Получен комплекс расчетных моделей, позволяющий определить основные эксплуатационные характеристики рассматриваемых трибосистем, работающих в жидких смазочных средах, включающий следующие модели: адгезионной прочности соединения покрытие – субстрат, вклада вязкоупругой деформации композита в формирование зазора сопряжения, интенсивности изнашивания покрытия, коэффициента трения, температуры и ресурса.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности 05.02.04 – «Трение и износ в машинах».

В работе установлено, физическое явление абсорбционного повышения жесткости полимерных композитов в среде жидких смазочных материалов, а также вклад вязкоупругой деформации в формирование зазора трибосопряжения, что соответствует пункту 1 области исследования «Механические, тепловые.....явления при трении»; раскрыты условия граничного самосмазывания фторопластом и гидродинамического – жидким смазочным материалом, что соответствует пункту 4 «Смазочное действие...»; сформирован комплекс регрессионных моделей параметров трения и изнашивания, что соответствует пункту 10 «Физическое и математическое моделирование....». Таким образом диссертация полностью отвечает паспорту специальности 05.02.04 «Трение и износ в машинах».

Личный вклад автора состоит в анализе литературных источников, планировании, выполнении и обработке результатов экспериментальных

исследований, проведенных на стандартном и специальном оборудовании; в постановке задач для компьютерного моделирования и численно-аналитических исследований; в работе на экспериментальном стенде для триботехнических исследований и в подготовке промышленных испытаний разработанного подшипника. Диссертация отвечает на вопросы поставленных задач и соответствует критерию внутреннего единства.

Апробация и реализация результатов диссертации.

Основные положения работы обсуждались на 12-й Международной научно-практической конференции «Проблемы синергетики в трибологии, трибоэлектрохимии, материаловедении и мехатронике» (2013 г., г. Новочеркасск); 8-й Международной научно-практической конференции «Интерагромаш-2015» (2015 г., г. Ростов-на-Дону); Всероссийской научно-практической конференции «Современные аспекты развития науки, образования и модернизации промышленности» (2016, г. Ростов-на-Дону); на научно-технических профессорско-преподавательских конференциях Донского государственного технического университета в 2012-2014 гг.

Промышленные испытания подшипников выполнялись в редукторе ленточно-шлифовального станка Лопастного завода ОАО «Роствертол» (г. Ростов-на-Дону) и показали удовлетворительные результаты.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 работ, из них в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ - 3 работы и 1 патент РФ (общее количество печатных листов – 3,4, выполнено лично автором – 1,9).

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, заключения, библиографического списка из 154 наименований и приложения. Общий объем работы составляет 148 страниц, включает 63 рисунка и 18 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована общая цель работы, приведены ее научная новизна и практическая значимость.

В первой главе описан состав и композиционная структура антифрикционных фторопластсодержащих покрытий. Отмечено отсутствие адгезии фторопласта к матричному связующему, что является основной причиной формирования в покрытии пор и микроступов.

Далее рассматривается трение и изнашивание как основные рабочие процессы и сопутствующая им адгезия и ползучесть, протекающие в среде жидких смазочных материалов.

В литературных источниках имеются лишь отрывочные сведения о фрикционном поведении полимерных композитов в смазочных средах, которые могут играть как положительную, так и отрицательную роль.

Во второй главе изложены результаты теоретических исследований, построенных на решении уравнений Навье-Стокса и Рейнольдса, раскрывающих возможность перехода от граничного трения самосмазыванием к жидкостному гидродинамическому. С этой целью исследуемый радиально-упорный

подшипник с покрытием снабжается двумя оппозитными канавками, расположенными вдоль образующих (рис. 1).



Рис. 1. Расчетная схема

Проинтегрировав уравнение течения тонкого слоя вязкой несжимаемой жидкости

$$\frac{\partial^2 V_n}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (1)$$

при граничных условиях $y = 0 \quad V_n = -V$; $y = h \quad V_n = 0$, получим

$$V_n = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} (y^2 - hy) + \frac{V}{h} (y - h). \quad (2)$$

Используя выражение (2), найдем объем жидкого смазочного материала, протекающего через поперечное сечение канавки в одну секунду

$$Q = \int_0^h V_n b^* dy = \frac{b^*}{2\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \left[\int_0^h y^2 dy - h \int_0^h y dy \right] + \frac{V}{h} \left(\int_0^h y dy - h \int_0^h dy \right) = -\frac{b^* h^3}{12\mu} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{Vh}{2} \quad (3)$$

Здесь обозначено: V_n – скорость потока, P – гидродинамическое давление, μ – коэффициент динамической вязкости, V – линейная скорость вращения вала, h – максимальная глубина канавки, b^* – длина подшипника по образующей.

Предполагая, что расход смазочного материала равен нулю, получим

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{6\mu V}{h^2}. \quad (4)$$

Подставив уравнение неподвижной стенки канавки в (4) и проинтегрировав его по x , с учетом граничных условий (при $x = \delta/2 \quad P = P_n$),

будем иметь:

$$P = \frac{6\mu V}{h_{\max}^2} \left(\frac{\delta}{x} - 2 \right) \quad (5)$$

Умножив обе части уравнения (5) на dx , проинтегрируем его в пределах от $x_{\min} = \delta \frac{h_{\min}}{h_{\max}}$ до $b/2$ и получим:

$$P = \frac{6\mu V}{h_{\max}^2} \left(\int_{\delta \frac{h_{\min}}{h_{\max}}}^{\frac{b}{2}} \frac{\delta}{x} dx - 2 \int_{\delta \frac{h_{\min}}{h_{\max}}}^{\frac{b}{2}} dx \right) = \frac{6\mu V}{h_{\max}^2} \left[\delta \ln \frac{bh_{\max}}{2\delta h_{\min}} - 2 \left(\frac{b}{2} - \delta \frac{h_{\min}}{h_{\max}} \right) \right] \quad (6)$$

Считая, что $\delta \frac{h_{\min}}{h_{\max}} \approx 0$, а $h_{\max} = \delta$, получим окончательно для гидродинамического давления в канавке

$$P = \frac{6\mu V}{\delta} \left(\ln \frac{b}{2h_{\min}} - \frac{b}{\delta} \right). \quad (7)$$

Проверка размерности и контрольный расчет для жидкого смазочного материала марки МС-20 при температуре 30 °С, ширине канавки 3 мм и скорости скольжения 0,3 м/с показал, что величина выталкивающей силы в этом случае равна 5596,9 Па.

Таким образом, несмотря на то, что, благодаря значительным упрощениям задачи, полученная аналитическая зависимость носит только качественный характер, она доказывает возможность использования канавок на рабочей поверхности подшипниковых втулок для создания условий к автопереходу от граничного трения к жидкостному.

Далее был разработан численный метод и программное средство генерации геометрии области течения смазочного материала. Если центр сечения подшипника расположен в начале координат, а центры канавок на оси абсцисс, то координаты точек на контуре канавки (рис. 2) определены как

$$\begin{cases} x_k(\theta) = \frac{x_c + \sqrt{x_c^2 - [1 + \tan^2(\theta)] \cdot (x_c^2 - \rho_k^2)}}{1 + \tan^2(\theta)}; & |\theta| \leq \theta_{\text{int}}/2. \\ y_k(\theta) = \sqrt{\rho_k^2 - (x_{\text{int}} - x_c)^2} \end{cases} \quad (8)$$

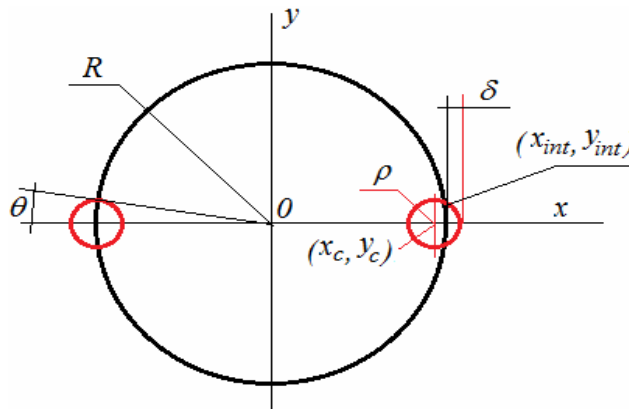


Рис. 2. Геометрия моделируемой контактной поверхности подшипника

Соответственно, длина радиуса – вектора $r_k(\theta) = \sqrt{x_k^2(\theta) + y_k^2(\theta)}$, направленного из центра к внутренней поверхности подшипника, будет равна

$$R_{\text{out}}(\theta) = \begin{cases} r_k(\pi/2 - \theta) & \text{при } (\theta \leq \pi/2) \cap (\theta \geq \pi/2 - \theta_{\text{int}}/2) \\ r_k(\theta - \pi/2) & \text{при } (\theta \geq \pi/2) \cap (\theta \leq \pi/2 + \theta_{\text{int}}/2) \\ r_k(3\pi/2 - \theta) & \text{при } (\theta \leq 3\pi/2) \cap (\theta \geq 3\pi/2 - \theta_{\text{int}}/2) \\ r_k(\theta - 3\pi/2) & \text{при } (\theta \geq 3\pi/2) \cap (\theta \leq 3\pi/2 + \theta_{\text{int}}/2) \\ R_0 & \text{иначе} \end{cases} \quad (9)$$

В связи с коническим профилем подшипника численное решение уравнения Рейнольдса выполнялось для пяти равноотстоящих друг от друга сечений с разным азимутальным профилем и распределением смазочного материала. Решение позволило определить компоненты скорости

$$\begin{aligned} V_x &= \frac{1}{2\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} (y^2 - yh) + \frac{y}{h} U \\ V_z &= \frac{1}{2\mu} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} (y^2 - yh) \end{aligned}, \quad (10)$$

и сдвиговые напряжения на верхней поверхности ($y = h$)

$$\tau_{xy}|_{y=h} = \frac{h}{2} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{h} U; \quad \tau_{zy}|_{y=h} = \frac{h}{2} \cdot \frac{\partial P}{\partial z}$$

и на нижней ($y = 0$)

$$\tau_{xy}|_{y=0} = -\frac{h}{2} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{h} U; \quad \tau_{zy}|_{y=0} = -\frac{h}{2} \cdot \frac{\partial P}{\partial z}.$$

После перехода к полярной системе координат, замене переменных и численного решения получены результаты, пример которых в виде графиков представлен на рис. 3 и 4.

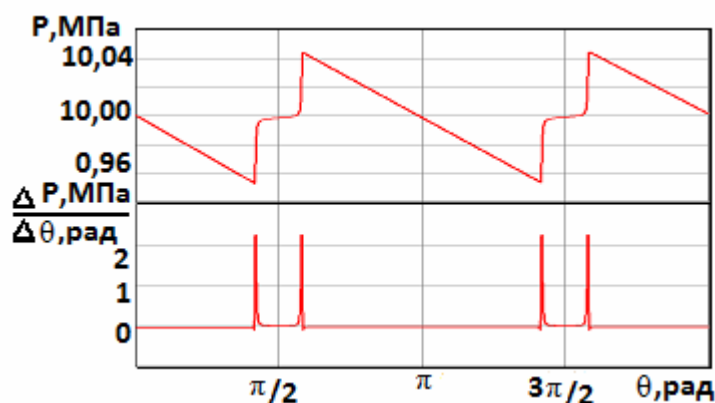


Рис. 3. Окружная зависимость давления и градиента давления в зазоре

В зоне размещения канавок наблюдается резкий скачок давления и его плавный спад в области между канавками, т.к. уравнение Рейнольдса не предполагает дополнительной подачи смазочного материала. Однако подшипники предназначены для работы в масляной ванне (картере), где обеспечивается постоянная подпитка смазочным материалом.

Сглаженный график зависимости дополнительного давления от радиуса подшипника и произведения динамической вязкости на угловую скорость представлен на рис. 4. Полученная зависимость аппроксимирована простой моделью вида

$$P = 0,158 \cdot R - 0,038 \cdot (\mu \cdot \Omega) + 12,07 \cdot (\mu \cdot \Omega)^2. \quad (12)$$

Даже малая величина второго коэффициента не позволяет им пренебречь и погрешность модели в исследованном диапазоне не превышает 5 %.

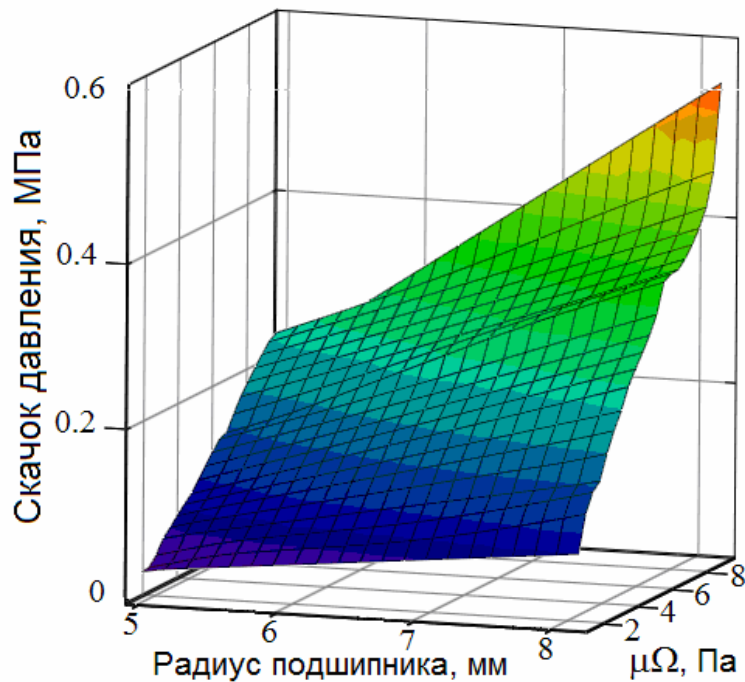


Рис. 4. Зависимость скачка дополнительного давления в канавке от радиуса подшипника R и произведения вязкости на угловую скорость $\mu\Omega$

Для более детального исследования установленных закономерностей были построены плоская и трехмерная конечноэлементные модели на основе уравнения Навье-Стокса. В результате были получены распределения величины давления смазочного материала в поперечном и продольном сечениях канавки.

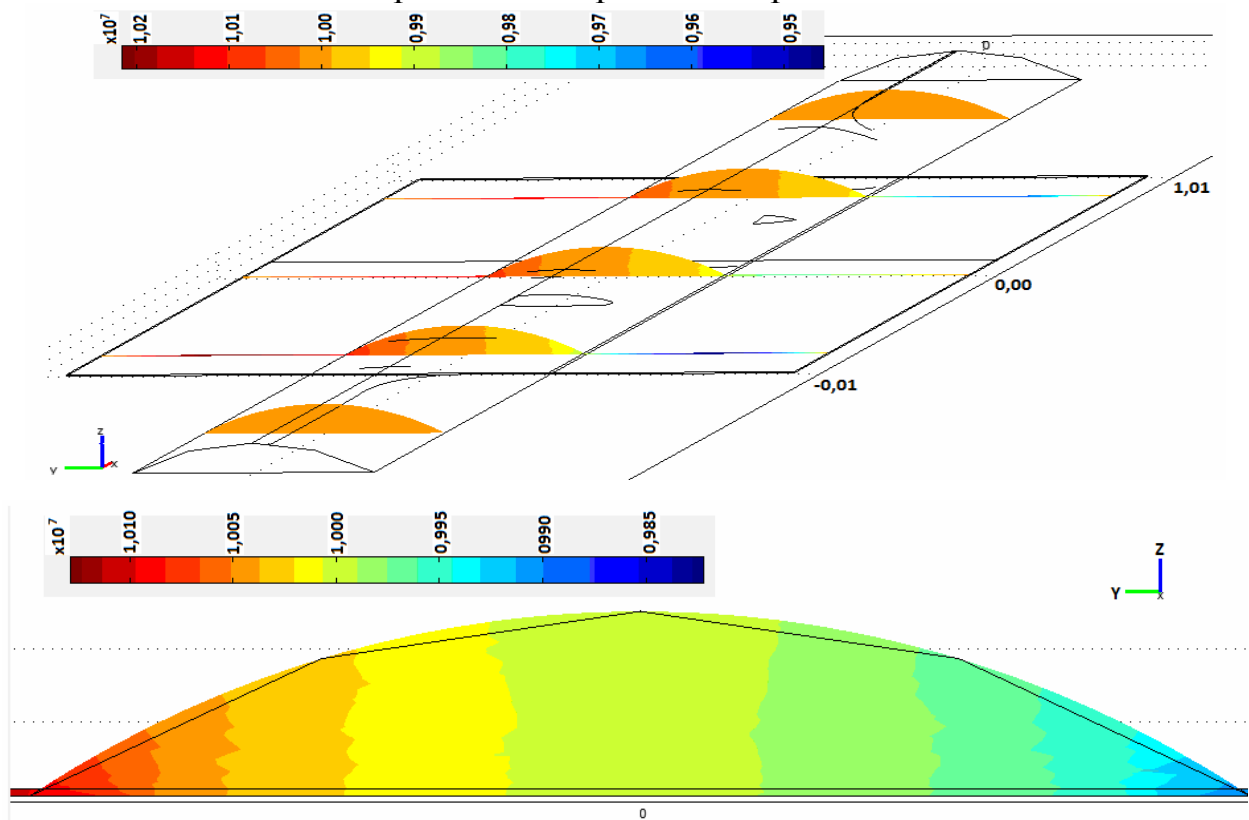


Рис. 5. Цветовая карта распределения давления смазочного материала в канавках

Проведенные численные расчеты и моделирование показывают, что безазорные радиально-упорные подшипники с фторопластсодержащим покрытием могут быть переведены с граничного на жидкостное трение, что увеличит допустимую скорость эксплуатации и существенно повысит ресурс.

В третьей главе описана методика экспериментальных исследований, приведена их общая схема (рис. 6) и дана характеристика применяемого оборудования.

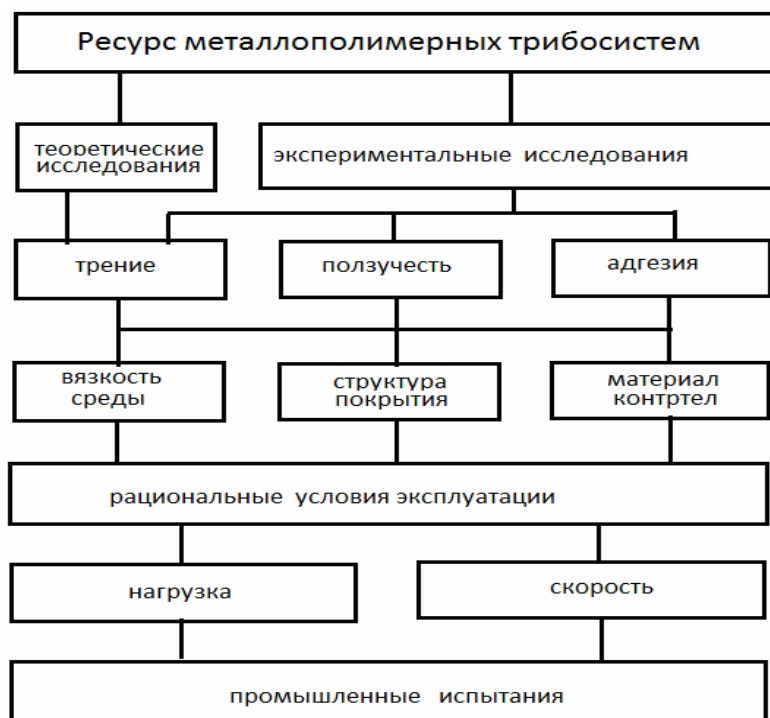


Рис. 6. Схема исследований

Исследования адгезионной прочности покрытий на стальном и латунном субстрате проводились на машине для испытания текстильных материалов марки РТ250М-2.

Вязкоупругие свойства полимерного композита исследовались на прецизионном комплексе для механических испытаний модели TIRA test 2850 фирмы DOLI. Этот комплекс представляет собой универсальную испытательную машину с механическим приводом, которая управляется электронной системой EDC – 120.

Исследование триботехнических характеристик полимерных композиционных покрытий выполнялось на специальном стенде, смонтированном на основе настольно-сверлильного станка модели НС-12. Варьирование скорости вращения шпинделя станка обеспечивалось частотным преобразователем модели ATV312HU16N4. Частота вращения устанавливалась по тахометру ИО-30.

Экспериментальные образцы представляли собой радиально-упорные подшипники с углом конуса 10 градусов. На внутреннюю поверхность подшипниковой втулки наносилось антифрикционное фторопластсодержащее полимерное композиционное покрытие. Контртела выполнялись в виде валиков

с конической рабочей частью. Результаты исследований устанавливались по 3 - 5 параллельным опытам после статистической обработки.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований. Учитывая, что работоспособность покрытий, в первую очередь, определяет их адгезия к субстрату, то вначале исследовалась адгезионная прочность покрытий. Этот параметр оценивался, после экспозиции в жидких смазочных материалах, по прочности на отслаивание при отгибе покрытия на 180 градусов. При этом учитывалось повышение температуры масляной среды в результате трения. Анализ полученных регрессионных моделей и их погрешностей позволил получить единую обобщенную для всех исследованных факторов и материалов модель вида:

$$P = 8,958 t^{-0,08} T^{-0,078}, \quad (13)$$

где P – прочность в кН/м, t – время экспозиции в час, T – температура в $^{\circ}\text{C}$.

Графическое изображение модели представлено на рис.7.

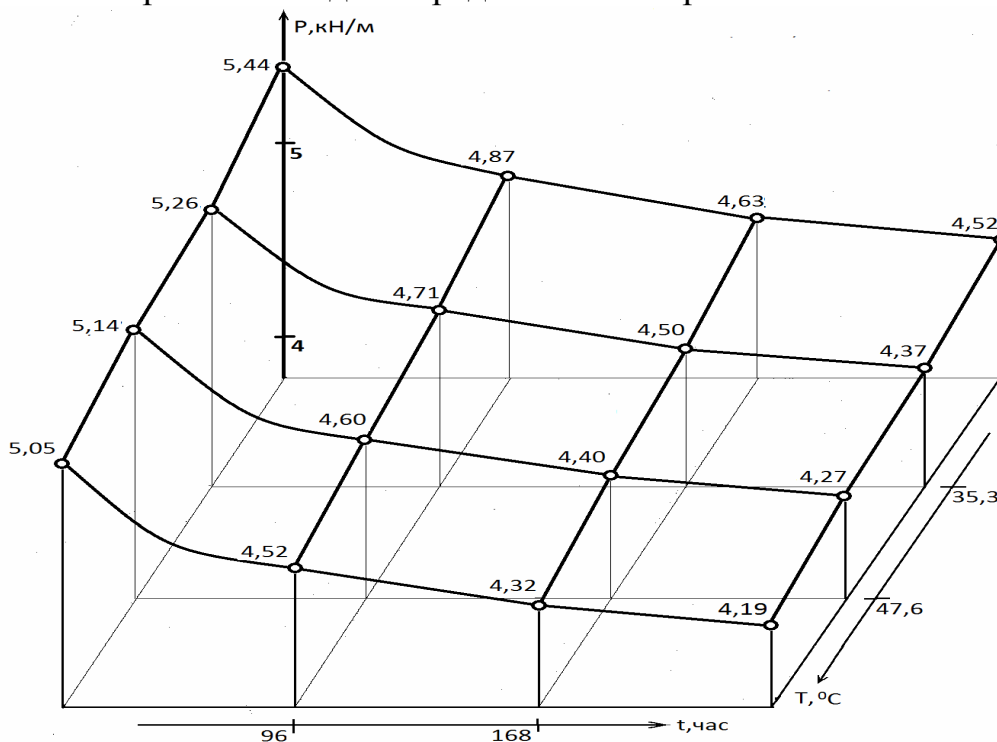


Рис. 7. Зависимость адгезионной прочности покрытий от температуры и времени экспозиции в жидких смазочных средах

Для оценочных расчетов (табл. 1) приводятся модели остаточной адгезионной прочности следующего общего вида:

$$K = [(P_{\text{возд}} - P) 100\%] P_{\text{возд}} = at^b T^{c-d \lg t} \quad (14)$$

Таблица 1. Остаточная прочность покрытий

Масло (среда)	Субстрат	Параметры моделей			
		a	b	c	d
турбинное Тп22-С	Сталь	$7,98 \cdot 10^{-3}$	1,448	1,680	0,676
	Латунь	$9,10 \cdot 10^{-4}$	1,825	2,089	0,850
авиационное МС-20	Сталь	$3,44 \cdot 10^{-3}$	1,477	1,810	0,670
	Латунь	$2,63 \cdot 10^{-3}$	1,491	1,762	0,637

Полученные модели адекватны и их погрешность не превышает 6,2 %. Сравнительный анализ показал, что наименьший вклад в потери адгезионной прочности вносит материал субстрата (2,57 %), а наибольший - время экспозиции (15,6 %).

Известно, что вязкоупругие свойства полимерных покрытий с одной стороны увеличивают зазор трибосопряжения в результате деформации ползучести, с другой – повышают контактную жесткость в результате абсорбции жидких сред. Последнее отмечено только для водных растворов в диапазоне малых нагрузок.

Результаты экспериментальных исследований ползучести композиционных покрытий были представлены в виде трехпараметрической модели «типичного твердого тела»

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_0} + \left(\frac{\sigma}{E} - \frac{\sigma}{E_0} \right) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (15)$$

Параметры моделей для композита на основе тканого каркаса атласного переплетения приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры моделей ползучести и вязкоупругая компонента зазора трибосопряжения

Каркас композита	Среда	Экспозиция, час	Нагрузка МПа	Параметры модели ползучести			Максим. деформация, ε	Составляющая зазора, δ мм
				E ₀ , МПа	E _∞ , МПа	τ, мин		
Двух-точный шестиремизный полуторослойный атлас	Турбинное масло Тп22-С	24	5	43,40	38,77	10,10	0,131	0,069
			70	374,48	344,81	6,84	0,218	0,116
		240	5	48,01	44,27	6,11	0,114	0,057
			70	282,47	251,31	5,57	0,280	0,140
	Авиационное масло МС-20	24	5	52,87	48,09	9,40	0,098	0,069
			70	366,00	329,91	10,10	0,187	0,124
		240	5	57,89	52,58	9,60	0,095	0,062
			70	219,24	210,22	7,16	0,219	0,177
	Воздух	—	5	39,30	35,70	12,5	0,139	0,074
			70	420,10	394,6	8,10	0,178	0,111

Анализ табличных данных позволяет оценить вклад деформации ползучести в формирование зазора трибосопряжения и подтвердить факт абсорбционного повышения жесткости покрытий в среде жидких смазочных материалов. Таким образом, подтверждается параллельное протекание двух конкурирующих процессов в фторопластсодержащих полимерных покрытиях: деградиационных и повышающих жесткость. Для установления величины предельных напряжений, повышающих жесткость, были получены и решены совместно две модели, связывающие изменение мгновенного модуля с величиной контактных напряжений в среде турбинного масла марки Тп22-С $E_0 = 12,329\sigma^{0,795}$, и воздушной $E_0 = 9,2\sigma^{0,911}$.

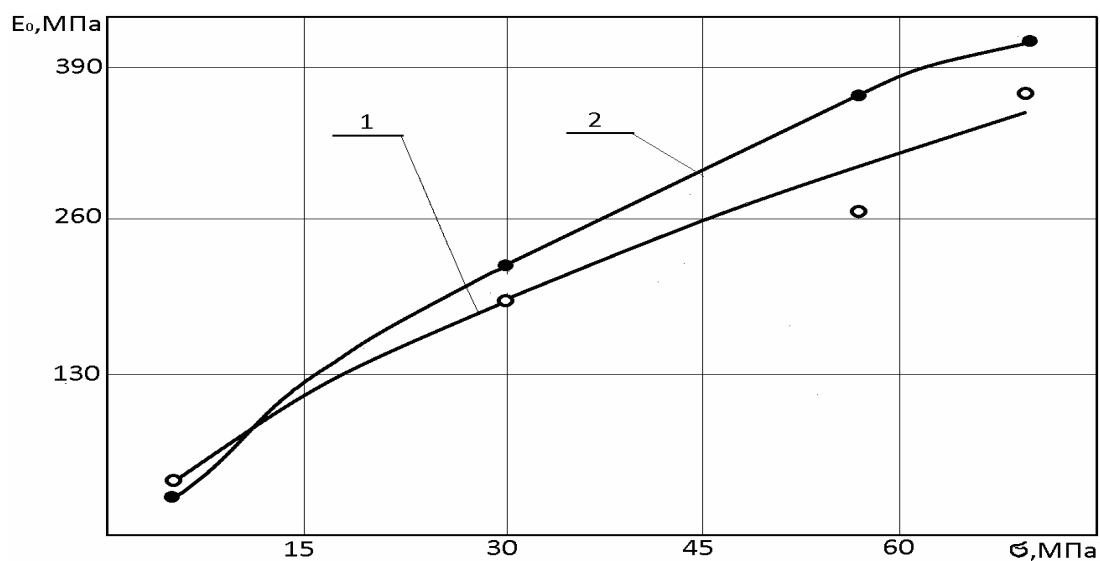


Рис.8. Зависимость мгновенного модуля от контактных напряжений в смазочной (1) и воздушной (2) средах

Анализ графиков, представленных на рис.8, показывает, что при низких нагрузках (менее 12,5 МПа) величина мгновенного модуля покрытия в исследованной области в результате абсорбционного повышения жесткости растет до 10,4 %, а при высоких нагрузках (более 12,5 МПа) - падает до 10,8 %. Следовательно, при эксплуатации покрытий в режиме жидкостного смазывания и нагрузках более 12,5 МПа при расчетах необходимо учитывать деструкцию полимерных покрытий в жидких смазочных материалах.

Для оценки контактной жесткости покрытий получены интерполяционные регрессионные модели (табл. 3) влияния на мгновенный модуль напряжений и времени экспозиции в смазочной среде в виде

$$E_0 = a t^b \sigma^{c-d \lg t}. \quad (16)$$

Таблица 3. Параметры моделей жесткости покрытий

Каркас покрытия	Среда	Параметры моделей жесткости				Погрешность, %	
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	Максим.	Средняя
1	2	3	4	5	6	7	8
Атлас	Тп22-С	7,349	0,145	1,0169	0,145	5	±1,5
	МС-20	8,628	0,199	1,0486	0,229		
	Общая	7,988	0,172	1,0327	0,187	13,5	±8,3
Саржа1/3	Тп22-С	3,515	0,364	1,0810	0,215	5	±1,5
	МС-20	4,863	0,269	1,0225	0,198		
	Общая	4,189	0,317	1,0518	0,207	16,1	±8,4

Используя близость величин параметров моделей E_0 для различных типов смазочных материалов и одного вида композита (строки 1 и 2 табл.3), были получены обобщенные модели покрытий. Одна из них представлена на рис. 9.

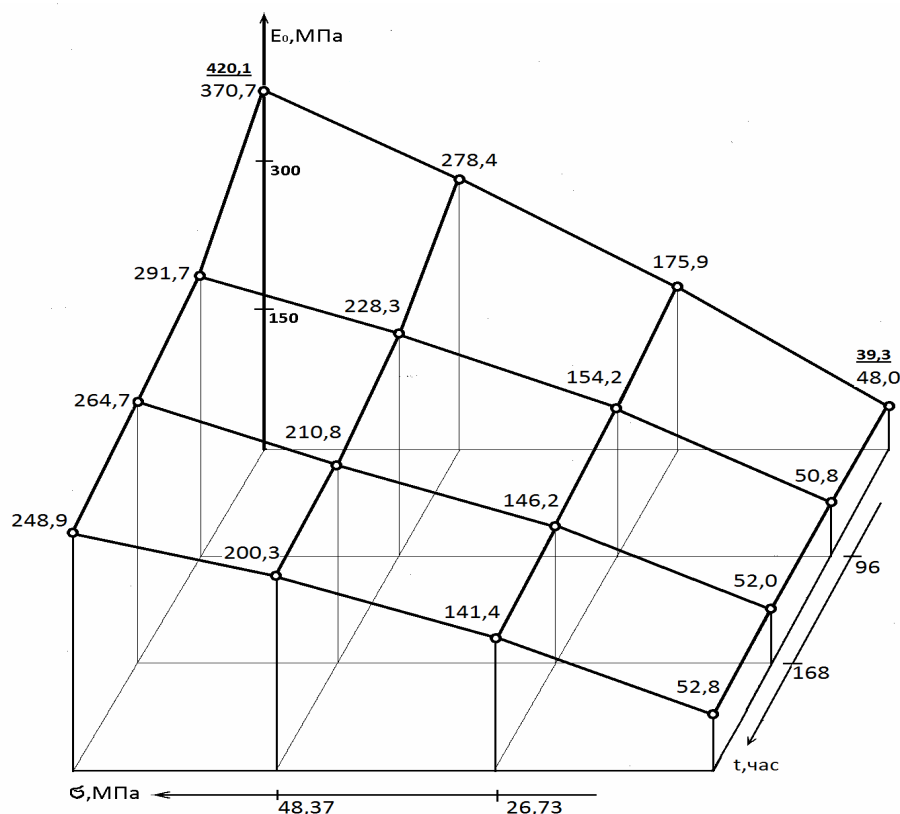


Рис. 9. Обобщенная модель изменения жесткости покрытий на основе каркаса из ткани атласного плетения в среде минеральных масел (подчеркнутые цифры относятся к воздушной среде)

Следует отметить, что все адсорбционно-абсорбционные эффекты в рассматриваемом композите существенно зависят от площади контакта с жидкой фазой – смазочной средой, поэтому конструктивным путем снижения влияния жидкой фазы является применение радиально-упорных подшипников, гарантирующих покрытия от проникновения среды во время пусков, выбегов, срывов гидродинамического клина и в нерабочие периоды, когда трибосистема беззазорна.

Заключительным этапом исследований является определение триботехнических параметров металлополимерных трибосистем в рассматриваемых условиях. Вначале исследуется режим граничного трения. На полимерное покрытие, кроме жидкой смазочной среды, действует еще и температура, генерируемая в процессе трения. Температурный режим при трении композита с разным каркасом и в среде различных масел (Тп22-С и МС-2), несмотря на существенную разницу в их вязкости, различался всего на 1-3 °С. Это позволило получить общую температурную модель (17) трибосреды в следующем виде:

$$T = 61,486 \sigma^{0.228} V^{0.377}, \quad (17)$$

где σ — контактные напряжения, МПа; V — скорость скольжения, м/с.

График модели приведен на рис.10.

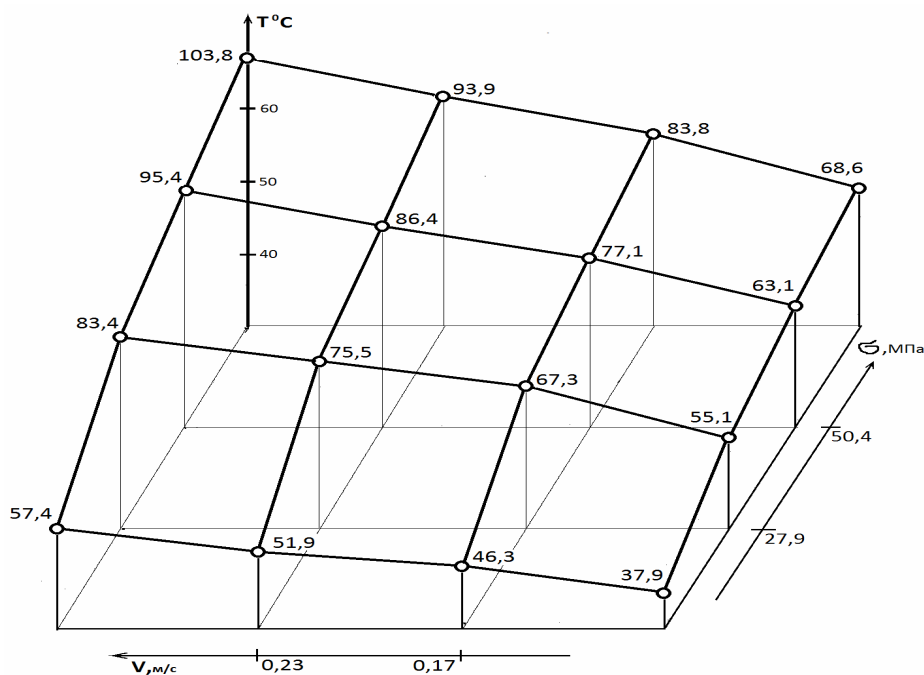


Рис. 10. Зависимость температуры от нагрузочно-скоростных режимов

Зависимость коэффициента трения от режимов нагружения, особенно в условиях нивелирования температуры жидкой средой, достаточно сложная. Напряжения понижают коэффициент трения в связи с увеличением контактной поверхности относительно низкомолекулярного покрытия.

Вклад спонтанно возникающих коротких периодов гидродинамики увеличивает размах значений коэффициента трения до 32 %. Используя принцип верхней оценки, для построения модели (рис.11) были усреднены коэффициенты трения, полученные только в условиях граничного трения и режима самосмазывания покрытия. Полученная модель имеет следующий вид:

$$f = 0,182 \sigma^{-0,483} V^{0,177} . \quad (18)$$

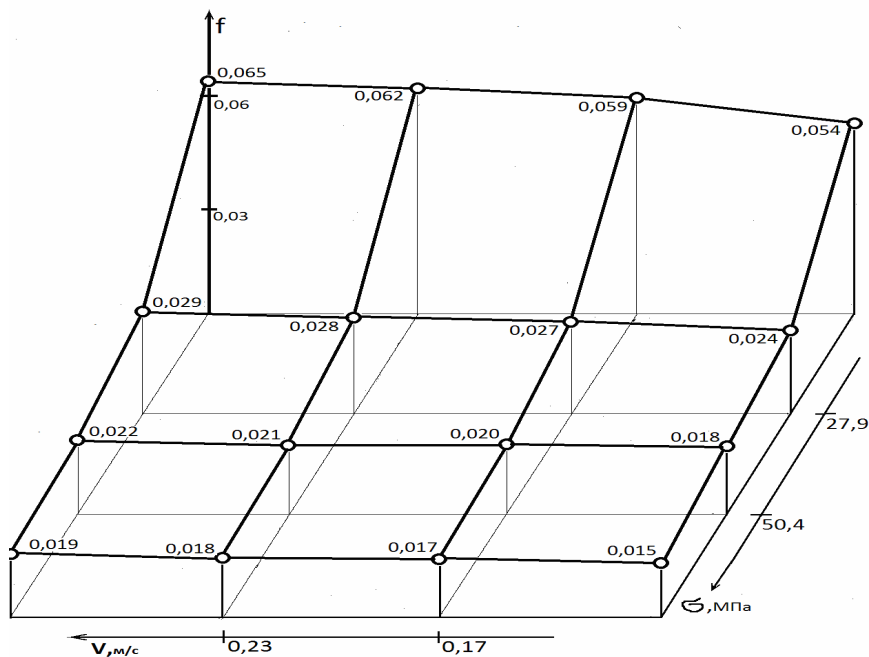


Рис.11. Влияние нагрузочно-скоростных режимов на коэффициент трения

Стандартным параметром, характеризующим износостойкость трибосопряжения, является интенсивность изнашивания. Модель влияния режимов трения на этот параметр в среде турбинного масла Тп22-С имеет следующий вид

$$I = 9,364 \cdot 10^{-2} \sigma^{1,244} V^{0,501} \ln \sigma^{-0,774} \quad (19)$$

и представлена на рис. 12.

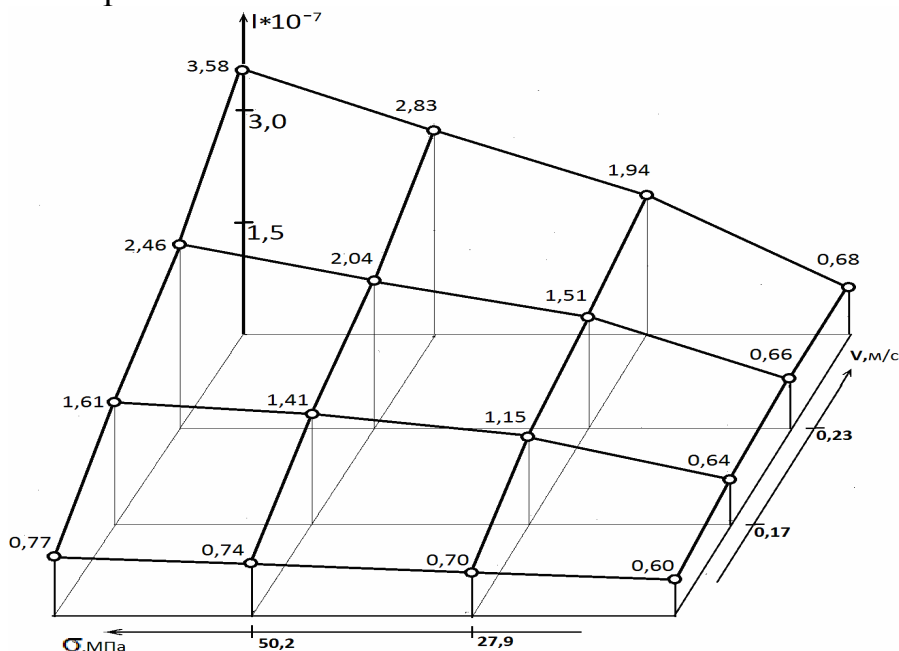


Рис. 12. Интенсивность изнашивания в среде турбинного масла Тп22-С

Далее было установлено влияние на ресурс трибосистем типа армирующего каркаса композита и материала контртел (Рис.13).

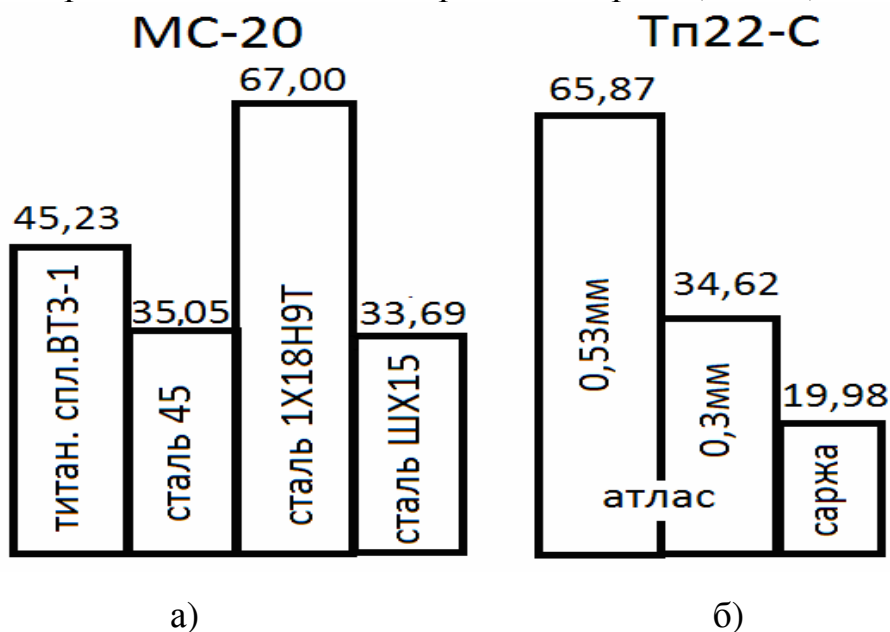


Рис. 13. Ресурс (10^4 цикл) металлополимерных трибосистем с контртелами из разных материалов а) и с разными антифрикционными покрытиями б) ($\sigma = 24,2$ МПа; $V = 0.2$ м/с)

Повышенные ресурсы для материалов с относительно низкой теплопроводностью (ВТЗ-1 и 1Х18Н9Т) можно объяснить тем, что они, не успевая нагреться, охлаждаются смазочной средой, а наиболее износостойким является композит на основе каркаса с наибольшим объемом фторопласта.

Все установленные закономерности были получены при граничном трении в результате самосмазывания фторопластом при незначительном вкладе гидродинамики, возникающей спонтанно на относительно короткие периоды. Для перехода к устойчивому гидродинамическому режиму в беззазорных конических радиально-упорных подшипниках необходимо было создать радиальный зазор. Этот зазор и автоматическое всплытие на гидродинамическом клине было обеспечено двумя осевыми оппозитно расположенными канавками в полимерном покрытии. Экспериментальные исследования подобных пар трения показали стабильные результаты в широком диапазоне нагрузок (Рис.14).

Полученный устойчивый гидродинамический режим характеризуется после 2-х минутной приработки колебаниями коэффициента трения в пределах 0,007 – 0,012 независимо от ступенчатого увеличения нагрузки в три раза до 72,6МПа. Причем, величина износа стабильна и не превышает 0,009мм, что является скорее всего не собственно износом, а суммой деформации ползучести и уменьшением толщины покрытия в результате отжатия из него масла. Температура смазочного материала находится в пределах 30 – 40⁰С.

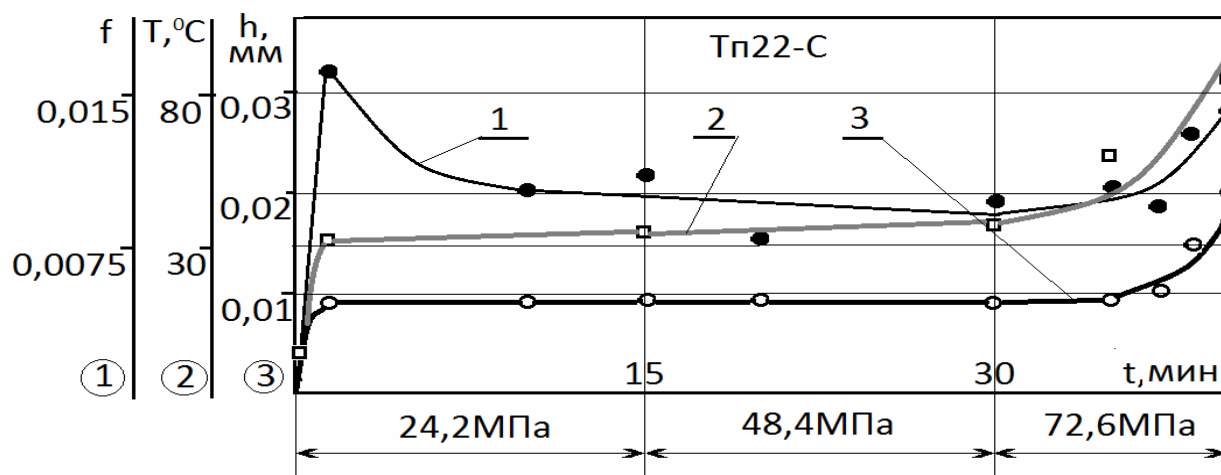


Рис.14. Гидродинамический режим трения подшипника (сталь 45 – покрытие на основе ткани атласного плетения, $V = 0,2 \text{ м/с}$)

Следует отметить, что момент ступенчатого нагружения трибосистемы сопровождался некоторой динамикой, вызывающей кратковременное повышение коэффициента трения. На 36-й минуте испытаний скорость скольжения была плавно повышена до 0,68 м/с, что вызвало повышение температуры и рост коэффициента трения до 0,012, т.е. режим гидродинамического трения нарушался. Это можно объяснить снижением вязкости смазочного материала.

Сравнение главных триботехнических характеристик исследованных металлополимерных трибосистем сведено в таблицу 4. Сравнение параметров, полученных при работе пар трения в гидродинамическом режиме, проводилось для одних и тех же трибосопряжений, работающих как в режиме самосмазывания в воздушной среде, так и при граничной смазке маслами МС-20 и Тп22-С.

Таблица 4. Эффективность металлополимерных трибосистем при гидродинамическом режиме смазывания

Среда	Режим смазывания при трении						Рост ресурса при гидродинамическом режиме в сравнении с	
	Граничный			Гидро-динамический				
	Ресурс R, 10 ⁻⁴ цикл.	Изно-со-стой-кость 10 ⁷	Класс	Ресурс R, 10 ⁻⁴ цикл.	Изно-со-стой-кость 10 ⁻⁸	Класс	граничным (масло)	самосма-зыванием (воздух)
Воздух	50,94	4,23	11	----	----	12	----	----
МС-20	35,05	2,91		214,6	1,78		в 6,12 раз	в 4,21раза
Тп22-С	65,87	5,47		332,7	2,76		в 5,05 раз	в 6,53раза

Таким образом, применение специальных безазорных радиально-упорных подшипников, с блокированием в нерабочее время, а также во время пусков и выбегов несущей полимерной поверхности от действия жидких смазочных материалов, дало возможность реализовать гидродинамический режим трения, что позволило повысить допустимую скорость трения и в несколько раз увеличило их ресурс, в сравнении с обычной эксплуатацией в режиме самосмазывания или граничного трения.

В пятой главе приводятся результаты сравнения теоретических и экспериментальных данных, а также результаты промышленных испытаний «полирежимных» радиально-упорных подшипников с полимерными фторопластсодержащими композиционными покрытиями, проводимые на Лопастном заводе ОАО «Роствертол» в редукторе привода движения заготовки лонжерона на станке для внутреннего ленточного шлифования. Ресурс экспериментальных подшипников увеличился на 25 – 27% по сравнению со штатными.

Заключение

По результатам исследований сформулированы следующие выводы.

1. В результате обобщения и анализа доступной технической информации выявлена последовательность кинетических этапов взаимодействия материала покрытий из фторопластсодержащих полимерных композитов с жидкими смазочными материалами: смачивание матричных участков поверхности, проникновение жидкости по капиллярам в тело композита, образование агрегатов в результате капиллярной конденсации и диффузии в матричное связующее и полиимидные волокна.

2. Основываясь на анализе результатов решения уравнения Навье – Стокса для установившегося течения тонкого слоя вязкой несжимаемой жидкости в поперечном сечении осевой канавки подшипниковой втулки, доказана принципиальная возможность использования пика гидродинамического давления для перехода подшипника от граничного к жидкостному трению.

3. Численно-аналитическое решение уравнения Рейнольдса для плоской осесимметричной задачи, а также построение и анализ трехмерной конечноразмерной модели течения вязкой несжимаемой жидкости подтвердили возможность прогнозируемых закономерностей и установили характер распределения гидродинамического давления в радиальном и осевом сечениях маслоподдерживающих канавок.

4. Результаты проведенных экспериментальных исследований адгезии антифрикционных покрытий на стальном и латунном субстрате позволили установить работоспособность покрытий и зависимость величины остаточной, после экспозиции в смазочной среде, адгезионной прочности от времени, вязкости жидкого смазочного материала и температуры.

5. Экспериментальные исследования вязкоупругих свойств полимерных покрытий позволили выявить эффект абсорбционного повышения их контактной жесткости в масляных средах, зависимость этого эффекта от вязкости среды, а также впервые определить предельную величину нагрузки (10 – 12,5 МПа), блокирующую этот эффект. Кроме того, установлена величина составляющей зазора трибосопряжения, определяемая величиной ползучести покрытия (в среднем 11 % при 5 МПа и 24 % при 70 МПа).

6. По результатам экспериментальных исследований получен комплекс регрессионных моделей, позволяющих оценить остаточную адгезионную прочность покрытий, их вязкоупругие характеристики и триботехнические параметры в условиях граничного трения при самосмазывании фторопластом.

7. На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований разработана конструкция беззазорного радиально-упорного подшипника скольжения, обеспечивающая его работу в режиме граничного трения и переход к устойчивому гидродинамическому режиму, что в 4,2....6,5 раз повышает ресурс подшипника в условиях повышения скорости в 3 раза.

8. Промышленные испытания разработанных радиально-упорных подшипников скольжения с композиционным полимерным фторопласт-содержащим покрытием и маслоподдерживающими канавками удовлетворительно прошли промышленные испытания на Лопастном заводе ОАО «Роствертол», обеспечив повышение ресурса трибоузла технологического оборудования на 34 – 36 %.

В качестве перспектив дальнейшей разработки темы представляется целесообразным расширить исследования для подшипников других конструкций, смазываемых синтетическими маслами, а также пластичными смазочными материалами.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в рецензируемых научных журналах и изданиях

1. Кохановский В.А. Фторопластсодержащие композиционные покрытия в смазочных средах. В.А. Кохановский, Э.А. Камерова // Трение и смазка в машинах и механизмах .- 2014.- №1. - С.34 – 37.(личное участие 60%).
2. Кохановский В.А. Вязкоупругие свойства полимерных покрытий в жидких смазочных средах. В.А. Кохановский, Э.А. Камерова // Трение и смазка в машинах и механизмах. - 2014.- №2.- С.44 – 48. (личное участие 45%).
3. Кохановский В.А. Трение полимерных покрытий в жидких смазочных средах. В.А. Кохановский, Э.А. Камерова // Трение и смазка в машинах и механизмах .- 2014.- №4.- С.17 – 20. (личное участие 40 %).

Прочие публикации

4. Камерова Э.А. Ползучесть антифрикционных полимерных покрытий. /Э.А. Камерова, И.В. Больших // Сборник трудов.12-й междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы синергетики в трибологии, трибоэлектрохимии, материаловедении и мехатронике». – Новочеркасск: ФГБОУ ВПО ЮРГТУ. 2013. С. 33-34. (личное участие 65 %)
5. Камерова Э.А. Методика исследования влияния жидких сред на фторопластсодержащие антифрикционные покрытия. /Э.А. Камерова, И.Б. Власенко, Н.Г. Снежина, П.А. Оганесян // Уральский научный вестник.- 2014.- №21 (100).- С.137 – 142. (личное участие 35 %).
6. Кохановский В.А. Фторопластсодержащие покрытия в условиях жидкостного смазывания. /В.А. Кохановский, Э.А. Камерова, М.Х. Сергеева // «Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения». Сб. статей 8-й между. науч.-практ. конф. «Интерагромаш-2015» - Ростов н/Д: - ФГБОУ ВПО ДГТУ. - 2015 .- С. 242-246. (личное участие 40%)
7. Камерова Э.А. Армирующий каркас антифрикционных покрытий. Э.А. Камерова // Сборник статей 8-й между. науч.-практ. конф. «Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения». «Интерагромаш-2015» – Ростов н/Д: ФГБОУ ВПО ДГТУ. - 2015 .- С. 285-287.
8. Патент на полезную модель. RU 162720 U1. МПК F16C17/10 F16C33/10. Подшипник радиально-упорный полирежимный. Кохановский В.А., Камерова Э.А., Феденко А.А., Рудиков Д.А. (РФ).- №2015154133/11.- Заявл.16.12.2015; Оpubл.27.06.2016.
9. Камерова Э.А. Влияние трибосистем на экологию. /Э.А. Камерова, А.В. Мухлаев // Сборник трудов всероссийской науч.-практ. конф. «Современные аспекты развития науки, образования и модернизации промышленности». Технические науки. – ФГБОУ ВО ДГТУ, 2016. С. 102. (личное участие 60%).
10. Мухлаев А.В. Адаптивный интерфейс компьютерных информационных систем. А.В. Мухлаев, Э.А. Камерова, // Сборник трудов всероссийской науч.-практ. конф. «Современные аспекты развития науки, образования и модернизации промышленности». Технические науки. – ФГБОУ ВО ДГТУ, 2016. С. 168.

Личный вклад соискателя

Основные положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. В перечисленных работах соискателем, статья [7] подготовлена единолично. В работах с соавторами личный вклад соискателя заключается в следующем: в работе [1] экспериментально исследована адгезия покрытий к субстратам разной природы; в работах [2;4] проведены эксперименты для установления величины вклада ползучести в формирование зазора трибосопряжения; в статьях [3;8] выполнены экспериментальные стендовые исследования триботехнических характеристик полимерных покрытий при разных режимах смазывания и нагружения; в работах [5;6] осуществлена адаптация методики к проводимым исследованиям и обоснована возможность перехода к гидродинамическому смазыванию; в работе [9] установлены экологические преимущества покрытий; в работе [10] выполнена отработка пользовательского элемента системы UIX.

КАМЕРОВА Эльвира Атласовна

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРИБОСИСТЕМ
В ЖИДКИХ СМАЗОЧНЫХ СРЕДАХ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 22.02.2017
Формат 60×84/16. Бумага офсетная.
Ризография. Усл. печ. л. 2,0.
Тираж 100 экз. Заказ № _____.

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС

Адрес университета: 344038, г. Ростов н/Д, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, д. 2.