

РОСЖЕЛДОР
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО РГУПС)

На правах рукописи

Нихотина Надежда Владимировна

ПРИМЕНЕНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ
ФТОРОПЛАСТСОДЕРЖАЩИХ ПОКРЫТИЙ
ПРИ ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ

2.5.3 - Трение и износ в машинах

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель -
доктор технических наук,
профессор
Кохановский В.А.

Ростов - на - Дону

2023 г.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	10
1.1 Антифрикционные полимерные композиты и область их применения.....	11
1.2. Состав и композиционная структура покрытий	15
1.3 Механизм изнашивания ПТФЭ.....	18
1.4 Влияние коэффициента взаимного перекрытия	24
1.5 Цель и задачи исследований	32
2 УСЛОВИЯ КОНТАКТИРОВАНИЯ.....	34
2.1 Поверхность контакта.....	34
2.2 Распределение контактных давлений	41
2.3 Температура покрытия	46
2.4 Выводы	56
3. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ	57
3.1 Общая структура исследований.....	57
3.2. Экспериментальное оборудование и приборы.....	60
3.3. Экспериментальные образцы.....	65
3.4. Планирование исследований и обработка результатов.....	70
4. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРИБОСИСТЕМ.....	74
4.1 Конструкция металлополимерных трибосистем	74
4.2. Прирабочные параметры	82
4.3. Работа трибосистемы в стационарном периоде.....	92
4.4. Выводы	103
5. ИТОГОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ	105

5.1 Верификация теоретических результатов	105
5.2 Промышленные испытания.....	108
5.3 Выводы	110
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	112
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	114
ПРИЛОЖЕНИЕ А	132

ВВЕДЕНИЕ

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;
- изменением распределения генерируемого при трении теплового потока между деталями трибосистемы;
- направлением следа механической обработки перпендикулярно вектору скорости.

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

Таким образом, исследования, посвященные применению высокоэффективных полимерных композиционных покрытий в условиях возвратно-поступательного движения, являются актуальными и перспективными.

Степень разработанности темы. Проблема трения металлополимерных трибосистем с фторопластсодержащим покрытием включает исследования как зарубежных ученых В.Ж. Briscoe, W.D. Craig, D.C. Evans, J.K. Lancaster 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 ($K_{ВЗ} = 1$). Работа металлополимерных фторопластсодержащих трибосистем при возвратно-поступательном движении ($K_{ВЗ} < 1$) исследуется в данной работе.

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 исследования является расширение области применения высокоэффективных полимерных композиционных антифрикционных покрытий в трибосистемах 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 – связи 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. Построены области рациональных нагрузочно-скоростных режимов эксплуатации металлополимерных фторопластсодержащих трибосистем с композиционным покрытием на основе тканого каркаса как в приработочном, так и в стационарном режиме трения при коэффициенте взаимного перекрытия от 0,167 до 0,476.

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

Значимость теоретических исследований включает

1. На основе исследования вязкоупругой деформации и геометрических соотношений при нагружении трибосистем с полимерным антифрикционным покрытием, полученное выражение, определяющее зависимость величины

контактного угла (дуги) от монтажного зазора трибосопряжения и вязкоупругой деформации покрытия.

2. Полученные 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 трибосистемы

3. Предложенную 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 позволили 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, позволяющих выполнять проектные и оценочные расчеты (температуры, ресурса и др. параметры) в 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.

Положения, выносимые на защиту

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

2. Определение величины контактной дуги (угла) в металлополимерной трибосистеме с антифрикционным композиционными полимерными покрытиями и распределения 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 локомотиво-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» (Ростов-на-Дону, 2018 г., 2020 г.)

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.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Узлы трения современных машин работают при постоянно ужесточающихся условиях эксплуатации. Это характеризуется, в первую очередь, нагрузочно-скоростными режимами, а также температурой и агрессивностью окружающей среды [1,2,3,4,5].

Определенного прогресса в повышении несущей способности и эксплуатационных характеристик узлов трения современное машиностроение достигло в результате применения металлополимерных трибосистем с покрытиями из антифрикционных полимерных фторопластсодержащих композитов. Эти материалы обладают более низким в сравнении с традиционными металлами коэффициентом трения и значительной несущей способностью [6,7,8,9], что позволяет их использовать в самых разных трибосистемах.

Узлы трения, работающие в условиях возвратно-поступательного движения, которым посвящена данная работа, встречаются в технике достаточно часто. Примерами таких трибосистем могут считаться ползунные, кулисные пары, плунжерные прецизионные узлы, грундбоксы, направляющие скольжения станков, прессов и другого оборудования.

Условия трения скольжения при возвратно-поступательном движении имеют целый ряд особенностей, реализующихся в контактной зоне трибосопряжений. В кинематическом плане – это нестационарное периодическое движение при переменной скорости скольжения и обязательной остановки в конце прямого и обратного полуходов. В динамическом плане – это сложная (радиальная и осевая) рабочая нагрузка в условиях коэффициента взаимного перекрытия значительно меньше единицы.

Для рассматриваемых покрытий основным является самосмазывание фторопластом в режиме граничного трения. Однако в доступной литературе отсутствует информация о рациональных нагрузочно-скоростных режимах и триботехнических параметрах узлов трения в условиях поступательного движения.

Таким образом, известно, что полимерные композиты антифрикционного назначения и покрытия на их основе являются высокоэффективными материалами,

в связи с чем расширение области их применения, особенно при возвратно-поступательном движении, представляется важной и актуальной задачей современного машиностроения.

1.1 Антифрикционные полимерные композиты и область их применения

Трение, изнашивание и сопровождающие их процессы в самых разных трибосистемах, в том числе и металлополимерных, сосредоточены в зоне фрикционного контакта, т.е. в поверхностных слоях, контактирующих тел. Это обосновывает целесообразность и эффективность применения антифрикционных покрытий [10, 11].

Композиционные фторопластсодержащие полимерные покрытия, благодаря уникальным свойствам фторопласта, имеют целый ряд преимуществ. Высокая податливость покрытий под действием рабочих нагрузок приводит к увеличению фактической площади контактной поверхности, что пропорционально снижает величину реальных контактных напряжений и существенно повышает несущую способность трибосистем [6,12,13]. Кроме того, фторопластсодержащие антифрикционные композиты обладают эффектом самосмазывания, вызываемым переносом и адгезионным закреплением тонких пленок фторопласта на ответной детали [14]. Это снижает, а в ряде случаев полностью исключает, эксплуатационное обслуживание [15,16,17,18].

Достаточно высокая износостойкость рассматриваемых материалов в условиях абразивного изнашивания объясняется тем, что абразивные частицы могут до определенного предела обволакиваться и поглощаться слоем фторопласта без заметного снижения износостойкости и ресурса узла трения [19,20]. Это обеспечивает полимерным фторопластсодержащим антифрикционным материалам дополнительные преимущества.

Следует также отметить, что высокая стойкость фторопласта к действию агрессивных жидких и газообразных сред значительно расширяет область применения рассматриваемых покрытий [21,22,23]. Кроме того, малая его толщина

и вязкоупругость позволяют пренебрегать разницей в величинах коэффициента термического расширения на адгезионном стыке пластика и металла [24,19].

С другой стороны, низкие теплофизические свойства композиционного покрытия и малая величина теплоты кинетических переходов в полимерах увеличивают температурную чувствительность покрытия, ограничивая область его рационального применения.

Анализ патентной и специальной технической литературы показывает, что благодаря антифрикционным свойствам в значительном диапазоне режимов нагружения материалы, представляющие собой полимерные самосмазывающиеся композиты используют в виде антифрикционных покрытий деталей трибосистем в различных машинах и агрегатах [25,26,27,28,29]. Эти материалы обеспечивают следующие конструктивные и эксплуатационные преимущества [27,31,32,33,34]:

- термостойкости до 250° С;
- высокую нагрузочную способность (до 250МПа);
- высокие ресурсы трибосистем (до 10⁹ циклов);
- демпфирующую способность;
- снижение габаритов и веса узлов трения;
- сокращение и, в ряде случаев, отсутствие в необходимости технического обслуживания.

Покрытия, благодаря своим свойствам, широко применяются в авиационной [31, 35] и космической [27] технике. На материале подобном рассматриваемы покрытием установлена шарнирная опора управляющего ракетного двигателя [36]. Кроме того, эти материалы нашли применение в шаровых опорах целой серии легковых автомобилей «Fiat», «Dino» [8,37] и шарнирах рулевых тяг [35]. Самосмазывающееся покрытие шаровых опор отечественных Жигулей также имеют подобные покрытия. В текстильных машинах [38,39], известное использование в гонке ткацкого станка [40]. В машинах пищевых производств, в которых недопустимы смазочные материалы, также используют полимерные покрытия [26].

Подобные композиционные покрытия нашли применения в транспортном и подъемно-транспортном машиностроении [25], например, в вариаторах [41].

Наиболее широкое и эффективное использование покрытий имеет место в изделиях массового производства: в металлических свертных втулках покрытия [42], в плоских накладках с покрытием в виде направляющих [43,44,45], стандартных подшипниках скольжения различного типа [27, 30, 31, 35,38, 46,47,48], например, шарнирных (Рисунок 1.1) [49].



Рисунок 1.1 – Шарнирные подшипники серии ШЛТ

Шарнирные подшипники, имея антифрикционное композиционное покрытие наносится на поверхности внутренней сферы наружного кольца и работает при самосмазывании фторопластом. Такие подшипники выпускает нашей страны (ГПЗ №3), а также значительное число зарубежных фирм (ADR, HUNGER, INA ELGES, SKF, LEAR SIEGLER и др.) [27,28,31,35,38].

Опыт применения шарнирных подшипников с рассматриваемым антифрикционным покрытием показывает, что они выдерживают статические нагрузки до 560 МПа и кратковременные температурные - до 300°C [50,51]. Они не нуждаются в смазке, хорошо выдерживают низкие и высокие температуры, не подвержены коррозии и фреттинг-процессам.

В работе [52] описана конструкция (Рисунок 1.2) торцевого уплотнения с плавающим кольцом 3 и двухсторонним композиционным фторопластсодержащим покрытием с эластомерной матрицей. Кольцо 3 сжато между рабочими радиусными выступами крышки 1 и гайки 4. Описанная металлополимерная пара

обеспечивает надежную герметизацию опор пинолей гидрокопировальных станков. Подобная трибосистема с антифрикционным покрытием имеет коэффициент взаимного перекрытия близкий к единице.

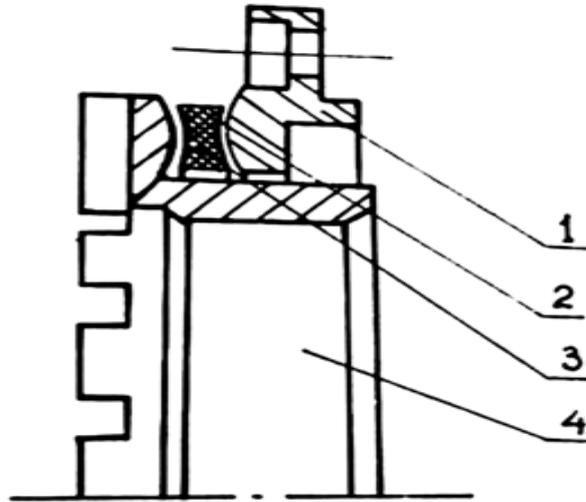


Рисунок 1.2 – Торцевое уплотнение задней бабки токарно-копировального станка

На кривошипном прессе бронзовые направляющие заменены стальными планками с фторопластсодержащим покрытием при коэффициенте взаимного перекрытия менее 1 [52]. Схема расположения направляющих приведена на рисунке 1.3 где обозначено: 1 - планка, 2 - покрытие, 3 - ползун, 4 - клиновой регулятор.

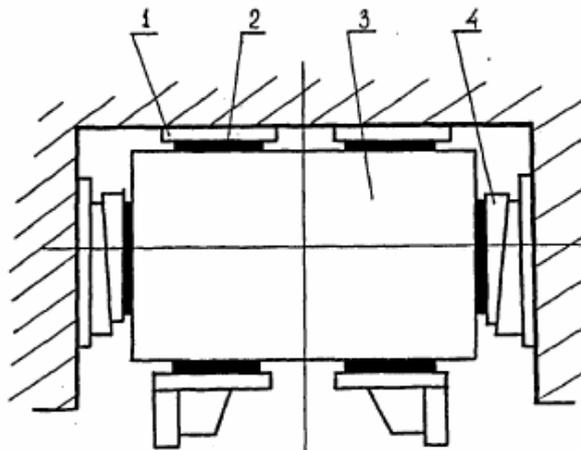


Рисунок 1.3 – Схема направляющих с антифрикционным покрытием

Таким образом, имеющийся опыт использования антифрикционных покрытий рассматриваемого класса обеспечивает высокие ресурсы,

определяющие эффективность их применения в самых разных трибосистемах, как в зарубежной, так и в отечественной технике.

1.2 Состав и композиционная структура покрытий

Антифрикционное назначение покрытий обеспечивается применением в качестве функционального компонента фторопластовых нитей марки «полифен» [35,53]. Фторопласт или политетрафторэтилен (ПТФЭ) [54], из которого они выполнены, в сравнении с другими антифрикционными материалами имеет безусловные преимущества. Например, коэффициенты трения покоя и движения при малых скоростях близки по значениям, что обеспечивает плавность и равномерность медленных перемещений в направляющих скольжения при коэффициенте перекрытия менее единицы.

Однако прочностные характеристики фторопластовых волокон, из которого производятся нити, довольно низки [55,56]. Кроме того, практически полное отсутствие адгезионной способности к полимерным связующим, являясь положительной с точки зрения трения, одновременно представляет собой серьезный недостаток с технологических и конструктивных позиций, так как значительно усложняет технологию закрепления фторопластовых нитей на субстрате с помощью адгезивов [56,57].

Чтобы компенсировать низкую прочность и адгезионную прочность фторопласта, в композиционную структуру вводятся более прочные нити из других полимеров с высокой адгезией к матричному связующему. Скрепление нитей с разными функциями выполняется на основе ткацких переплетений [58,59] или трикотажных петель [60,61], т.е. механически.

Так как рассматриваемый класс антифрикционных композитов включает несколько полимерных материалов разной химической природы, то данные композиты являются гибридными.

В качестве прочных нитей тканой армирующей составляющей в аналогичных антифрикционных материалах выпускаемых в зарубежном производстве используют нити из полиамидных, полиэфирных, поливинилспиртовых и других

синтетических волокон, природных волокон хлопка, вискоза, а также стекла, из медной или из нержавеющей стали тонкой проволоки [34,62,63,64]. В России используют хлопчатобумажные нити (шаровые опоры, передней подвески Жигулей), а для авиакосмической техники – полиимидные нити («аримид-Т») [28,58,59,62], обеспечивающих равную теплостойкость композита.

Композиты на основе полиимидных и фторопластовых нитей применяются в виде лент, тканей [58,59], трикотажа [51,53] и войлоков (матов) [65]. Маты – наименее износостойкие, но наиболее дешевые. Трикотаж удобен для нанесения покрытий на криволинейные поверхности из-за вытягиваемости, но менее износостоек, чем ткань.

Ткани являются наиболее износостойкими в связи с совпадением направления нитей фторопласта в композите с вектором скорости [66], т.к. поперечный модуль волокон почти в 3 раза меньше продольного [67]. Следует отметить, что каркас композита, выполненный из ткани, не может быть использован для облицовки фасонных нелинейчатых поверхностей из-за плохой вытягиваемости.

Кроме тканей каркасом антифрикционных покрытий может служить, основовязанный или кулирный трикотаж. Трикотаж имеет более рыхлую структуру, хорошо вытягивается и применим в качестве покрытий фасонных деталей. Он экономичнее тканей, а машина для его производства производительнее ткацких и требует на 20% меньше сырья [60,68]. Однако жесткость, композита на основе трикотажа значительно меньше, чем композиты на основе ткани.

Для изготовления композита в качестве матричного связующего [46,50,69,70] может быть использован целый ряд полимерных смол: фенольные, полиимидные, эпоксидные, полиэфирные и так далее. В рассматриваемом классе композитов связующие, независимо от химической природы, должны удовлетворять общим требованиям. К ним относится высокая химическая стойкость, клеящая способность (адгезия), теплостойкость и экономичность [51,71,72]. Такие эксплуатационные параметры матрицы композита, как прочность,

теплопроводность и теплоемкость выбирается в зависимости от эксплуатационных условий и меняются в широких пределах.

Фенолоформальдегидные смолы [70], модифицированные каучуком [51], являются одними из наиболее экономичных. Их чаще всего используют для антифрикционных композитов, применяемых в нашей стране. Фенольные смолы (300°C) обеспечивают равную теплостойкость для всего композита. Это включает 327°C – температура плавления кристаллитов фторопласта, 350° С – термостабильность арамида-Т [59,73,74].

Функция матричного связующего является: объединение составляющих компонентов в единый композит; закрепляет наносимое покрытие на субстрате; распределяет действующее на композит усилие между прочными нитями армирующего каркаса; изолирует композиционный материал от воздействия внешних агрессивных сред.

Структура фенольной матрицы, модифицированной термостойким каучуком, является аморфной по всему сечению композита. Она представляет собой после сшивки (поликонденсации) совокупность двух взаимопроникающих пространственных сеток.

В исходном состоянии матричное связующее – это маловязкий раствор полимеров в смеси этилацетата и ацетона. Наиболее технологичным является приготовление промежуточного материала покрытия препрега [72,75]. Это пропитанная исходным связующим и высушенная от растворителей, но не отвержденная, армирующая тканая компонента композита [72,76,77].

После кройки по облицовываемой покрытием поверхности [78], препрег закрепляется на рабочих поверхностях трибосистемы. Затем вместе с фиксирующим приспособлением помещается в термошкаф, где матричное связующее отверждается и одновременно приклеивает покрытия к рабочей поверхности детали [72,79]. Таким образом, технологическая операция закрепления препрега на субстрате и превращение его в композит в результате сшивки выполняется одновременно.

Для полного завершения реакции отверждения связующего в препреге и на контакте его с субстратом необходимо соблюдать требуемые для применяемого

адгезива режимы: температуру и нагрузку отверждения, а также продолжительность выдержки в термошкафу.

Используемое в нашей стране фенольное связующее марки АФК-101 отверждается при нормальных напряжениях сжатия 1 – 4 МПа, температуре $200 \pm 5^\circ\text{C}$ и времени 3 часа.

При ограниченном доступе кислорода и при низких температурах препрег может храниться довольно долго (до 12 месяцев). Для массового производства деталей с покрытиями при изготовлении препрега, его пропитка связующим выполняется на специальных пропиточных машинах. Ткань пропитывается связующим веществом, отжимается и для удаления растворителя сушится [72,79]. Препрег является исходным материалом для производства покрытий и производится по техническим условиям по ПТТ-75, ПТТ-40 и ПТТ-65.

Следует отметить, что наружный слой покрытия, образован фторопластовыми нитями у которых отсутствует адгезия к матричному связующему. В связи с этим поверхностный слой легко деформируется при сжатии малыми нагрузками, что подтверждается кривой напряжения – деформации [9].

Фиксирование покрытия на рабочих плоских или фасонных поверхностях требует разработки специальных приспособлений, обеспечивающих формирование покрытия требуемой толщины.

Следовательно, структура полимерного композиционного покрытия и уровень выполнения им смазочных функций устанавливается составом и технологией отверждения матричного связующего как по сечению покрытия, так и в адгезионном шве покрытие – субстрат.

1.3 Механизм изнашивания ПТФЭ

Установлено, что фторопласт как в блоке, так и в составе покрытия обладает одним и тем же антифрикционными свойствами [6,14,80]. Высокоориентированные волокна макромолекулы фторопласта толщиной 10...40 нм, разделены аморфными областями толщиной до 1 нм [17,19,80].

Подвергаясь в контактной зоне нагрузке высокоориентированные блоки, под

действием сил трения легко скользят по аморфным участкам при минимальных напряжениях сдвига [6,19,81,82].

В целом ряде работ [64,83,84], описывающих классификацию изнашивания полимерных материалов [6], отмечается, что преобладающим механизмом изнашивания фторопласта, является адгезионный перенос фрагментов на металлическое тело. Таким образом, фторопласт изнашивается по адгезионному механизму и составляет фрикционный перенос [6,10,14].

У рассматриваемых полимерных композиционных покрытий поверхность включает фторопластовые волокна «полифен» с незначительным количеством прочных волокон и полимерной матрицы. В самом начале процесса происходит достаточно быстрое разрушение и удаление продуктов износа относительно хрупкой фенольной смолы с поверхности покрытия [14] под действием усталостного изнашивания [6,24]. Ряд крупных фрагментов матрицы выносятся из зоны трения, другие, более мелкие частицы, обволакиваются фторопластом, а некоторые переносятся на контртело [19,20].

Продолжающийся подвод фрикционной энергии приводит к аморфизации поверхности ПТФЭ. Это вызвано интенсивной деформацией трибоконтакта под действием рабочих нагрузок [6,85]. Вытягивание волокон вдоль действия сил трения формирует текстурирование фторопласта на поверхности (фибрилизация) и сопровождается аморфизацией [6,86,87,88]. Замедление этого процесса вызывается необходимостью разрушения оболочки матричного материала в которую включены волокна фторопласта. При этом ориентация препрега верхним фторопластовым утком в направлении скорости скольжения при крое и нанесения покрытия упрощают текстурирование. Деформация и ее следствие аморфизация политетрафторэтилена генерирует поверхностные дефекты [6,89]. Они в виде межфибрильных микротрещин сосредоточены на границах кристаллических образований [90,91]. Ускорение разрушения полимерных материалов вызывается приложением знакопеременных сил, что характерно для возвратно-поступательного движения [24,92]. Когезионное отделение частиц полимеров приводит к образованию поверхностной текстуры. Дальнейшее действие

фрикционных сил интенсифицирует отделение чешуеподобных частиц износа [6,85]. Затем наступает когезионное разрушение в виде полного отделения этих чешуек [90] и их переноса на контртело.

Низкая адгезия фторопласта приводит к тому, что его пленка переноса состоит из отдельных фрагментов [14], а изнашивание определяется частицами, выносимыми из контактной зоны [6,18,85]. Третье тело, состоящее из продуктов износа и деструкции фторопласта, является эффективным смазочным материалом. Описанные в работе [93] результаты экспериментальных исследований подтверждают, что при натирании поверхности металлического контртела фторопластом или использования зоны неподвижной подшипниковой втулки, испытывавший перенос фторопласта на свою поверхность, ресурс подшипников увеличивается на 10...25% [94].

Следует отметить, перенесенный материал – это полимер, подвергнутый механической и термоокислительной деструкции при трении [95]. Результаты исследований этих продуктов на масс-спектрометре [6] показали, что в перенесенном фторопласте нет пиков с массовым числом более 100. Это говорит о температурной и механоокислительной деструкции макромолекул фторопласта.

Влияние механодеструкции фторопласта, значительно усиливается температурным воздействием (термомеханическая деструкция), а также аморфным кислородом (термоокислительная) [6,18,93,96]. В результате деструкции в полимере возникают макрорадикалы [6,88]. Они могут рекомбинировать, соединяясь друг с другом, и реагировать с контактной поверхностью [6,17,18,95], адсорбируясь на контртеле.

Имеющиеся в пленке переноса фторопластовые ионы фтора [14], являются продуктами его деструкции сопровождающей его перенос. Этот процесс дополнительного подтверждается уменьшением износостойкости фторопластовой пленки переноса в морской воде на 67...75%, в связи с вымыванием ее частиц [83]. Эти же данные о поведении фторопласта в водной среде приведены в работе [17].

Деструктивные процессы, проходящие с фторопластом, влияют на адгезионное контактирование в двух параллельно идущих аспектах. Образование

макрорадикалов ускоряет деструкцию, а возникновение низкомолекулярных фрагментов затрудняет его [6].

Следовательно, изнашивания характеризуется межатомными химическими процессами, а процесс трения-разрушением межмолекулярных связей.

Поскольку фрикционный перенос имеет место у всех полимеров, в пленке переноса наряду с фторопластовыми отмечены распределения фенольных частиц [14,95,97]. Фенольные частицы покрыты пленкой из 2...3 нм фторопласта [14].

Считается, что при приработке металлополимерных трибосистем изнашивание сосредоточено в полимере и завершается при заполнении впадин между шероховатостью контртел фрагментами переноса фторопласта [14,91], то есть выглаживаются контактные поверхности.

Исследователями [98] доказано, что в кристаллической структуре полимеров из-за генерируемой высокой температуры трения возникают местные зоны плавления. Поскольку исследуемые композиты предназначены для высоких нагрузок, то это предоставляется возможным.

Процесс стационарного трения реализуется при динамическом равновесии образованием и разрушением пленки переноса [14,17,18]. Участки нестабильного колебательного процесса трения могут быть связаны с периодической адсорбцией и десорбцией пленки переноса [80].

Периодический вынос частиц пленки переноса из зоны трения снижает количество фторопласта в покрытии и обнажает матрицу прочными нитями. Это период катастрофического изнашивания. Значительно повышается температура, коэффициент трения и обнажается металлический субстрат. При этом растет вклад сопутствующего усталостного изнашивания и поступает разрушение у полиимидных волокон из жесткоцепных полимеров.

Низкие теплофизические характеристики полимерных материалов является значительным эксплуатационным ограничением их применимости. Наиболее остро это влияет на термопластичный политетрафторэтилен, деструкция которого наступает до температуры плавления. При трении основная часть механической

работы трансформируется в теплоту, которая сосредотачивается в материале с наибольшей теплоемкостью и наименьшей теплопроводностью.

Преимуществом металлополимерных трибосистем является увеличение площади фактического контакта в связи с низкой жесткостью полимеров. К недостаткам нужно отнести низкую теплостойкость и теплопроводность (на 2 порядка меньше, чем у металлов). Особенностью металлополимерных трибосистем является высокая генерация тепла и низкой его отвод из контактной зоны.

Следует отметить также, что при эксплуатации металлополимерных трибосистем полимеры могут находиться в твердом и вынужденном высокоэластичном состоянии [99,100]. Причем, переход из стеклообразного (твердого) агрегатного состояния в высокоэластичное определяется температурой кинетического перехода, которая зависит от комплексного воздействия температуры и нагрузки. Так, чем выше нагрузка, тем ниже эта температура, т.е. значительная нагрузка вынуждает полимер перейти в состояние вынужденной эластичности при гораздо более низкой температуре.

Изложенное определяет границу применения исследуемых фторопластсодержащих покрытий, в виде предела прочности, предела вынужденной высокоэластичности и суммарного воздействия этих факторов.

Переход фторопласта высокоэластичное агрегатное состояние существенно изменяет процессы трения и изнашивания, как правило, ухудшая прочность и износостойкость полимера. При этом резко снижается модуль и, следовательно, жесткость полимерного материала, что вызывает увеличение зазора трибосопряжения.

На рисунке 1.4 представлена зависимость триботехнических свойств узла трения от температурной нагрузки [15].

Первоначально температура влияет на физико-механические свойства трибоматериалов, которые изменяют физико-химические условия контактирования. Последнее, в свою очередь, изменяют физико-механические условия контактирования, а те тип трения и параметры изнашивания.

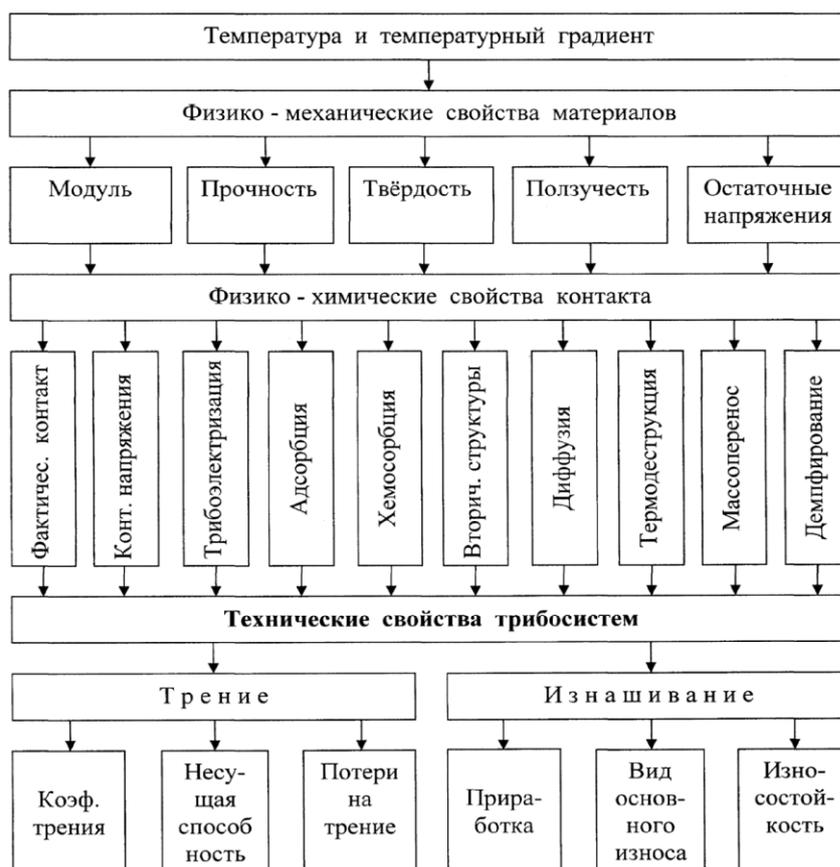


Рисунок 1.4 – Схема влияния температурных параметров на технические свойства трибосистем

Наиболее нежелательным результатом низких теплофизических свойств полимеров является образование температурных градиентов. Это может быть связано с повышенным износом в результате приработочных процессов и превышением температуры, а также высоким коэффициентом трения, чем в стационарный период, на 5-10°C [13,101,102].

Адгезионная прочность клеевого шва в значительной степени зависит от различия коэффициентов термического расширения покрытия и субстрата или различие их деформационных свойств. В нашем случае, покрытие обладает податливостью. Однако следует иметь введу, что работоспособность антифрикционных покрытий в значительной степени зависит от целостности клеевого шва. Это может быть вызвано как различным терморасширением, так и разницей в деформационных свойствах.

Температура, генерируемая при трении, вносит дополнительный существенный вклад в процесс механоокислительной деструкции, что сказывается на снижении ресурса полимерных покрытий. отрицательно сказывается на полимерном покрытии.

Значительной компенсацией неизбежного отрицательного влияния повышения температуры и вязкоупругой деформации покрытия может являться уменьшение его толщины. Однако это одновременно уменьшает объем фторопласта - смазочного материала контактной зоны трибосистемы. Решение этого вопроса лежит в области дальнейших экспериментальных исследований.

1.4 Влияние коэффициента взаимного перекрытия

Одной из наиболее важных конструктивных характеристик металлополимерных трибосистем, влияющих непосредственно на тепловые процессы в зоне трения, является коэффициент взаимного перекрытия $K_{ВЗ}$ [103,104, 105, 106]. Он введен в науку о трении и изнашивании А.В. Чичинадзе при исследованиях тяжело нагруженных пар трения.

Для подшипников его величина близка единице [15], а для трибосистем другой конструкции, например, ползун – направляющая, она может значительно уменьшаться. В рассматриваемых типах узлов трения с возвратно-поступательным движением коэффициент взаимного перекрытия практически всегда меньше единицы, т.к. у контактирующих элементов всегда разная площадь контакта (Рисунок 1.5).

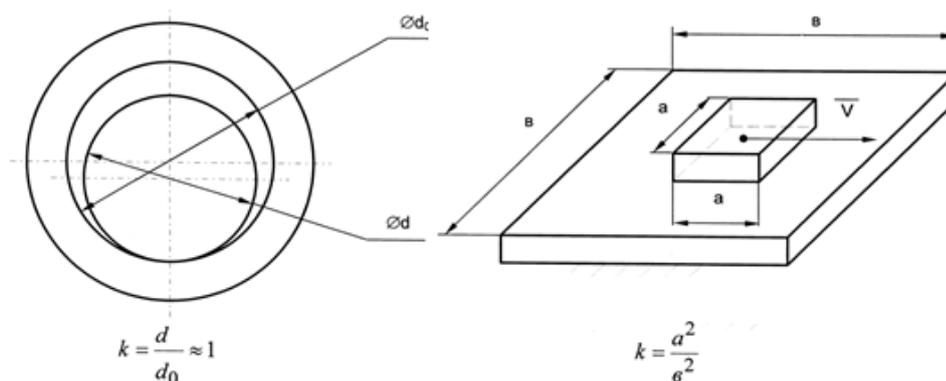


Рисунок 1.5 – Схема расчёта коэффициента перекрытия

Величина коэффициента взаимного перекрытия $K_{ВЗ}$ определяется, как отношение номинальных контактных площадей двух элементов трибосистемы: наименьшей номинальной площади первой детали к наибольшей площади второй.

Экспериментальными исследованиями, приведенными в лаборатории трения и фрикционных материалов ИМАШ АН СССР, было установлено, что при оценке свойств исследуемых материалов этот параметр влияет на условия теплотдачи [107].

До решения вопроса о распределении тепловых потоков в трибосистеме необходимо учитывать в расчетах величину коэффициента взаимного перекрытия $K_{ВЗ}$. При близости $K_{ВЗ}$ единице, в работах Шаррона [108, 109, 110] предлагается определять коэффициент распределения тепловых потоков по формуле, в которой индекс 1 относится к первому телу:

$$1 - \alpha_m = \frac{\sqrt{\lambda_1 C_1 \gamma_1}}{\sqrt{\lambda_1 C_1 \gamma_1} + \sqrt{\lambda_2 C_2 \gamma_2}}, \quad (1.1)$$

где λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности;

C_1, C_2 – теплоемкость;

γ_1, γ_2 – плотность.

Чичинадзе А.В. разработал и применял коэффициент взаимного перекрытия, для описания фрикционных тормозных трибосистем. Однако этот параметр оказывает сильное влияние, и на антифрикционные трибосистемы.

В работе [111,112] установлено, что при увеличении коэффициента взаимного перекрытия, увеличивается температура и соответственно интенсивность изнашивания.

Результаты экспериментов, проведенных Логиновым А.Р. [113] показали, что коэффициент взаимного перекрытия практически не оказывает влияния на износ ненаполненного ПТФЭ по стали марки 2Х13, так как на поверхностях стального контртела наблюдался тонкий слой перенесенного на него фторопласта. При этих исследованиях коэффициент взаимного перекрытия изменяли в пределах от 0,01 до 0,3 (торцевая схема, диск - 3 пальца, вал - втулка).

Следует отметить, что ненаполненный фторопласт практически не применяется в нагруженных узлах трения из-за его низкой износостойкости и значительной вязкоупругой деформации даже при нормальной температуре (холодная текучесть). Рассматриваемые композиционные покрытия могут иметь на рабочей поверхности от 25 до 100% фторопласта.

Поскольку рост температуры в металлополимерных трибосистемах влияет не только на свойства полимера (агрегатное состояние, прочность, деформацию) [6,57,73], но и на характеристики трибоконтакта (контактный угол, нормальные давления) [88,114], то важность его определения и учета не вызывает сомнений. Однако данные о влиянии этого коэффициента на параметры работы металлополимерных трибосистем в литературе практически отсутствуют. Это обстоятельство делает актуальными дополнительные исследования влияния коэффициента взаимного перекрытия на работу трибосистем с фторопластсодержащими композиционными покрытиями.

Качественная картина влияния коэффициента взаимного перекрытия на ряд характеристик работы трибосистемы приведена на рисунке 1.6 [115]



Рисунок 1.6 – Схема влияния коэффициента взаимного перекрытия $K_{вз}$ на коэффициент трения f , интенсивность изнашивания I и температуру T

В работе [116] приведены результаты исследований влияния коэффициента взаимного перекрытия на работу упорных подшипников скольжения без смазочного материала. При этом установлено, что уменьшение коэффициента перекрытия приводит к снижению ресурса подшипника. Вместе с тем механизм износостойкости полимера в металлополимерной паре не установлен, так как он зависит от целого ряда факторов: преобладания в контакте отрицательного влияния

краевого эффекта, положительного влияния скопления продуктов изнашивания или поверхностной окисной пленки.

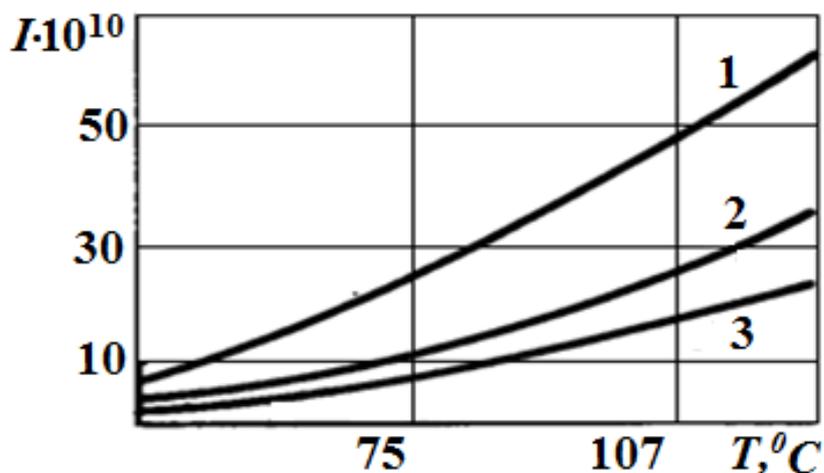


Рисунок 1.7 – Зависимость интенсивности изнашивания упорного подшипника от температуры и коэффициента взаимного перекрытия (1 – Квз= 0,5; 2 – Квз= 0,75; 3 – Квз= 1,0)

Анализ зависимостей на рисунке 1.7 показывает, что при коэффициенте взаимного перекрытия равном 0,5 интенсивность изнашивания возрастает в три раза интенсивнее, чем при коэффициенте равном 1 при аналогичных температурах показателях.

Коэффициент взаимного перекрытия влияет на количество продуктов износа в зоне трения. При установившемся режиме трения (большая поверхность имеет пазы) авторы [117] рассчитали количество частиц продуктов износа, находящихся в зоне трения между соседними пазами как

$$G = c_1 \cdot I_h \cdot l^2 \quad (1.2)$$

где c_1 — коэффициент пропорциональности,

I_h - интенсивность изнашивания

l – расстояние между пазами

Средняя масса частиц износа, приходящаяся на единицу площади равна

$$q = c_1 \cdot I_h \cdot l \quad (1.3)$$

и пропорциональна расстоянию между пазами. С увеличением этого расстояния (уменьшение коэффициента взаимного перекрытия) количество продуктов износа на единицу площади увеличивается.

Исследования показали, что коэффициент взаимного перекрытия влияет на распределение тепловых потоков в трибосистеме, действуя и на теплофизические характеристики применяемых материалов.

В статье [118] исследовали два образца кольцевого сечения, при разном смещении их осей в поперечном направлении. При этом коэффициент взаимного перекрытия варьировался в очень широких пределах $0 \leq K_{вз} \leq 1$.

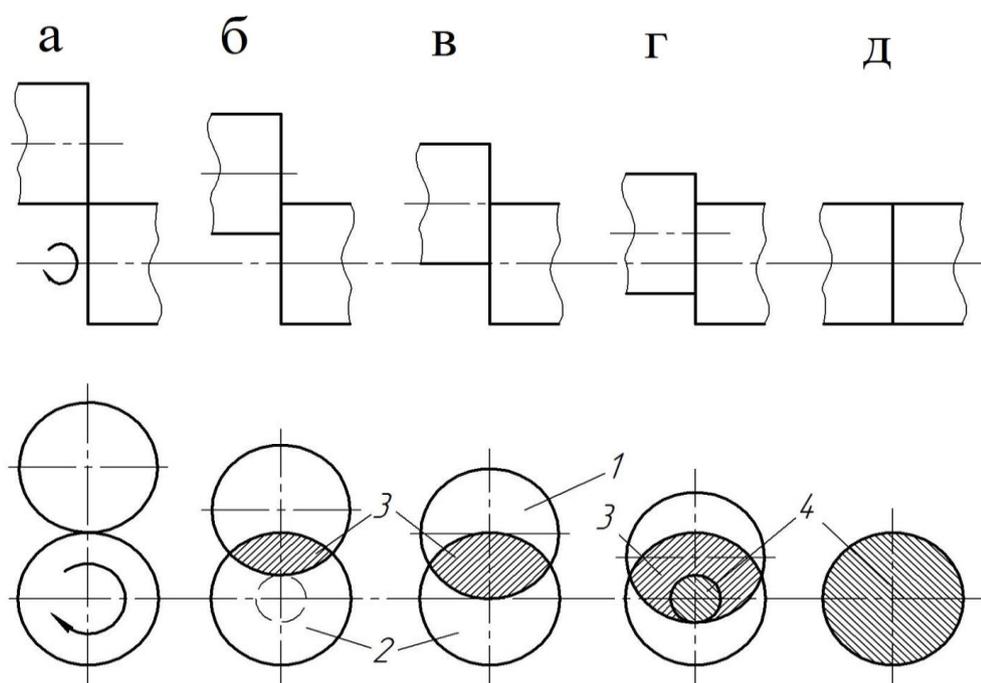


Рисунок 1.8 – Расположение образцов при их взаимном радиальном перемещении: 1-невращающийся образец; 2-вращающийся; 3-область контакта, где $K_{вз} \leq 1$, 4-область контакта, где $K_{вз} = 1$

Заштрихованная зона соответствует увеличению величины коэффициента взаимного перекрытия и доказывает возможность изменения взаимного перекрытия двух образцов в самых широких пределах. Следует отметить, что в описанных экспериментальных исследованиях параллельно коэффициенту взаимного перекрытия изменяется средняя скорость скольжения и весь диапазон скоростей из-за изменений величины радиуса вращающегося образца.

В работе [119,120] на таких же образцах выполняли исследования, результаты которых приведены на рисунке 1.9.

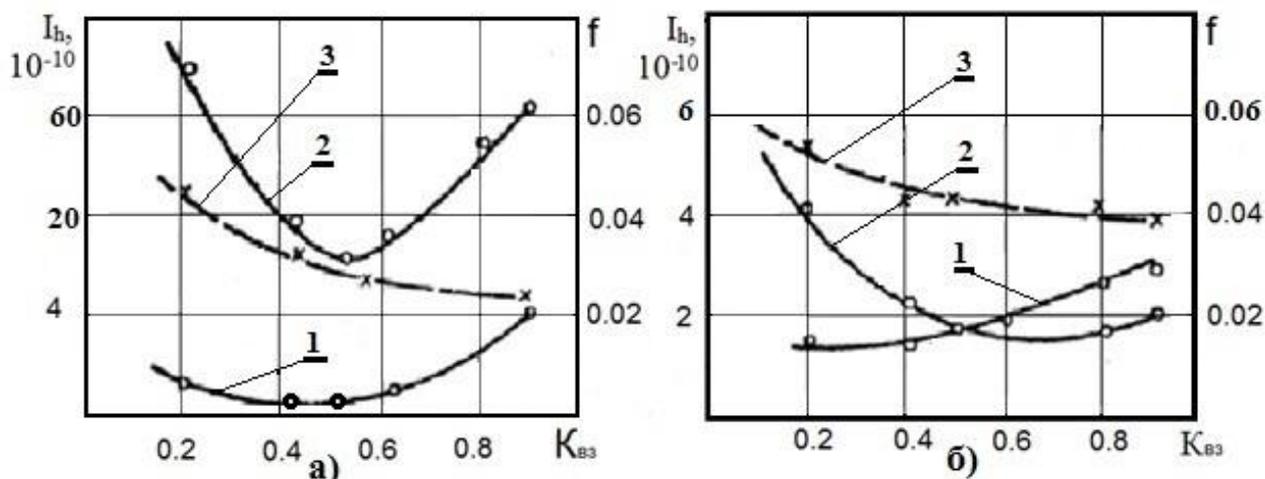


Рисунок 1.9 – Влияние коэффициента взаимного перекрытия на коэффициент трения и интенсивность изнашивания: а- пара трения сталь 20Х-БрАЖ9-4; б - пара трения сталь 20Х –сталь 20Х (1 – интенсивность изнашивания неподвижного образца, 2 – подвижного, 3 – коэффициент трения)

На графиках представлена зависимость интенсивности изнашивания и коэффициента трения от коэффициента взаимного перекрытия. Интенсивность изнашивания имеет экстремум. Экспериментальные результаты доказывают, что в определенных условиях коэффициент взаимного перекрытия может обеспечивать минимум коэффициента трения и интенсивности изнашивания при оптимальном соотношении поверхностей контакта.

Разработка подобных трибосопряжений, вызывающих описанный эффект, в настоящее время не осуществлена.

Закономерности влияния коэффициента взаимного перекрытия на трение и изнашивание эластомеров представлены на рисунке 1.10 [121]. Эксперименты проводились на машине торцевого трения. Уменьшение интенсивности изнашивания с увеличением коэффициента взаимного перекрытия авторы объясняют тем, что в зону контакта затруднен доступ атмосферного кислорода.

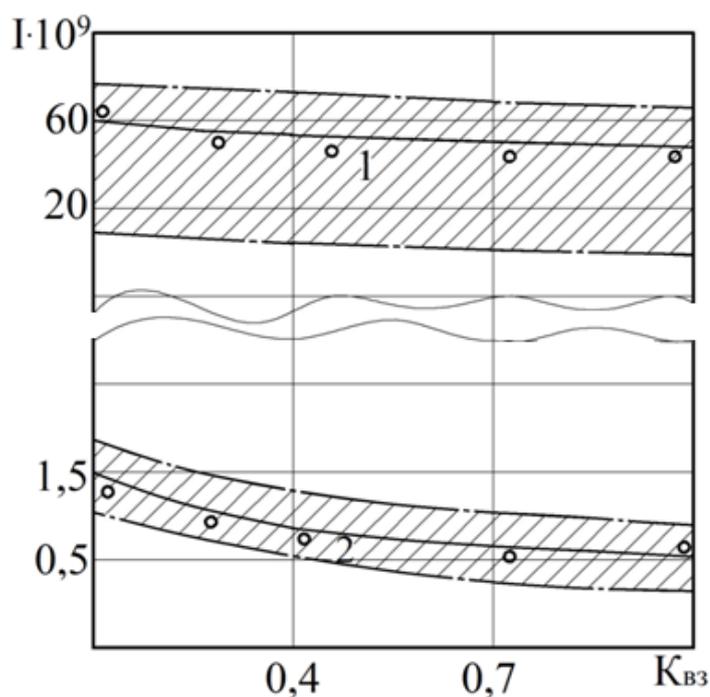


Рисунок 1.10 – Зависимость интенсивности изнашивания I от коэффициента взаимного перекрытия: 1- базовая резина, 2- металлонаполненная ($P = 2,2$ МПа; $V = 0,2$ м/с; $\Delta = 0,2$ мм).

В работе [122] исследовали влияние смазочных материалов на работоспособность трибосистемы при различных коэффициентах взаимного перекрытия. Трибосопряжение состояло из двух плоских образцов (сталь 45), смазываемых медьсодержащим пластичным смазочным материалом. Эксперимент проводили на машине торцевого трения. Результаты приведены на рисунке 1.11, где показано повышение износостойкости при применении пластичных смазочных материалов параллельно росту коэффициента взаимного перекрытия.

Физическим объяснением полученных результатов является, по мнению авторов, снижение частоты возникновения задиров для применяемых смазочных материалов с ростом коэффициента взаимного перекрытия. Однако это одновременно вызывает снижение контактной нагрузки, что также повышает износостойкость.

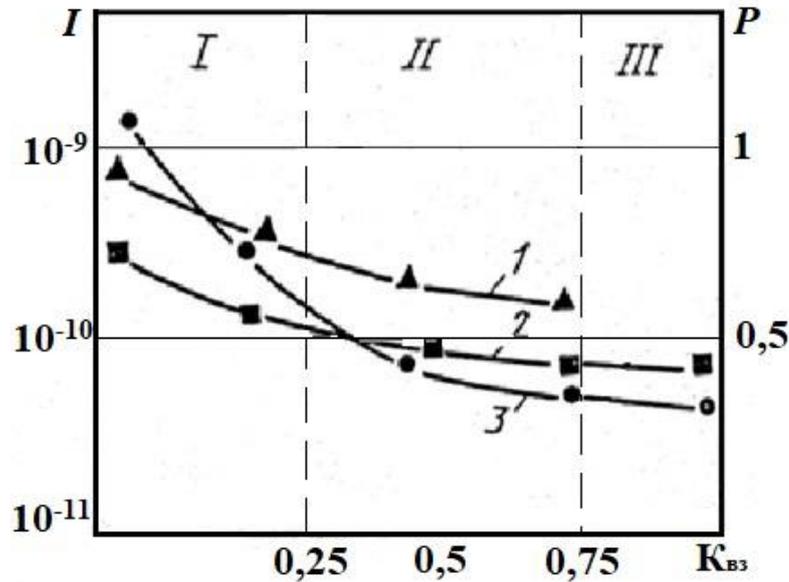


Рисунок 1.11 – Изменение интенсивности изнашивания образцов от величины Квз. Смазочный материал (1 -ЦИАТИМ-201; 3-МСПСМ медьсодержащий пластичный смазочный материал, 2-ОСПСМ оловосодержащий)

Авторы условно выделили три области, в рамках которых применение тех или иных смазочных материалов наиболее рационально, так как считают фактором, определяющим формирование поверхностных пленок, является количество кислорода в контактной зоне. Так, при $K_{вз} = 0,3 \div 0,75$ интенсивность изнашивания снижается при использовании медьсодержащего пластичного смазочного материала на 12%, а при $K_{вз} \leq 0,3$ в результате использования оловосодержащего смазочного материала - на 8%. Однако по имеющимся данным установить вклад $K_{вз}$ затруднительно.

Таким образом, коэффициент взаимного перекрытия играет существенную роль и в условиях смазывания трибосистемы пластичными смазочными материалами.

Анализ приведенных экспериментальных результатов показывает, что их обобщение для выработки каких-либо рекомендаций затруднительно, так как все они получены на различном лабораторном испытательном оборудовании, разных образцах и в различных условиях. Кроме того, данные о влиянии коэффициента взаимного перекрытия на трение исследуемых металлополимерных трибосистем в литературе полностью отсутствуют. Для заполнения этого пробела и возможности

сравнения и обобщения результатов испытаний необходимо провести дополнительные исследования для рассматриваемых металлополимерных трибосистем.

1.5 Цель и задачи исследований

Анализ специальной технической литературы показывает, что полимерные композиционные покрытия являются высокотехнологичными, экономичными и надёжно обеспечивающими высокие ресурсы металлополимерных трибосистем материалами, которые находят применение практически во всех отраслях машиностроения.

Однако в литературе и заводской практике имеются лишь ограниченные данные об использовании этих материалов в условиях возвратно-поступательного движения при значениях коэффициента взаимного перекрытия меньших единицы.

Это дает возможность сформулировать цель данной диссертационной работы: **Расширение области применения высокоэффективных полимерных композиционных антифрикционных покрытий в трибосистемах с коэффициентом взаимного перекрытия меньше единицы.**

Поставленная цель может быть достигнута при решении нижеследующих частных задач.

К задачам теоретического плана относятся следующие.

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-силового нагружения при возвратно-поступательном движении.

Задачами экспериментального плана являются следующие.

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 промышленные испытания полученных результатов и рекомендаций в производственных условиях.

2 УСЛОВИЯ КОНТАКТИРОВАНИЯ

Внешнее трение – это процесс преобразования механической энергии, реализуемый при контакте тел, обеспечивающих требуемый уровень выполнения трибосистемой функций, заданных при конструировании машины.

Основные условия контактирования металлополимерных трибосистем определяются такими параметрами как размер контактной поверхности, величина и распределение контактных давлений, а также температура контактной зоны. Установим характеристики этих параметров.

2.1 Поверхность контакта

Значительно повысить уровень проектирования металлополимерных узлов трения с антифрикционными полимерными покрытиями, а также расширить область их рационального применения позволит знание распределения давлений по дуге контакта (цилиндрическое трибосопряжение) и величины вызванной ими вязкоупругой деформации.

В настоящее время сформулирован целый ряд контактных задач для подшипников скольжения с полимерными покрытиями. С позиций инженерной практики их можно условно разделить на две группы.

Задачи первой группы [123,124] решаются в рамках теории упругости для контакта тел с разными упругими константами и распространяются, как частный случай, на подшипник скольжения с тонким полимерным покрытием. Сложность и громоздкость решений затрудняет их применение в инженерной практике.

В работе [125] решение упругой задачи сравнивается с данными Штаермана [126] и Герца, а также доказывается их неприемлемость для угла контакта более 20 градусов.

Задачи второго типа рассматривают покрытие как отдельное упругое тело. Подобный подход реализован с использованием теории тонких оболочек [127]. Эти результаты применены в работе [128] для фторопластов с учетом их вязкоупругости при внедрении жёсткого вала в полимерную втулку.

В работе [129] полимерное покрытие рассмотрено как кольцевое тело Винклера (деформация пропорциональна усилию). Также моделировалось тонкое покрытие в работе [130]. Таким образом, в указанных работах отсутствует постановка и решение вязкоупругой контактной задачи для радиальных подшипников скольжения с вязкоупругим полимерным покрытием.

Наиболее близкий аналог подобной задачи выполнен в работе [114], для обратной металлополимерной пары, включающей полимерное покрытие вала. Используем эту методику для корректной постановки и решения вязкоупругой задачи в стандартном радиальном подшипнике с вязкоупругим полимерным покрытием втулки. Начнем с геометрии контактной зоны.

Для расширения области применения результатов поставленных задач рассмотрим металлополимерную трибосистему в виде цилиндрического тела (штока, направляющая), совершающего возвратно-поступательное движение в контакте со втулкой, имеющие антифрикционное полимерное покрытие.

Рассматривается радиальный подшипник скольжения с антифрикционным композиционным полимерным покрытием, нанесённым на внутреннюю поверхность втулки [131]. В этом случае полученные результаты могут быть использованы и для подшипников скольжения с полимерным покрытием

Сформируем расчётную схему для поставленной задачи (Рисунок 2.1) вне зависимости от типа движения и величины Квз.

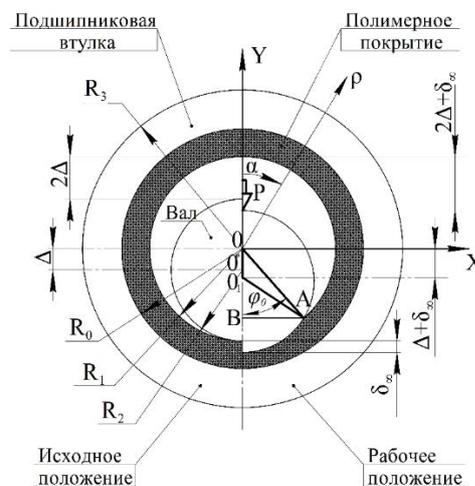


Рисунок 2.1 – Расчетная схема

На рисунке 2.1 приняты обозначения:

R_0, R_1, R_2, R_3 – соответственно внутренний радиусы металлической втулки под покрытием, полимерного покрытия, штока, наружный радиус втулки,

Δ – величина зазора (радиального),

δ_∞ – деформация полимерного покрытия,

φ_0 – половина угла контакта,

O, O^*, O_1 – соответственно центр координат, центр в начальном положении и в конечном,

P – сила нагружения.

На первом этапе выразим радиальное перемещение вала через контактные параметры (рабочий зазор, деформацию ползучести покрытия и полуугол контакта). Задача решается в плоской постановке (Рисунок 2.1).

Профиль исходной рабочей поверхности покрытия до приложения нагрузки в принятой системе полярных координат ρ - α описывается выражением

$$\rho = R_1. \quad (2.1)$$

Контур вала, переместившийся в радиальном направлении в связи с наличием монтажного зазора и деформацией ползучести, описывается выражением

$$(\rho \sin \alpha + \Delta + \delta_\infty)^2 + \rho^2 \cos^2 \alpha = R_2^2. \quad (2.2)$$

Рассматривая выражение (2.2) как квадратное уравнение

$$\rho^2 + \rho \cdot 2(\Delta + \delta_\infty) \cdot \sin \alpha + [(\Delta + \delta_\infty)^2 - R_2^2] = 0, \quad (2.3)$$

найдем его значащий корень в виде

$$\rho = -(\Delta + \delta_\infty) \cdot \sin \alpha \pm \sqrt{(\Delta + \delta_\infty)^2 \cdot \sin^2 \alpha - (\Delta + \delta_\infty)^2 + R_2^2}. \quad (2.4)$$

Преобразовав (2.4)

$$\rho = -(\Delta + \delta_\infty) \cdot \sin \alpha \pm \sqrt{(\Delta + \delta_\infty)^2 \cdot (\sin^2 \alpha - 1) \cdot \frac{R_2^2}{R_2^2} + R_2^2}, \quad (2.5)$$

получим для контура вала

$$\rho = -(\Delta + \delta_{\infty}) \cdot \sin \alpha + R_2 \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta + \delta_{\infty}}{R_2}\right)^2 \cdot \cos^2 \alpha} . \quad (2.6)$$

Радиальное перемещение зоны контакта вал – покрытие в результате действия нагрузки определим как разность контуров профиля вала (2.1) и покрытия (2.6) в рабочей фазе трибосистемы (Рисунок 2.1)

$$\delta(\varphi) = R_1 - \left[-(\Delta + \delta_{\infty}) \cdot \sin \alpha + R_2 \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta + \delta_{\infty}}{R_2}\right)^2 \cdot \cos^2 \alpha} \right] \quad (2.7)$$

Считая $\left(\frac{\Delta + \delta_{\infty}}{R_2}\right)^2 \ll 1$, получим для перемещения контура вала в покрытие

$$\delta(\varphi) \approx R_1 + (\Delta + \delta_{\infty}) \cdot \sin \alpha - R_2 . \quad (2.8)$$

Учитывая, что $R_2 = R_1 - \Delta$, будем иметь

$$\delta(\varphi) = (\Delta + \delta_{\infty}) \cdot \sin \alpha + \Delta \quad (2.9)$$

Следует отметить, что полярный угол α , который включает контактный полуугол φ_0 , расположен в окружности и равен $\alpha = 90 - \varphi_0$. Поэтому считаем, что $\sin \alpha = \sin(90 - \varphi_0) = \cos \varphi_0$ и можно записать:

$$\delta(\varphi) \approx (\Delta + \delta_{\infty}) \cdot \cos \varphi_0 + \Delta \quad (2.10)$$

В итоге выявлен профиль сопряжения полимерного покрытия со стальным штоком. Полученное выражение подобно модели для обратной пары, приведенной в работе [114].

Следующим этапом исследований является определение предельного контактного полуугла φ_0 . Его величина находится из треугольника $O O_1 A$ (схема на рисунке 2.1) по теореме косинусов

$$R_2^2 = (\Delta + \delta_{\infty})^2 + R_1^2 - 2R_1 \cdot (\Delta + \delta_{\infty}) \cdot \cos \varphi_0 \quad (2.11)$$

в следующем виде

$$\arccos \varphi_0 = \frac{2\Delta \cdot (R_1 + \delta_\infty) + \delta_\infty^2}{2R_1 \cdot (\Delta + \delta_\infty)} \quad (2.12)$$

Низкая жесткость полимерных фторопластсодержащих покрытий позволяет выполнить рабочее сопряжение штоком по переходным посадкам или без зазора.

Полученное выражение (2.12), исходя из соотношений ($R_1 \gg \Delta$ и $R_1 \gg \delta_\infty$), можно значительно упростить:

$$\arccos \varphi_0 = \frac{\Delta}{\Delta + \delta_\infty} \quad (2.13)$$

Определим, в качестве примера, среднюю погрешность приближенного выражения 2.13 по сравнению с исходной формулой (2.12) (таблица 2.1). При переходной посадке Н6/js6 зазор для штока диаметром $d = 40$ мм колеблется в пределах $\Delta_{\min} \dots \Delta_{\max} = 0,008 \dots 0,037$ мм

Таблица 2.1 – Оценка погрешности угла контакта

№ п/п	Параметры						
	σ , МПа	T , °C	Δ , мм	δ_∞ (2.14), мм	Половина контактного угла φ_0 , найденная по формулам		
					(2.12)	(2.13)	Погрешность, %
1	5	23	0,008	0,092	85,2	85,4	0,234
			0,037	0,096	73,6	73,8	0,271
		150	0,008	0,153	86,9	87,2	0,344
			0,037	0,160	78,9	79,2	0,354
2	100	23	0,008	0,218	87,6	87,9	0,341
			0,037	0,228	81,5	81,9	0,488
		150	0,008	0,362	88,2	88,8	0,675
			0,037	0,380	84,3	84,9	0,706
Средняя погрешность							0,426

В связи с тем, что средняя погрешность во всем исследованном диапазоне не превышает 0,5%, считаем допустимым и целесообразным пользоваться упрощенной формулой (2.13).

Уточнение площади фактического контакта и величины нормальных контактных напряжений выполняется по известному углу контакта контртело-покрытие.

В полученные зависимости входит величина вязкоупругой деформации δ_∞ (перемещение штока в диаметральной сечении втулки) с рассматриваемым

покрытием, зависящая от нагрузки, температуры и зазора. Это величина установлена экспериментально и описана моделью в статьях [132,133] для цилиндрического контактирования. Для использования этой модели в настоящей работе был выполнен целый ряд ее преобразований. Выходной параметр модели был выражен в абсолютной деформации покрытия – δ_∞ вместо относительной ϵ_∞ . Кроме того, тип коэффициента при температуре преобразовали из показательного в стандартный степенной. Все это изменило и первый коэффициент исходной модели. В итоге получена адекватная регрессионная модель, адаптированная к условиям настоящей работы и обеспечивающая при расчетах погрешность не более 5%. Модель имеет следующий вид:

$$\delta_\infty = 0,0286 \cdot \sigma^{0,288} \Delta^{0,03} T^{0,271} \quad (2.14)$$

График полученной модели, представленный на рисунке 2.2, построен на основе известного метода двумерных сечений.

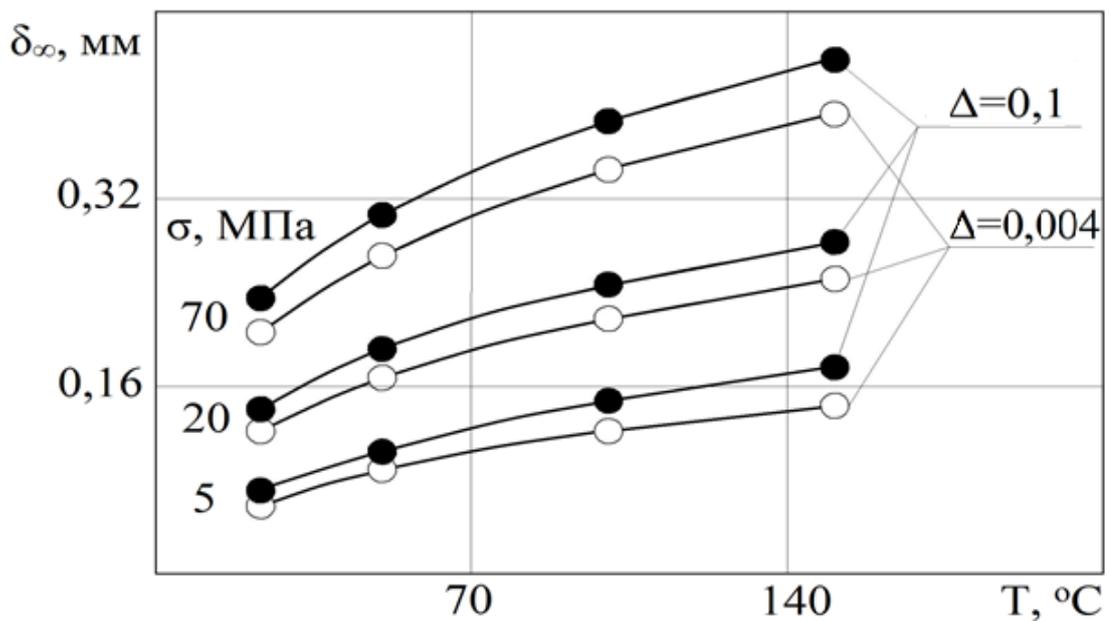


Рисунок 2.2 – Зависимость вязкоупругой деформации от температуры, нагрузки и радиального зазора

При варьировании входных параметров во всем исследованном диапазоне температуры T (23...150)° C, контактных напряжений σ (5...70) МПа и зазора Δ (0,004...0,1) мм величина изменения абсолютной вязкоупругой деформации δ_∞ составляет 0,262 мм ($\epsilon = 0,478$). При этом рост контактных напряжений,

температуры и зазора увеличивает деформацию соответственно в среднем на 93%, 66 %.

Кроме того, величина угла контакта, зависит не только от указанных параметров, но и от рабочего радиуса втулки R_1 , величина которого влияет на радиальный зазор через систему допусков и посадок.

Для оценки конкретного вклада каждого из параметров в величину контактных характеристик трибосопряжения выполнены расчеты контактного угла (2.12), изменений площади контакта и реальных контактных напряжений.

Диапазон варьирования переменных факторов и результаты расчета сведены в таблицу 2.2. При сравнении значений каждого из рассматриваемых факторов на границах исследуемого диапазона остальные параметры сохраняются постоянными в этих же точках факторного пространства.

Для расширения области оценки влияния исходных факторов величина радиального зазора, с учетом возможного износа, увеличена до 0,15 мм. Наибольшие значения всех параметров приведено в строке 6 таблицы 2.2. Средние напряжения рассчитаны по проекции уменьшенной контактной площади.

Таблица 2.2 – Параметры контактной зоны

№ п/п	Переменные факторы					Результаты расчета		
	σ , МПа	T , °С	Δ , мм	δ_{∞} , мм	Рабочий радиус втулки R_1 , мм	Контактный угол φ_0 , град	Уменьшение контакт. площади %	Средние напряжения σ , МПа
1	20	22	0,005	0,134	14	175,3	2,55	20,52
2	70	22	0,005	0,192	14	176,3	2,05	71,47
3	20	150	0,005	0,225	14	176,6	1,89	20,38
4	20	22	0,15	0,148	14	118,5	35,4	30,98
5	20	22	0,005	0,134	30	175,6	2,39	20,49
6	70	150	0,15	0,357	30	144,6	20,8	88,34

Для установления влияния на φ_0 параметров, входящих в выражение (2.12), принимаем в качестве эталона данные строки 1. Оценка влияния ползучести δ_{∞} от контактных напряжений σ выполняется сравнением результатов расчетов по строкам |1 – 2|, температуры T – |1 - 3|, зазора Δ – |1 – 4|, радиуса R_1 – |1 - 5|. Повышение всех параметров оценивается строкой 6.

Анализ полученных результатов показывает, что, в исследованном диапазоне факторного пространства все входящие в выражение (2.12) параметры уменьшают контактный угол по сравнению с 2π (максимальным при отсутствии зазора).

Контактные напряжения σ оказывают более сильное влияние на его величину, через вязкоупругую деформацию δ_{∞} , чем температура T , и это, при определенных условиях, несколько увеличивает контактную площадь. Снижение радиуса штока также уменьшает φ_0 , но незначительно (на 0,2%). Величина рабочего зазора Δ , особенно с учетом изнашивания, оказывает на контактный угол наибольшее по значению влияние, уменьшая $2\varphi_0$.

2.2 Распределение контактных давлений

Рассмотрев геометрию контактирования, перейдем к задаче о напряженно-деформированном состоянии материала полимерного покрытия. Используем схему на рисунке 2.1, в которой для удобства повернем оси координат на 180 градусов по часовой стрелке.

Учитывая требования инженерной практики, упростим задачу, применяя ряд упрощающих допущений.

1. Учитывая соотношение модулей полимерного композиционного покрытия и металлического контртела, считаем последнее абсолютно жёсткими.

2. Считаем полимерный композит покрытия цилиндрически ортотропным, в связи с тем, что его тканый каркас состоит из близких по свойствам нитей [134].

3. Поскольку покрытие фиксировано на субстрате адгезионным швом, считаем в этой области радиальную компоненту вектор перемещений равной нулю.

$$U_r(R_o, \varphi) = 0. \quad (2.15)$$

4. Учитывая наличие в конструкции покрытия стыка, представляется возможным считать окружные напряжения в покрытии равным нулю.

$$\sigma_{\varphi\varphi} = 0. \quad (2.16)$$

5. Зная уровень величины коэффициента трения в исследуемых трибосопряжениях $f \leq 0,1$ [9,135] считаем, что во всем сечении покрытия касательные напряжения равны нулю [125,127,134].

$$\sigma_{r\varphi} = 0. \quad (2.17)$$

6. Вследствие равенства нулю касательных напряжений, считаем полууглы контакта φ_0 и $-\varphi_0$, а также распределение контактных нормальных напряжений $g(\varphi)$ и $g(-\varphi)$ симметричными.

7. Опираясь на свойства материала композиционных покрытий [9,27,35], его реологическое поведение описываем на основе наследственной теории [136] с учетом изменение значений модуля от нагрузки и температуры [132,134,137]

$$E_r(t) = f(t, \sigma, T). \quad (2.18)$$

8. Монтажный зазор в рассматриваемых металлополимерных трибосистемах назначается по переходным посадкам [27,35,135] 6–7 квалитета точности и является весьма малой величиной.

9. Наличие стыка покрытия исключает в этой области действия напряжений, что дает возможность решать поставленную задачу в плоской постановке.

$$\sigma_{zz} = \sigma_{\varphi z} = \sigma_{rz} = 0; \quad \sigma_r = \sigma_r(\rho, \varphi). \quad (2.19)$$

Принятые упрощения, задачи позволяют записать в цилиндрических координатах уравнение элемента объема материала покрытия в виде

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial \rho} + \frac{\sigma_{rr}}{\rho} = 0. \quad (2.20)$$

Применяемые соотношения между вектора перемещений U и деформации покрытия ε [138,139] имеют следующий вид

$$\varepsilon_{rr} = \frac{\partial U_r}{\partial \rho}; \quad (2.21)$$

$$\varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial U_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{U_r}{\rho}. \quad (2.22)$$

Определяющее уравнение для рассматриваемых фторопластсодержащих покрытий с учетом сделанных упрощений записаны в виде [136]:

$$\varepsilon_{rr} = \frac{1}{E_r(t)} \sigma_{rr}; \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_{\varphi\varphi} = \frac{\nu_{r\varphi}(t)}{E_r(t)} \sigma_{rr}, \quad (2.24)$$

где E_r – модуль композиционного материала покрытия в радиальном направлении, $\nu_{r\varphi}$ – коэффициент Пуассона, определяющий деформацию покрытия в окружном направлении φ при действии силы в радиальном – r .

В соответствии с принятой схемой (рисунок 2.1) ставим граничные условия. В контактной зоне дуги $-\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_0$ действуют нормальные давления.

$$\sigma_{rr}(R_1, \varphi) = g(\varphi), \quad (2.25)$$

где $g(\varphi)$ – контактное давление.

Во внеконтактной зоне дуги радиальные напряжения равны нулю

$$\sigma_{rr}(R_1, \varphi) = 0. \quad (2.26)$$

Перемещения контактного профиля покрытия под действием рабочей нагрузки вала P представлены функцией контактного угла и радиуса

$$U_r(R_1, \varphi) = -\delta(\varphi). \quad (2.27)$$

Знак минуса в правой части выражения (2.27) определяет направление перемещений относительно оси ρ .

Проинтегрируем уравнение равновесия (2.20) по дуге контакта

$$\sigma_{rr}(\rho, \varphi) = g(\varphi) \frac{R_1}{\rho} \quad (2.28)$$

Подставим полученное выражение в определяющее уравнение (2.23)

$$\varepsilon_{rr} = \frac{g(\varphi) R_1}{E_r(t) \rho}. \quad (2.29)$$

а в него – геометрическое соотношение (2.21) и получим

$$\frac{\partial U_r}{\partial \rho} = \frac{g(\varphi) R_1}{E_r(t) \rho}. \quad (2.30)$$

Проинтегрировав (2.30), будем иметь

$$U_r(\rho, \varphi) = \frac{g(\varphi)}{E_r(t)} R_1 \ln(\rho) + C(\varphi, t). \quad (2.31)$$

При граничном условии (2.15) определим постоянную интегрирования найдем при граничном условии

$$C(\varphi, t) = -\frac{g(\varphi)}{E_r(t)} R_1 \ln(R_o). \quad (2.32)$$

Подставив в (2.31) выражение (2.32) после преобразований будем иметь

$$U_r(\rho, \varphi) = \frac{g(\varphi)}{E_r(t)} R_1 \ln \frac{\rho}{R_o}. \quad (2.33)$$

Используя граничное условие (2.27) подставим в (2.33) и будем иметь

$$\frac{g(\varphi)}{E_r(t)} R_1 \ln \frac{R_1}{R_o} = -\delta(\varphi), \quad (2.34)$$

откуда получим

$$g(\varphi) = -\frac{E_r(t)}{R_1 \ln \frac{R_1}{R_o}} \delta(\varphi). \quad (2.35)$$

Выражая $\delta(\varphi)$ равенством (2.10), найдем зависимость для расчета контактных давлений

$$g(\varphi) = -\frac{E_r(t)}{R_1 \ln \frac{R_1}{R_o}} [(\Delta + \delta) \cos \alpha + \Delta]. \quad (2.36)$$

Полученное выражение (2.36) дает возможность построить эпюру контактных давлений штока на полимерное покрытие. Ниже выполнен для

трибосистемы состоящей из цилиндрического штока диаметром $\varnothing 40 \frac{H7}{n7} \left(\begin{array}{c} +25 \\ +42 \\ +17 \end{array} \right)$

при минимальном диаметральном зазоре $\Delta \approx 0,004$ мм. Радиус рабочей поверхности втулки $R_1 = 20,004$ мм, радиус отверстия втулки под покрытие $R_o = 20,544$ мм (при толщине покрытия $\delta^* = 0,544$ мм), радиус штока $R_2 = 20$ мм.

Равновесный модуль антифрикционного покрытия, сформулировано на базе ткани неправильный атлас, определяется зависимостью [140]:

$$E_r = 10,57 \cdot 1,0033^{-T^2} \cdot \sigma^{1,019-0,019T^2} \quad (2.37)$$

где T в 10^{-2} К

Работа трибосистемы осуществляется при средних напряжениях (на проекцию вала) 50 МПа и температурах 23°C (296К) и 150°C (423К). Равновесный модуль при этих условиях равен соответственно 288,4 МПа и 141,9 МПа.

Величина наибольшего контактного полуугла определяется выражением (2.13), а наибольшая вязкоупругая деформация в диаметральном сечении сопряжения - регрессионной моделью (2.14). Анализ полученных результатов позволяет сделать ряд выводов.

Из-за малости монтажного зазора, в пределах переходных посадок и относительно малой вязкоупругой деформации тонкого покрытия, величина контактного угла в области применяемых нагрузочно-скоростных эксплуатационных режимов изменяется незначительно (3–5 градусов).

Полученные эпюры контактных давлений в рассматриваемом металлополимерном сопряжении представлены на рисунке 2.3.

Уменьшение контактного угла уменьшает фактическую площадь контакта, увеличивает контактные давления, меняет условия смазывания (перенос фторопласта) и температурный режим трибосистемы [141].

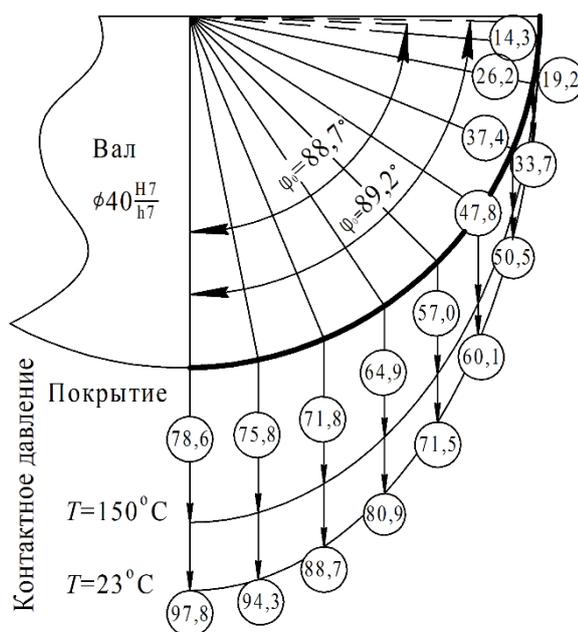


Рисунок 2.3 – Эпюра контактных давлений ($\sigma = 50$ МПа, $\Delta = 0,004$ мм)

С ростом жесткости композиционного полимерного покрытия контактные напряжения в результате снижения температуры увеличиваются, а их наибольшая величина в диаметральном сечении трибосистемы превышает средние расчетные в исследованном диапазоне параметров на $\approx 95,6\%$.

Рост температуры уменьшает жесткость полимера и, сглаживая воздействие нагрузки, уменьшает максимальные давления на $\approx 19,6\%$.

Таким образом, получена конечная формула для расчета нормальных средних давлений (на проекцию штока), распределенных в исследуемом диапазоне по дуге контакта.

2.3 Температура покрытия

В данном подразделе ставится задача о приближенном определении теплонапряженности исследуемой трибосистемы. Результат ищем в виде конечной формулы, позволяющей оценить допустимый температурный режим работы полимерных покрытий при проектных инженерных расчетах на уровне верхней оценки [142].

До выполнения последующих вычислений необходимо сделать ряд упрощающих допущений:

- ход S – это расстояние между одноименными поверхностями перемещенного образца;

- в связи с характером нагружения и податливостью покрытия считаем, что трибоконтакт реализуется по всей внутренней кольцевой поверхности образцов;

$K_{вз}$ – это отношение контактных площадей образца и контртела;

скорость $V_{п}$ перемещений переменна, поэтому в дальнейшем оперируем средней величиной.

В условиях возвратно-поступательного движения при переменной скорости скольжения на первом этапе необходимо определить ее среднюю величину за половину цикла симметричного движения. Для этого учтем схему экспериментальной установки с приводом в виде кривошипно-шатунного механизма (Рисунок 2.4).

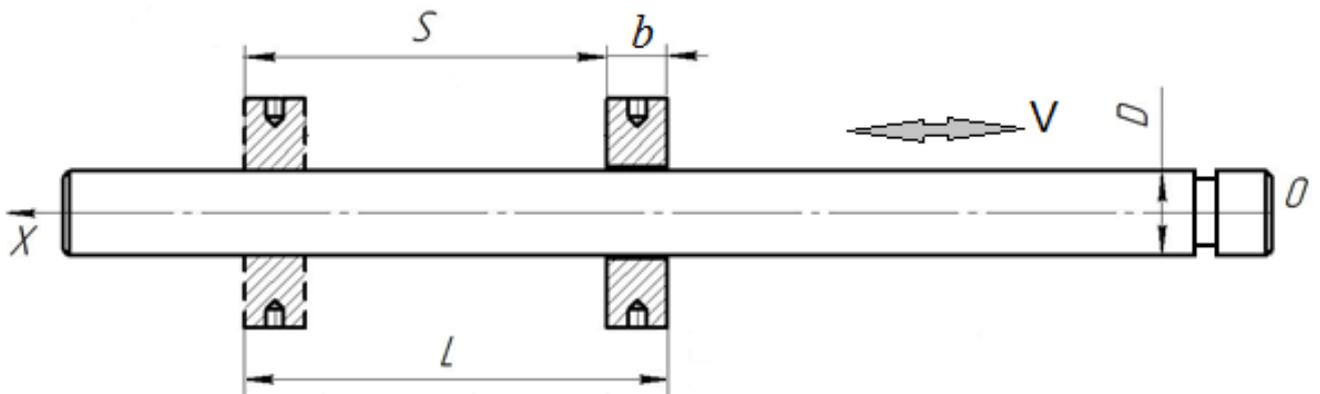


Рисунок 2.4 – Схема трибосистемы: S – ход, L – зона контакта вала, b – ширина образца

Таблица 2.3 – Параметры термонагружения трибосистемы

Контртело $D \times L$, мм	Образец $d \times l$, мм	Ход S , мм	Частота n , цикл/мин		Нагрузка P , кН		Скорость V , м/с		Контакт по валу L , мм
			150	67	700	3080	0,27	0,12	
Ø14×200	Ø14×10 -2шт	50	150	67	700	3080	0,27	0,12	60
		11	687	303	700	3080	0,27	0,12	21

Для определения скорости ползуна применялась стандартная формула [143]

$$V_{п} = R_{к} \varpi \left(\sin \beta + \frac{\mu}{2} \sin 2\beta \right) \quad (2.38)$$

где R_k – длина кривошипа,

ϖ – угловая скорость,

μ – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна (безразмерный параметр кривошипно-шатунного механизма);

β – угол поворота кривошипа.

По приведенной формуле (2.38) рассчитывались величины линейной скорости скольжения образцов, для разных длин кривошипа и частоты вращения привода. Результаты сведены в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – Изменение скорости ползуна от угла поворота кривошипа

№ п/п	β , град.	Длина кривошипа, м			
		$R_k = 0,025$		$R_k = 0,0055$	
		Угловая скорость кривошипа, с ⁻¹			
		$\varpi_1 = 15,7$	$\varpi_2 = 7$	$\varpi_3 = 72$	$\varpi_4 = 31,8$
		Линейная скорость ползуна V , м/с			
1	0	0,000	0	0	0,000
2	30	0,22	0,10	0,22	0,10
3	60	0,36	0,16	0,36	0,16
4	90	0,40	0,18	0,40	0,18
5	120	0,36	0,10	0,36	0,10
6	150	0,22	0,16	0,22	0,16
7	180	0,000	0	0	0,000

Для проведения расчетов определим величину средних линейных скоростей движения ползуна за половину (в силу симметрии) рабочего полуцикла. Ее получим интегрированием выражение (2.38) в пределах полуугла поворота кривошипа

$$V_{\text{ср.п}} = \frac{R_k \varpi}{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \beta d\beta + \frac{R_k \varpi \mu}{\frac{\pi}{2}} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin 2\beta d\beta \quad (2.39)$$

Взяв интегралы в приведенных пределах и выполнив преобразования, получим выражение для расчета средней скорости ползуна

$$V_{\text{ср.п}} = \frac{2R_k \varpi}{\pi} \left(1 + \frac{\mu}{2} \right) \quad (2.40)$$

Для наглядности по результатам расчетов построим диаграмму скорости ползуна за полуцикл его движения (Рисунок 2.5). На рисунке показаны наибольшая и средняя величина линейных скоростей ползуна при разной угловой скорости кривошипа и длине хода.

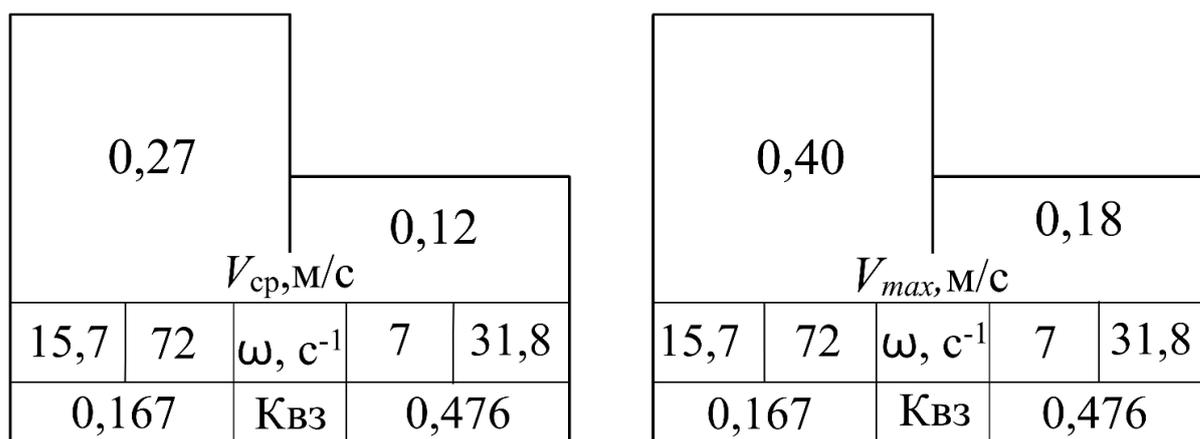


Рисунок 2.5 – Соотношение скоростей в контактной зоне

Используя полученную среднюю скорость, установим, условия однозначности при расчете температуры покрытия:

1. Считаем, что в процессе генерации тепла, в силу симметричности движения, участвует средняя линейная скорость, рассчитанная в пределах четверти цикла движения. Ее действие распространяется на всю поверхность контакта.
2. Источником теплоты является кольцевая поверхность образца, шириной b , перемещающаяся с ходом S (прямым и обратным) по контртелу.
3. Применяемые материалы изотропны, а их теплофизические характеристики известны.
4. Считаем, что диссипация всей работы трения расходуется на нагрев трибосистемы.
5. Температуру окружающей среды считаем постоянной.
6. Зазор между полувтулками образца Δ_1 по малости (1–2 мм) не учитывается.

7. Теплоотдачей с торцов покрытия в связи с его весьма малой толщиной (0,544 мм) пренебрегаем.

8. Изотермические поверхности в перпендикулярных оси X цилиндрических сечениях считаем плоскими. На рисунке 2.6 приведена общая схема трибосистемы для оценки уравнения ее температуры

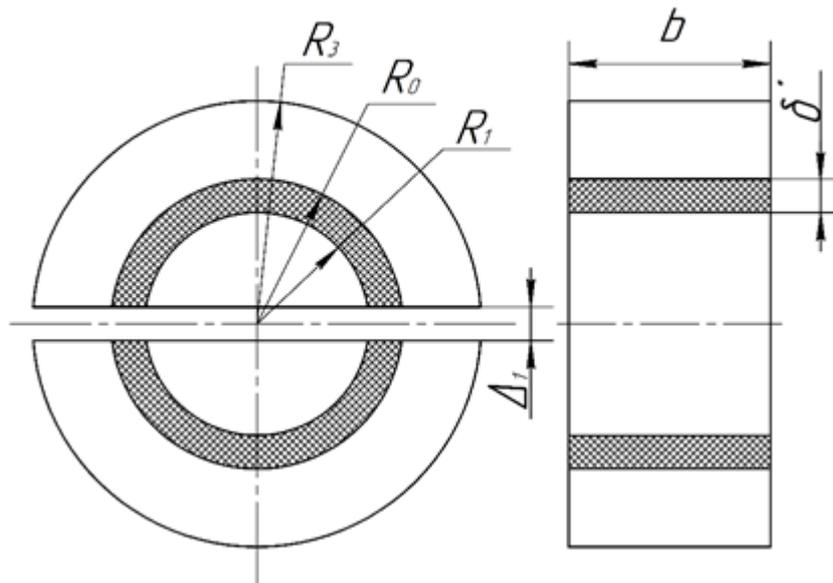


Рисунок 2.6 – Расчетная схема

Поставленная задача решается в цилиндрических координатах, расположенных так, что ось X совпадает с центральной осью подшипника

Граничные условия:

1. Температура на поверхностях покрытия:

$$\text{внутренней } T(R_1) = T_1; \quad \text{внешней } T(R_0) = T_0,$$

где $R_0 = 0,5D_0$ – внутренний (рабочий) радиус трибосистемы;

$$R_1 = 0,5D_0 + \delta^* \text{ – внутренний радиус металлической втулки;}$$

δ^* – толщина полимерного композиционного покрытия.

2. Температура на поверхности втулки:

$$\text{внутренней } T(R_0) = T_0; \quad \text{наружной } T(R_3) = T_3,$$

где $R_3 = 0,5D_3$ – наружный радиус втулки.

Условия неразрывности температурной функции на стыке покрытие-втулка

$$T(R_0 - 0) = T(R_0 + 0) = T_0.$$

В стационарном режиме трения дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье, в принятой системе координат имеет вид [109,144]:

$$\frac{\partial T}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial T}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} = 0 \quad (2.41)$$

В соответствии с условием 7 при погрешности не более 3% [145] считаем, что

$$\frac{\partial T}{\partial Z} = 0 \quad (2.42)$$

а по условию 3, при погрешности 7-10% [140], имеем

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi} = 0 \quad (2.43)$$

Учитывая это, уравнение (2.41) можно заменить как

$$\frac{\partial^2 T}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial T}{\partial \rho} = 0 \quad (2.44)$$

или

$$\frac{\partial}{\partial \rho} \left(\rho \frac{\partial T}{\partial \rho} \right) = 0 \quad (2.45)$$

Проведя интегрирование (2.45) с учетом граничных условий для покрытия получим:

$$T(\rho) = T_1 + (T_1 - T_0) \frac{\ln \frac{R_1}{\rho}}{\ln \frac{R_0}{R_1}} \quad (2.46)$$

Аналогично, с граничными условиями для металлической втулки, получим:

$$T_0(\rho) = T(\rho) = T_0 + (T_0 - T_3) \frac{\ln \frac{R_0}{\rho}}{\ln \frac{R_3}{R_0}} \quad (2.47)$$

Выражение (2.46) и (2.47) используем для определения количества тепла, проходящего через цилиндрические поверхности в единицу времени.

По закону Фурье [109,144] имеем:

$$Q(\rho) = -\lambda_i \frac{dT}{dr} F_1 = -\lambda_i \frac{dT}{dr} 2\pi b \rho \quad (2.48)$$

Для границы покрытие-штулка, найдя $\frac{dT}{d\rho}$ при $\rho = R_1$, получим из (2.48) для

композиата покрытия:

$$Q(\rho) = \lambda_{\pi} \frac{2\pi b}{\ln \frac{R_0}{R_1}} (T_1 - T_0) \quad (2.49)$$

и для металлической штулки

$$Q_1(\rho) = \lambda_m \frac{2\pi b}{\ln \frac{R_3}{R_0}} (T_0 - T_3) \quad (2.50)$$

Теплоотдачу с наружной поверхности штулки найдем по формуле Ньютона [109,146]:

$$Q_2 = \alpha K_{\tau} F_1 (T_3 - T_c) \quad (2.51)$$

где Q, Q_1, Q_2 - являются последовательными зонами единого общего теплового потока;

α – средний коэффициент теплоотдачи;

$K_{\tau} = 0,8$ - коэффициент неравномерности нагрева [13];

T_c – температура окружающей среды;

$F_1 = 2\pi (R_3^2 - R_0^2 + R_3 b)$ – площадь внешней поверхности штулки;

b – ширина подшипника.

Суммируя участки материалов, последовательно проходимые тепловым потоком, генерируемым в процессе трения, имеем:

$$(T_1 - T_0) = Q \frac{\ln \frac{R_0}{R_1}}{2\pi b \lambda_{\pi}}$$

$$(T_0 - T_3) = Q_1 \frac{\ln \frac{R_3}{R_0}}{2\pi b \lambda_m} \quad (2.52)$$

$$(T_3 - T_c) = Q_2 \frac{1}{\alpha K_r F_1}$$

Суммируя левые и правые части (2.52), получим искомое выражение для температуры покрытия

$$T_0 = T_c + Q \left[\frac{1}{2\pi b} \left[\frac{\ln \frac{R_0}{R_1}}{\lambda_n} + \frac{\ln \frac{R_3}{R_0}}{\lambda_m} \right] + \frac{1}{\alpha K_r F_1} \right] \quad (2.53)$$

Учитывая геометрические соотношения (см. рисунок 2.6), можно записать

$$\ln \frac{R_0}{R_1} = \ln \left(1 + \frac{2\delta^*}{D_0} \right) \quad (2.54)$$

Разложив (2.54) в степной ряд и ограничившись линейным членом с погрешностью примерно $\approx 1\%$, получим

$$\ln \left(1 + \frac{2\delta^*}{D_0} \right) = \frac{2\delta^*}{D_0} \quad (2.55)$$

Перейдя от радиальных к более удобным диаметральному размерам подшипника и подставив (2.55) в (2.53), будем иметь

$$T_0 = T_c + Q \left[\frac{1}{2\pi b} \left(\frac{2\delta^*}{D_0 \lambda_n} + \frac{1}{\lambda_m} \ln \frac{D_3}{D_0 + 2\delta^*} \right) + \frac{1}{\alpha K_r F_1} \right] \quad (2.56)$$

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

$$Q = \alpha_{\text{тн}} \bar{f} P \bar{V} \quad (2.57)$$

где \bar{f} – средний коэффициент трения;

P – рабочая нагрузка;

\bar{V} – средняя за период скорость перемещения штока относительно втулки;

$\alpha_{\text{тн}}$ – коэффициент разделения тепловых потоков пары трения.

У представленной конструкции трибосистемы коэффициент взаимного перекрытия меньше единицы, поэтому тепловой поток определяется выражением, полученным А.В. Чичинадзе [147]:

$$\alpha_{\text{тн}} = \frac{\sqrt{\lambda_1 \cdot C_1 \cdot \gamma_1}}{\sqrt{\lambda_1 \cdot C_1 \cdot \gamma_1} + \text{Квз} \sqrt{\lambda_2 \cdot C_2 \cdot \gamma_2}}, \quad (2.58)$$

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;

Квз- коэффициент взаимного перекрытия, определяемый выражением

$$\text{Квз} = \frac{S_1}{S_2} \quad (2.59)$$

где S_1 и S_2 – площадь элементов пары трения.

Переход полимеров в состояние вынужденной высокоэластичности зависит от температурно-силового воздействия [148,149,150] в трибосистеме. Наибольшие контактные напряжения достигают 94,7МПа, что на 89,4% больше средних, рассчитанных по проекции вала. Условие работоспособности покрытия имеет следующий вид [4]:

$$\sigma \leq 1137,4 - 217,16T_0 \quad (2.60)$$

При выполнении этого условия трибосистема способна устойчиво работоспособна при данных условиях эксплуатации, а композит полимерного покрытия не переходит в состояние вынужденной высокоэластичности.

Итогом решения описанной температурной задачи для движения штока во втулке с антифрикционным фторопластсодержащим покрытием, работающих в условиях коэффициента взаимного перекрытия меньше единицы, является выражение для оценки величины температуры в металлополимерной трибосистеме.

Ниже приведены в таблице 2.5, необходимые теплофизические параметры применяемых контртел и антифрикционного композита. В связи с тем, что

теплофизические характеристики зависят от температуры, используем усредненные справочные данные [151].

Таблица 2.5 – Теплофизические характеристики материалов элементов пары трения

Параметры	Материалы контртел			
	Сталь 45	Сталь 14X17H2	Титановый сплав BT3-1	Покрытие на основе атласа, 0,544мм
Теплопроводность, Вт/м·К	48	22	10,4	0,331
Теплоёмкость, Дж/кг·К	473	462	502	1378
Плотность, кг/м ³	7800	7750	4500	1650

Используя табличные данные и формулу (2.58) выполнен температурный расчёт для трибосистем с разными материалами контртел и проведено сравнение его результатов с экспериментальными данными. Результаты расчётов представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Зависимость контактной температуры от режимов нагружения и материала контртел

Материал контртел	Режимы нагружения 13 МПа; V=0,195 м/с; Kвз=0,167			
	$\alpha_{тп}$	$T_{экс}$, °С	$T_{теор}$, °С	Δ , %
Сталь 45	0,280762	132	139,1	5,4
Сталь 14X17H2	0,369206	135	131,1	2,9
Титановый сплав BT3-1	0,517314	152	151,1	0,32

В качестве материала для изготовления основных образцов использовалась сталь марки 45; контртела выполнялись из разных материалов с различными теплофизическими свойствами, приведёнными в таблице 2.5. Применяемое антифрикционное композиционное покрытие выполнено с армирующим компонентом из полуторослойной ткани типа шестиремизный неправильный атлас толщиной 0,544 мм. В качестве примера в таблице 2.6 приведены результаты

сравнения теоретических расчетов и экспериментальных данных по трем материалам. Более подробные сведения приведены в главе 5.

Анализ приведенных экспериментальных данных показывает, что при принятых нагрузочно-скоростных режимах лучшими теплофизическими параметрами из исследованного перечня конструкционных материалов обладает трибосистема с контртелом из стали 45. Это объясняется наиболее высоким значением теплопроводности этого материала, максимально отбирающего теплоту от зоны ее генерации.

2.4 Выводы

1. Объединение в единый комплекс основных контактных характеристик металлополимерных трибосистем (угол контакта, нормальные давления, температура) работающие при коэффициенте взаимного перекрытия меньше единицы позволил получить аналитические зависимости этих параметров от конструктивных и эксплуатационных характеристик.

2. Исследованиями геометрических соотношений при нагружении рассматриваемых металлополимерных трибосистем с композиционным покрытием, установлен характер зависимость дуги контакта от зазора трибосопряжения и вязкоупругой деформации покрытия.

3. На основе решения плоской задачи о напряженно-деформированном состоянии вязкоупругого полимерного покрытия получено конечное выражение для расчета контактных давлений в трибосопряжении при заданной нагрузке трибосистемы.

4. Учитывая с помощью коэффициента взаимного перекрытия особенности кинематики и контактирования металлополимерной трибосистемы с полимерным покрытием, а также его теплофизические свойства, получена приближенная аналитическая модель для оценки температурного порога применимости рассматриваемого композиционного покрытия.

3 МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Известно [106], что коэффициент взаимного перекрытия влияет на тепловой режим металлополимерной трибосистем. Особенностью исследуемого узла трения с фторопластсодержащим покрытием, работающего в режиме самосмазывания политетрафторэтиленом, является адгезионный перенос ПТФЭ на ответную деталь в качестве смазочного материала. При этом малая величина коэффициента взаимного перекрытия ($K_{вз} < 1$), т.е. относительно большая поверхность контртела, соприкасающегося с покрытием, вызывает повышенный расход фторопласта в результате его переноса на большую поверхность контртела.

Следовательно, процесс смазывания фторопластом в рассматриваемых условиях приводит к увеличению его расхода и снижению ресурса трибосистемы. Компенсация этого обстоятельства требует дальнейших углубленных исследований и установления области нагрузочно-скоростных режимов рациональной эксплуатации подобных трибосистем.

3.1 Общая структура исследований

В соответствии с поставленной целью и частными задачами весь объем исследований можно разделить на два блока: теоретический и экспериментальный. Последний также состоит из направлений исследований параметров двух типов: конструкционных и эксплуатационных. Общая структурная схема исследования представлена на рисунке 3.1.

В теоретической части исследуются температурная зависимость полимерного покрытия в зоне трения, так как полимерные материалы являются наименее теплостойким элементом и их предельные режимы эксплуатации ограничиваются именно теплостойкостью. Определение допустимой пороговой температуры, генерируемой при трении, является основой их эксплуатации в узлах трения и определяет важность температурных расчетов.

Далее выполняются экспериментальные исследования конструкторского плана, которые обеспечивают установление рациональных параметров покрытия, материала контртел и шероховатости их поверхности.

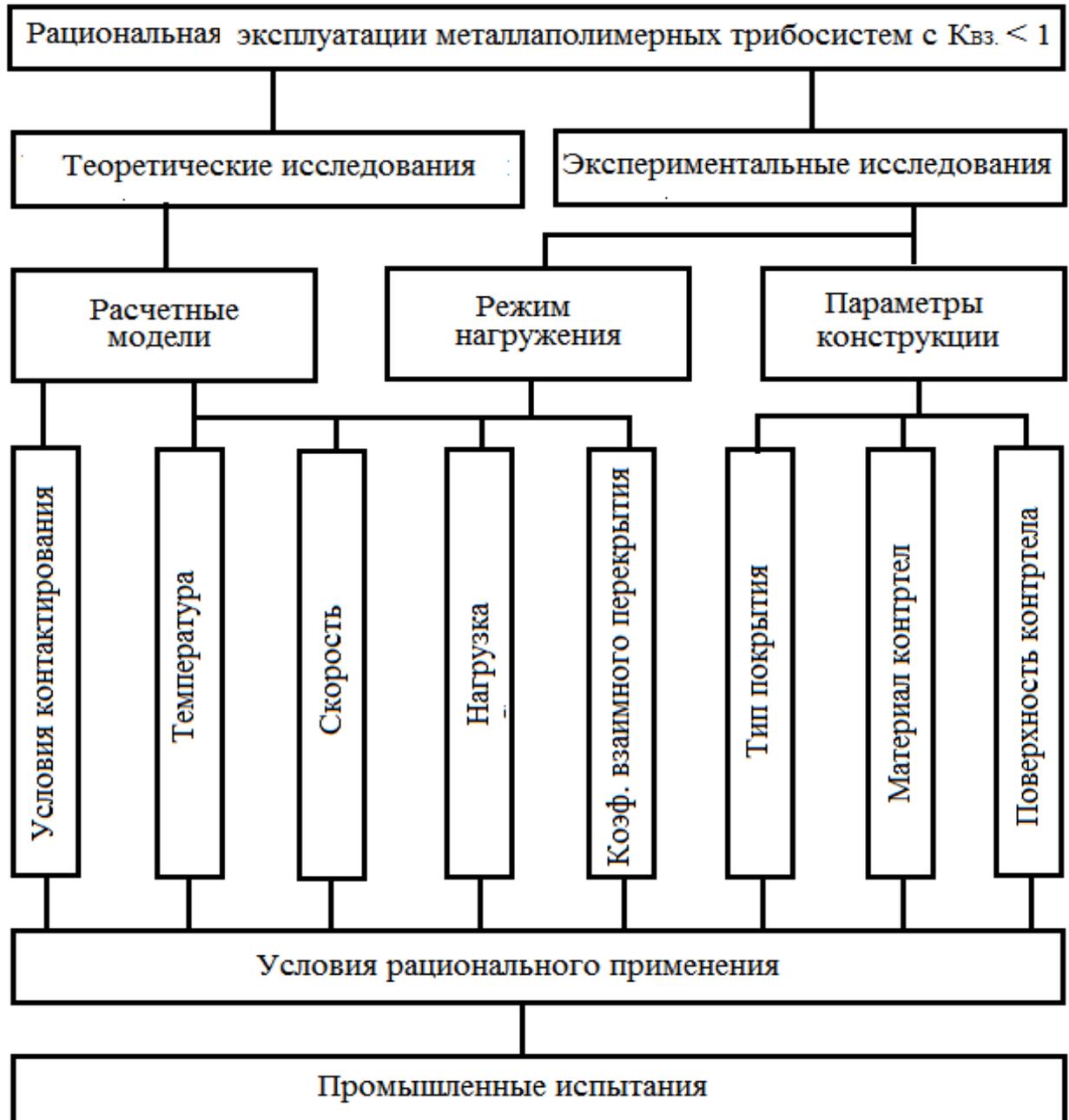


Рисунок 3.1 – Общая структурная схема исследований

Покрытия, в зависимости от типа каркаса композита, различаются по толщине, жесткости и износостойкости. Влияние контртел определяется природой их материала, его теплофизическими параметрами и классом шероховатости контактной поверхности. Эксплуатационные исследования являются окончательным критерием эффективности разработок, и завершаются промышленными испытаниями.

Таблица 3.1 – Блоки экспериментальных исследований

№ п/п	Блок	Цель исследований	Выход	Переменные факторы	Диапазон варьирования	Оборудование	Погрешность
1	Конструктивные параметры	Выбор рациональной конструкции трибосистемы	Износ, коэф. трения; Температура, °С	Тканый каркас покрытия	Атлас, Саржа 1/1 и 1/3	Специальный стенд для трибо-технических исследований металло-полимерных трибосистем при возвратно-поступательном движении	8 – 12%
				Материал контртела	Сталь 45 , 14X17H2 Титан. сплав ВТ 3-1		
				Шероховатость контртел, Ra, мкм	0,08-1,25		
2	Эксплуатационные параметры	Определение рациональных режимов эксплуатации	Износ, коэффициент трения и температура в стационарном и прирабочном периоде трения	Средняя скорость, м/с	0,12 ÷ 0,27		
				Нагрузка, МПа	5 ÷ 22		
				Коэффициент взаимного перекрытия	0,167 ÷ 0,476		

Все исследования выполняются, при возвратно-поступательном движении покрытий по контртелу, с варьированием величины коэффициента взаимного перекрытия.

3.2 Экспериментальное оборудование и приборы

Поставленные задачи исследования трибосистем с композиционными полимерными покрытиями, в условиях возвратно-поступательного движения и значительных нагрузок, не позволяют использовать стандартные машины трения. В связи с этим было разработано специальное стендовое оборудование [152], дающее возможность исследовать параметры трения и изнашивание покрытий во всем диапазоне нагрузочно-скоростного и температурного нагружения (Рисунок 3.2).

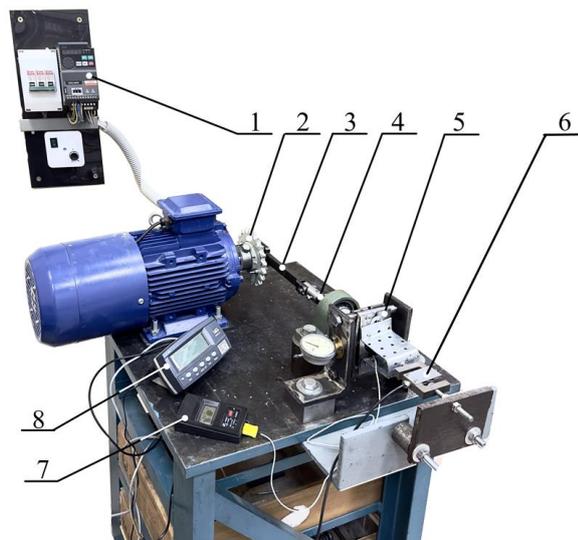


Рисунок 3.2 – Стенд для экспериментальных исследований: 1 – частотный регулятор, 2 – кривошип, 3 – шатун, 4 – ползун-контртел, 5 – нагружающее устройство, 6–S образный тензодатчик, 7 – пульт термопары, 8 – пульт тензодатчика

Экспериментальная установка (Рисунок 3.2) представляет собой привод в виде кривошипно-шатунного механизма, получающего движение от электродвигателя. Кривошип 2 выполнен в виде диска с резьбовыми отверстиями, позволяющими изменять длину кривошипа для установки оси шатуна 3, обеспечивающего изменение длины хода ползуна 4. Кривошип 2

вращается электродвигателем марки АИ100L8, включенным через частотный регулятор 1 модели ESQ-A500-043-1.5R.

Шатун 3, сообщающий возвратно-поступательное движение ползуну 4, перемещающему контртело. Шатун выполнен значительной длины, что позволяет по возможности уменьшить вертикальную составляющую силы, перемещающей его. Контртело – ползун 4 фиксируется за специальную кольцевую канавку и движется между образцами в виде полувтулок с полимерным композиционным покрытием, установленных в нагружающем устройстве стенда 5. В результате изменения длины кривошипа шатуна варьируется длина хода контртела и коэффициент взаимного перекрытия.

Приспособление для нагрузки [153], имеет индикатор часового типа, встроенный в нагружающее устройство (Рисунок 3.3), позволяет устанавливать требуемую нагрузку и определить величину текущего износа покрытий.

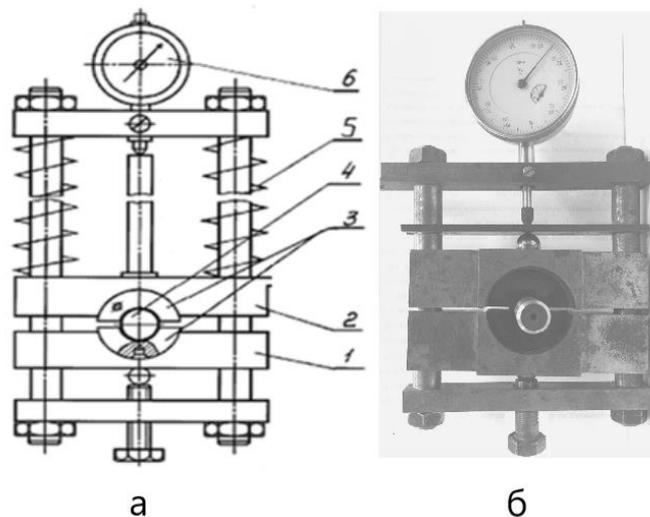


Рисунок 3.3 – Нагружающее устройство: а – схема, б – общий вид

На схеме обозначено (Рисунок 3.3 а): 1 и 2 – нижняя и верхняя опорные планки, 3 – образцы с покрытием, 4 – валик - контртело, 5 – тарированные нагружающие пружины, 6 – индикатор часового типа.

Принятая конструкция нагружающего устройства (Рисунок 3.3) обеспечивает нагружение образцов тарированной пластинчатой пружиной. Величина нагрузки регулируется перемещением нижней опорной планки 1

нагружающим винтом с мелкой резьбой и контролируется по показаниям индикатора б. Опорные планки могут свободно перемещаться по направляющим, что позволяет образцам, в определенной степени, самоустанавливаться по контртелу.

Износ покрытий изменяет степень сжатия пружины и компенсируется увеличением нагрузки в процессе испытаний. Устанавливаемая нагрузка является средней по проекции цилиндрического штока.

Текущий износ покрытий определяется индикатором сразу для двух образцов без разборки нагружающего устройства. Конечная величина износа уточняется при разборке устройства измерением рычажно-зубчатой головкой ИГ с точностью до 0,001 мм.

Температура измерялась измерительным комплексом включающий термопару ХК и программный блок ТМ902-С. Термопара установлена в специальном отверстии образцов (полувтулок).

Коэффициент трения определялся при помощи измерительного комплекса ДОР-3-0,1И и S образный тензодатчик.

Паспортные характеристики стенда для триботехнических исследований сведены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Основные комплектующие и паспортные параметры экспериментального стенда

Наименование устройств	Тип или торговая марка	Рабочие характеристики	Диапазон регулирования или измерения
Электро-двигатель	5АИ100L8	Мощность -1,5 кВт; обороты -750об/мин	Частота вращения $n=150$ и 350мин^{-1}
Механизм привода	Кривошипно-шатунный	Кривошип 2,5 и 25 мм, шатун - 190 мм	Ход - 5 и 50 мм
Частотный регулятор	ESQ-A500-043-1.5R	Мощность 1,5 кВт	Снижение частоты $i = 2,1 - 5$
Нагружающее устройство	Пружинное	Прогиб до 1,5мм	0-30 кН
Термометр (детектор, термопара)	ТМ-902С	Температура °С	-50 до 1300 °С

Тарировка нагружающего устройства (Рисунок 3.4) выполнялась образцовым динамометром сжатия 1-го класса ДОСМ-3-1 (ГОСТ 9500-84).

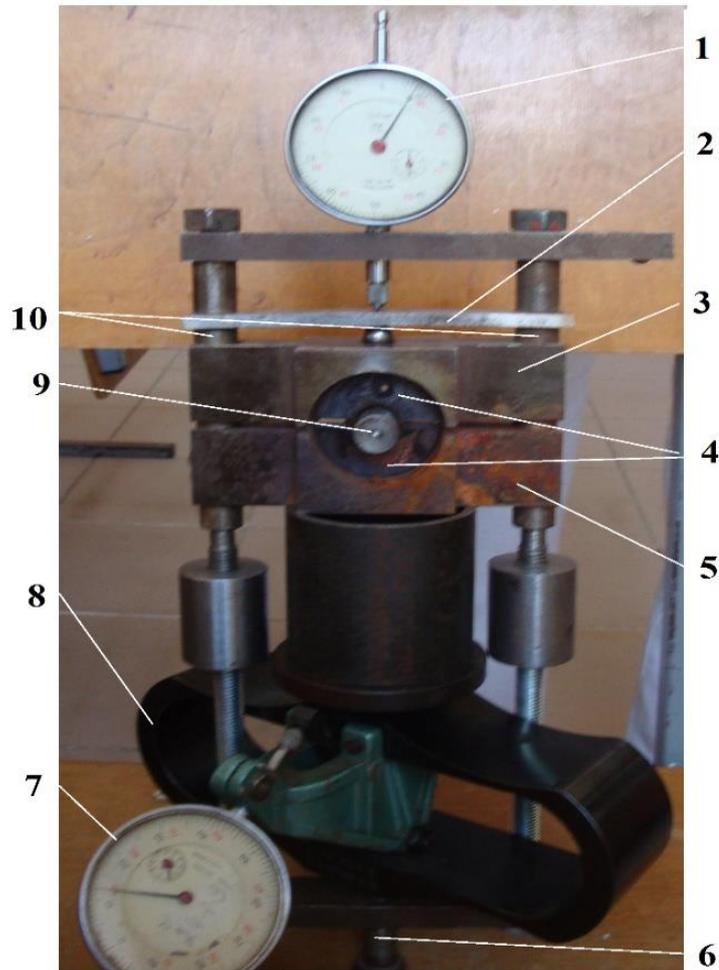


Рисунок 3.4 – Тарировка нагружающего устройства: 1- индикатор пружины, нагружающей образцы, 2 – пластинчатая пружина, 3 – верхняя обоймы, 4 – образцы, 5 – нижняя обойма, 6 – нагружающий винт, 7 – индикатор динамометра, 8 – динамометр, 9 – контртело, 10 – направляющие

Тарировка нагружающего устройства в виде тарировочного графика представлена на рисунке 3.5. По ординате отложены нормальные контактные напряжения в исследуемых парах трения, рассчитанные по проекции штока – контртела. На абсциссе у тарировочного графика пластинчатой пружины отложены показания индикатора.

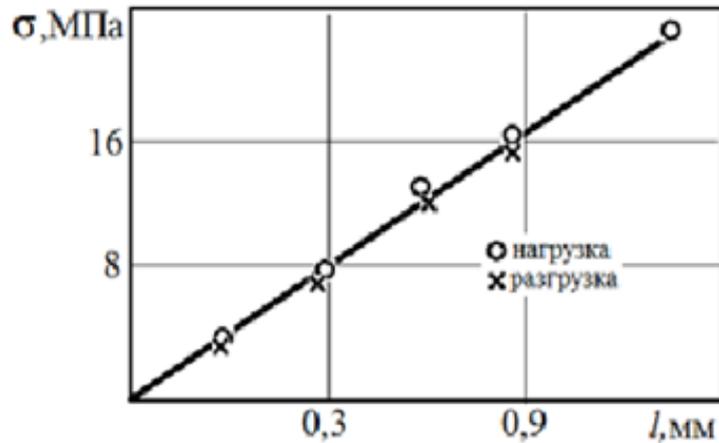


Рисунок 3.5 – Тарировочный график плоской пружины

Данные о применяемых измерительных приборах и инструментах, а также их метрологических характеристиках приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Метрологические характеристики средств измерения

№ п/п	Средство измерения	Тип	ГОСТ	Пределы измерения	Цена деления	Класс точности	Погрешность
1.	Штангенциркуль	ШЦ - 1	166 - 89	0 – 125 мм	0,1 мм	2	$\pm 0,05$ мм
2.	Индикатор часового типа	ИЧ	577-84	0-10 мм	0,01 мм	2	$\pm 0,005$ мм
3.	Головка измерительная рычажно-зубчатая	ИГ	18833 - 90	0 – 1 мм	0,001 мм	2	$\pm 0,0004$ мм
4.	Динамометр сжатия образцовый	ДОСМ 3-1	9500 - 84	0-30кН	0,013 кН	1	$\pm 1,5\%$
5.	Микрометр	МТ	6507 - 90	0 – 25 мм	0,01 мм	2	$\pm 0,004$ мм
6.	Тахометр	ИО-30	21339-82	0-30000 об/мин	2 об/мин	2	± 2
7.	Профилограф	NewView600 SWLI		-	0,001мм	1	$\pm 3,0\%$
8.	Динамометр	ДОР-3-0,1И ГОСРЕЕСТР РФ №27202-09		10-100Н	0,02 Н	3	$\pm 0,2\%$

Приведенные данные о рабочих параметрах применяемого оборудования и достаточный диапазон метрологических характеристик средств измерения показывают, что разработанная методика дает возможность полностью решить, все поставленные в диссертационной работе исследовательские задачи.

3.3 Экспериментальные образцы

Одной из основных частей исследовательского триботехнического комплекса являются применяемые образцы с покрытиями из полимерных композиционных материалов [154]. Они представляют собой комплект их двух полувтулок (Рисунок 3.6, а), выполненных из стали 45 (ГОСТ 1050 - 2013) с нанесенным на внутреннюю поверхность антифрикционным полимерным композиционным покрытием.

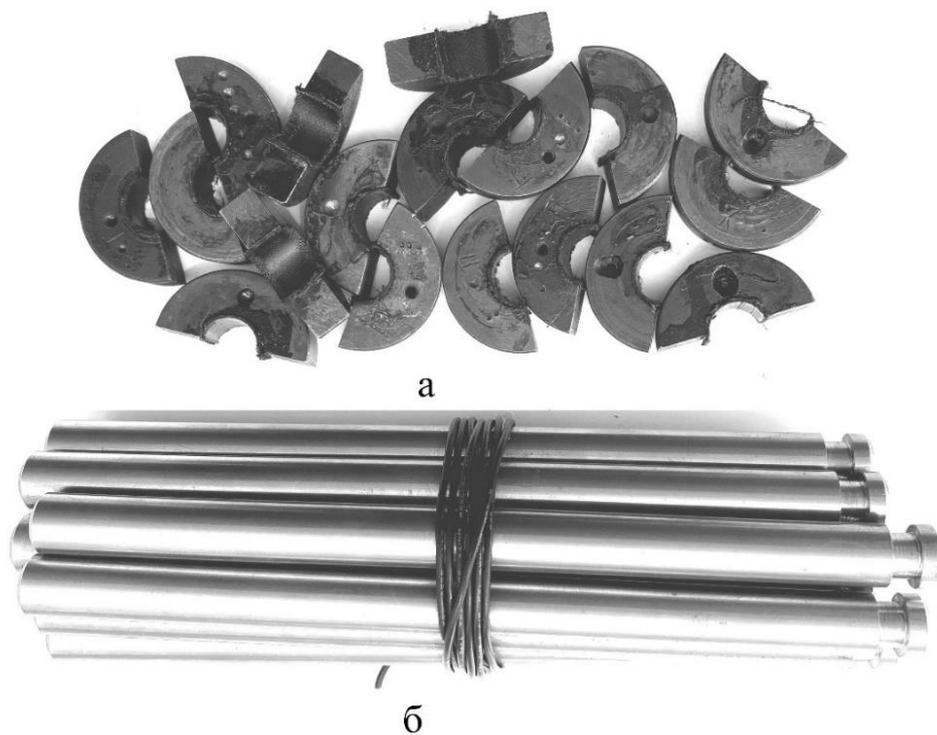


Рисунок 3.6 – Используемые образца (а) и контртела (б)

Эскизы образцов и контртел представлены на рисунке 3.7. Рабочая поверхность контртел полирована до 11 класса шероховатости.

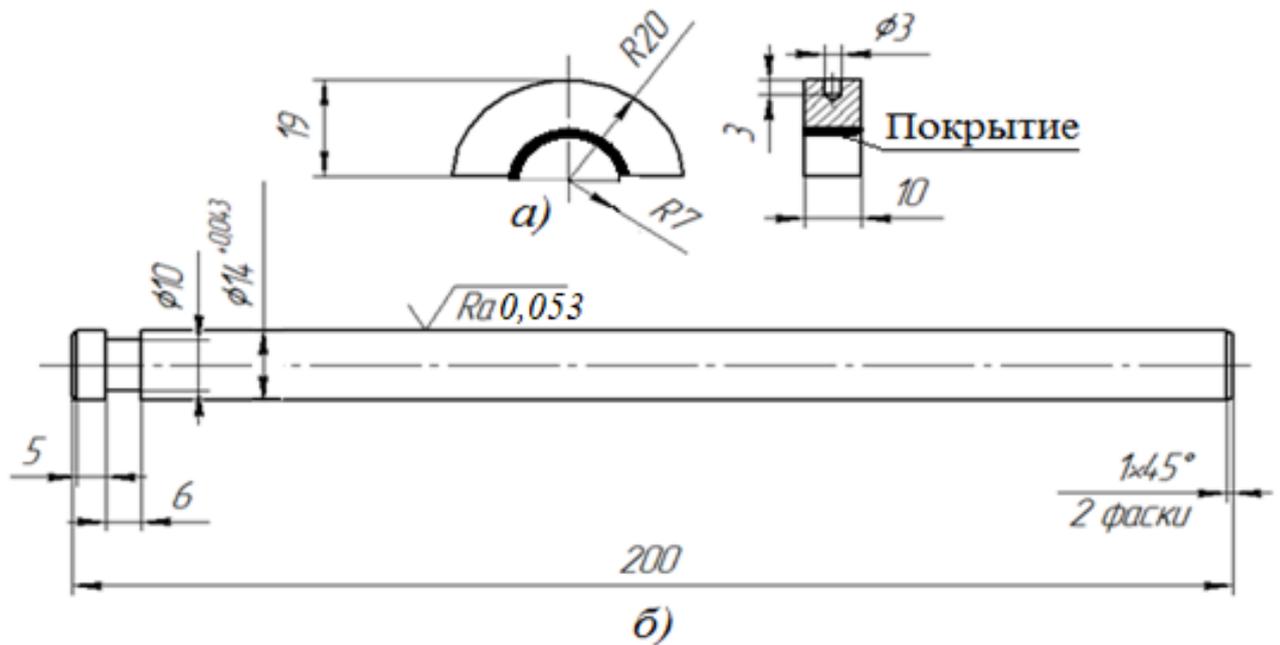


Рисунок 3.7 – Исследуемая пара трения: а) образцы, б) контртела

Серийно выпускаемые специальные технические ткани (таблица 3.4) служат армирующей и функциональной компонентой антифрикционного композита. Они состоят из фторопластовых нитей «полифен» (ТУ6-06-9-7-81) и полиимидные нити «аримид -Т» (ТУ6-06-9-11-80).

В работе исследуются антифрикционные композиционные покрытия с тканями армирующими каркасами в виде полуторослойной саржи 1/3 и однослойной саржи 1/1, а также полуторослойным двууточным шестиремизным неправильным атласом различной толщины.

Таблица 3.4 – Тканые армирующие каркасы композиционных покрытий

№ п/п	Тип ткацкого переплетения	Артикул	Технические условия ВНИИПХВ	Толщина, мм
1	Двууточная полуторослойная саржа 1/3 (клетка)	5384/3 - 80	278 – 81	0,48 ±0,003
2	Саржа 1/1 (полотно)	5386/1 - 80	277 – 80	0,33±0,002
3	Двууточный шестиремизный	5387/2 – 79	268-80	0,544±0,004
4	неправильный атлас	5392=81	300-83	0,229±0,002

Полуторослойная двууточная саржа 1/3 имеет основу и верхний уток из фторопластовых нитей, а нижний уток из – полиимидных. Причем, верхний уток и основа включают нити из арамида-Т с шагом \approx 6мм.

Ткани атласного плетения имеют основу и верхний уток из фторопласта. В однослойную саржу 1/1 полотнянного плетения фторопластовые нити вводятся скруткой с нитями из арамида. Таким образом, фторопласт, играющий роль смазочного материала, вводится в композит при помощи ткацких переплетений. Поскольку фторопласт практически не имеет адгезии к матричному связующему, то, для фиксации покрытия на субстрате адгезивом, на изнаночную поверхность ткани выводят арамид-Т.

Каркас атласного плетения при покрытии матричным связующим из-за отсутствия адгезии у фторопласта имеет «низкую» матрицу (почти чистый фторопласт) на рабочей поверхности.

Для того, чтобы увеличить износостойкость композита за счет повышения матричного слоя на всю толщину покрытия, на лицевую поверхность саржи 1/3 выводится сетка из полиимидных нитей (рисунок 3.8), а нити фторопласта по возможности убирают с изнанки, которая приклеивается. Тканые каркасы из описанных материалов приведены на рисунке 3.8.

Однослойная саржа 1/1 плотно имеет одну основу и один уток. В связи с этим ввести фторопласт в каркас композита только ткацким переплетением невозможно. В этом случае предварительно скручивают нити фторопласта с нитями арамида (200 круток/м), а затем из крученых нитей одинаковых для основы и утка изготавливают ткань. Однослойная саржа представляет собой полотно, которое не имеет лица и изнанки и может приклеиваться или работать в подшипнике любой стороной. Каркас из однослойной саржи приведен на рисунке 3.8 б.

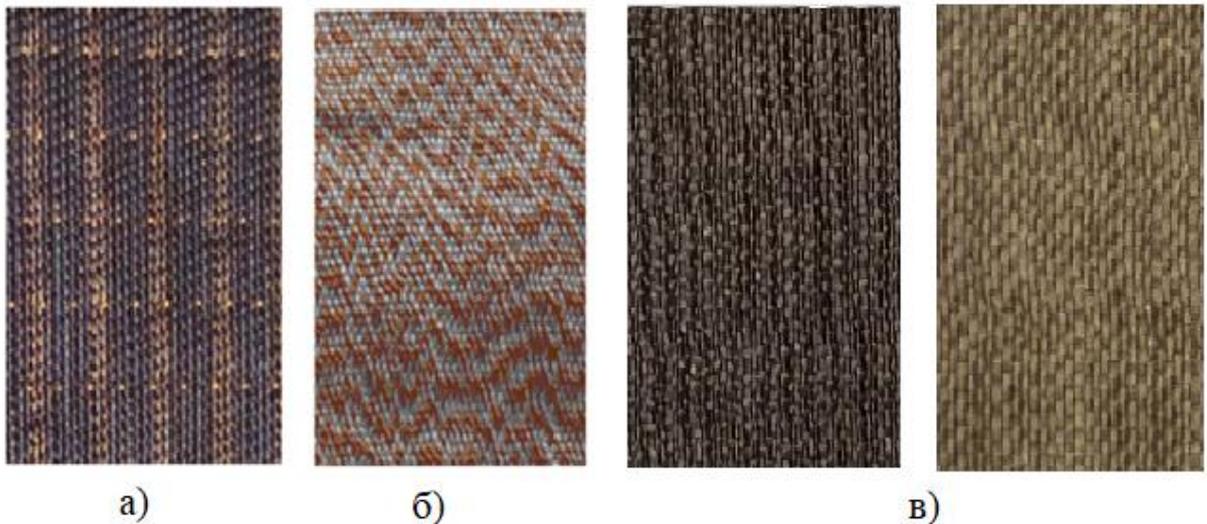


Рисунок 3.8 –Тканые каркасы антифрикционных композитов ($\times 3$): а) рабочая поверхность полторослойной двууточной саржи 1/3, б) поверхность однослойной саржи 1/1, в) рабочая поверхность и изнанка атласа

Полторослойный двууточный шестиремизный неправильный атлас имеет наибольшую процент фторопласта, толщину и демпфирующую способность.

Матричным связующим композита и одновременно адгезивом для его закрепления на субстрате, является специальное связующее марки АФК 101 (старая марка ГИПК-114). Оно представляет собой растворный адгезив на основе фенольной смолы СФ3021К (ГОСТ18694-2017), модифицированной термостойким каучуком ГЕН-150В (ОСТ6-05-5101-78), растворенный в смеси ацетон (ГОСТ 2768-84) – этилацетат (ГОСТ 8981-78) в соотношении 1:1. В качестве антиоксиданта используется оксихинолин-орто (ГОСТ 5847-76).

Наиболее технологичным является использование препрега – ткани пропитанной неотвержденным раствором связующим, высушенным от растворителей. После пропитки ткани сушатся вначале на воздухе (24 часа), затем, при температуре $80 \pm 5^{\circ}\text{C}$, в сушильном вакуумном шкафу 2 часа или без вакуума – 24 часа.

Для нанесения рассматриваемого покрытия на образцы используется специальное приспособление (Рисунок 3.9). Рекомендуемыми режимами отверждения матричного связующего является температура $200 \pm 5^{\circ}\text{C}$ и

давление 1,5–2 МПа. Для фиксации препрега на рабочей поверхности образца или узла трения применяется своеобразная пресс-форма, сформированная из деталей, на которые наносится покрытие. Для защиты поверхностей от адгезива используется мыльная эмульсия или фторопластовая пленка.

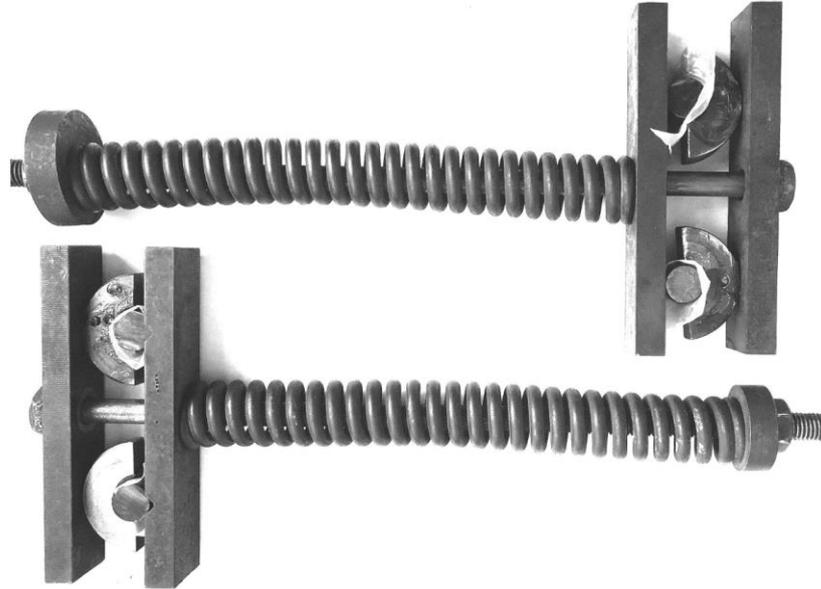


Рисунок 3.9 – Приспособление для нанесения покрытия на образцы

Приспособление с помощью тарированной пружины обеспечивает требуемую нагрузку отверждения и в сборе с образцами и контртелами, покрытыми антиадгезионной пленкой, устанавливается в термошкаф.

Технология нанесения покрытия при использовании препрега осуществляется в несколько этапов.

1. Подготовка поверхности субстрата.

Поверхность зашкуривают наждачной бумагой Ф14А-25НМ, обезжиривают нефрасом (ТУ 38.401-67-108-92), сушат на воздухе, протирают ацетоном (ГОСТ 2768-84) и еще сушат.

2. Нанесение связующего АФК-101.

Связующее наносят не менее чем в 2 слоя из расчета 35 г на 1м². Каждый слой сушат при температуре (23 ± 2)⁰С в течение (1 ± 0,1) часа.

3. Сборка технологического пакета.

Препрег укладывают изнаночной приклеиваемой стороной на субстрат с нанесенным связующим и придавливаются резиновым валиком. Поверх

препрега укладывают фторопластовую пленку (ТУ 6-11-5751-766-1-88).
Поверх пленки – оправку, формующую поверхность.

4. Формирование антифрикционного покрытия.

Собранный пакет отверждают при давлении 0,15 – 0,20 МПа и температуре 200⁰С. При достижении температуры 200⁰ С, обычно через 15 – 20 минут, давление увеличивают до 1,5-2,0 МПа и выдерживают при этих условиях не менее 3 часов.

Таблица 3.5 – Материалы контртел

№ п/п	Марка материала	ГОСТ	Модуль, 2×10^5 МПа	Прочность, σ_v , МПа	Относител. удлинение, δ , %
1	Сталь 45	1050 - 2013	2,06	840	12
2	Титановый сплав ВТЗ-1	26492 - 85	1,15	1150	12
3	Сталь 14X17H2	5949 - 75	2,06	1280	16

В качестве материалов для контртел, выполненных в виде валиков (Рисунок 3.8, б) с выточкой для закрепления в обойме, применялись распространенные в трибосистемах машиностроительные материалы (см. таблицу 3.5). Контртела из сталей 45 и 30ХГСА прошли термообработку.

Для исследования влияния шероховатости поверхности, контртела подвергались шлифованию и полировке, что позволило обеспечить требуемую величину шероховатости в диапазоне Ra = 0,053-0,063мкм (8-й класс). База испытаний варьировалась в зависимости от условий экспериментов и составляла 5 – 10 часов.

3.4 Планирование исследований и обработка результатов

Достоверность полученной информации, тип математических регрессионных моделей и графическая наглядная интерпретация экспериментальных результатов достигается путем правильного выбора рационального плана исследований и дальнейшей статистической обработки результатов.

Каждый из блоков исследований (см. таблицу 3.1) состоит из многофакторных двухуровневых и однофакторных классических

экспериментальных серий. Графики регрессионных моделей строились не менее как по 4 – 5 точкам. Все эксперименты выполнялись с 3 - 5 параллельными опытами для классических схем и 4 – 6 – для полнофакторных планов.

В результате анализа итогов изучения литературных источников [132,155,156], в которых описаны результаты исследований подобных композиционных полимерных покрытий или их аналогов, было установлено, что регрессионные модели триботехнических характеристик этих материалов в исследованном диапазоне переменных факторов близки линейным. Это говорит о близости линейному закону характера их изменений и позволяет использовать линейные планы многофакторных экспериментов [157]. Для повышения статистической однородности выходных данных они логарифмировались. Это позволяет получать мультипликативные модели с членами, показательных или степенных функций [158,159].

Кроме того, полученные модели могут развиваться увеличением числа переменных факторов. Используемые полнофакторные двухуровневые и трехуровневые планы оптимальны, рототабельны и ортогональны [160].

Таким образом, их применение ортогональных задач позволяет получать адекватные и регрессионные модели. Исходные переменные факторы для их реализации приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Исходные параметры полнофакторных экспериментальных планов

Переменные факторы			Уровни варьирования			Интервал варьирования
Наименование	Обозначение	Размерность	Нижний	Средний	Верхний	
Нагрузка	σ	МПа	5	13,5	22	8,5
Скорость	V	м/с	0,12	0,195	0,27	0,2775
Квз. перекрытия	$K_{ВЗ}$	б/р	0,167	0,3215	0,476	0,075
Факторы качественного типа						
Тип покрытий		Атлас, Саржа 1/1, Саржа 1/3				
Материал контртел		Сталь 45, 14X17H2; Титановый сплав ВТ 3 - 1				

Последовательность статистической обработки выхода многофакторных экспериментов состоит из следующих основных этапов:

- 1) расчет среднего, строчных дисперсий, дисперсии воспроизводимости;
- 2) оценка статистической однородности результатов по соотношению расчетного и табличного критерия Кохрена;
- 3) расчет линейных коэффициентов уравнения регрессии;
- 4) оценка значимости коэффициентов регрессии;
- 5) получение моделей в кодовых переменных;
- 6) получение моделей в натуральных переменных;
- 7) оценки адекватности моделей;
- 8) графическая интерпретация модели.

Достоверность всех переменных статистических критериев (Кохрена, Стьюдента, Фишера) соответствует с достоверностью 95% [161,162]. Наглядное графическое представление экспериментальных результатов, полученных ПФЭ 2^k , было выполнено при двух переменных в виде пространственных графиков [157], а при трех переменных – методом двумерных сечений [157].

Сравнительные исследования влияния на эксплуатационные характеристики изучаемых металлополимерных сопряжений переменных факторов качественного типа выполнялись при одинаковом количестве параллельных опытов и их статистической обработке.

По результатам классических однофакторных исследований были получены регрессионные модели методом наименьших квадратов [162,163]. Для них были рассчитаны стандартные статистики [157,161,164]. Далее модель переводилась в относительные единицы и совмещалась с развивающимися моделями, полученными по многофакторным экспериментальным планам. Это позволило получить многофакторные интерполяционные модели.

В итоге была реализована комплексная методика организации экспериментальных исследований в виде двух базовых блоков, включающая стендовое оборудование, образцы рассматриваемых металлополимерных трибосистем, структуру и последовательность реализации экспериментальных планов, а также статистическую обработку их результатов.

Разработанная и реализованная методика обеспечила корректное решения всех поставленных в работе экспериментальных задач.

4 ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРИБОСИСТЕМ

Ведущим требованием к металлополимерным трибосистемам, независимо от типа применяемого движения, является надежное обеспечение ими требуемого ресурса в стационарном периоде эксплуатации, что, в первую очередь, достигается разработкой конструкции трибоконтакта, включающей выбор используемых материалов и установление требований к металлической поверхности. Далее определяются рациональные условия приработки – основа реализации наибольшего ресурса. Заключительным этапом исследований является выявление перспективной области нагрузочно-скоростных режимов последующей эксплуатации трибосистем. Причем, основной вклад в износостойкость рассматриваемых трибосистем определяется работоспособностью антифрикционных фторопластсодержащих покрытий.

4.1 Конструкция металлополимерных трибосистем

Применение композиционных металлополимерных фторопластсодержащих трибосистем в условиях возвратно-поступательного движения исследуется впервые. Учитывая известную [165,166] связь конструктивных параметров рассматриваемых трибосистем с эксплуатационными условиями, необходимо адаптировать к ним конструкцию пары трения.

В связи с высокой многоплановостью и чувствительностью комплекса физико-механических характеристик полимерных материалов (жесткости, прочности, износостойкости) к ряду режимных параметров (нагрузке, скорости, температуре) решение этой проблемы лежит в области экспериментальных исследований, которой и посвящен настоящий раздел.

Так как в подавляющем большинстве механизмов современных машин имеется существенный резерв мощности, компенсирующий потери на трение, в качестве основного критерия адаптации конструкции трибосистемы к

эксплуатационным условиям выбираем не коэффициент трения, а параметры изнашивания.

Армирующей компонентой антифрикционного композиционного полимерного покрытия исследуемой трибосистемы является полторослойная техническая ткань, прочный уток которой должен совпадать с направлением вектора скорости [15,167]. Для поступательного движения, в связи с ростом перемещений за рабочий цикл, это важнее, чем для вращательного или качательного [168, 169]. При этом след механической обработки контртела (траектория движения режущего инструмента) ориентирован перпендикулярно вектору скорости втулки с покрытием. В этом случае движение выполняется поперек следа обработки, что эквивалентно повышению шероховатости поверхности в 2 – 4 раза [170]. Последнее обстоятельство увеличивает деформацию и износ покрытия, способствуя снижению его ресурса [170,171, 172]. Следовательно, возрастает степень влияние на работу покрытия типа плетения ткани и объема фторопласта.

Кроме того, механизм смазочного действия фторопласта основан на переносе фрагментов его макромолекул на поверхность контртела, адгезионного закрепления их и постепенного уноса из зоны трения [171]. Перемещение контртела поперек следа обработки и увеличение пути трения за цикл нагружения способствуют повышенному расходу фторопласта как смазочного материала.

Высокая чувствительность полимерных материалов к температуре требует учета теплофизических характеристик металла контртел как средства отбора тепла, генерируемого в процессе трения.

При коэффициенте взаимного перекрытия меньше единицы с одной стороны, уменьшение коэффициента перекрытия снижает тепловой поток, идущий в покрытие, с другой – увеличение пути трения способствует общему повышению генерации тепла. Следует отметить также и несовпадение движения со следом обработки.

Сравнительные экспериментальные исследования материала контртел проводились на испытательном стенде при следующих режимах: контактная нагрузка $\sigma = 13,4\text{МПа}$, скорость $V = 0,195\text{м/с}$, коэффициент взаимного перекрытия. $K_{вз} = 0,167$. В качестве испытуемых материалов использовалась как авиационные материалы, так и широко применяемая сталь 45. Полученные экспериментальные результаты сведены в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Экспериментальные данные

№	Марка материала	Темпер. °С	Приработка		Работа	
			$h_{пр.}$, мм	$t_{пр.}$, мин	h_{max} , мм	t_{max} , мин
1	Сталь 45	132	0,101	31,5	0,161	240
2	Сталь 14X17H2	135	0,121	33,5	0,176	
3	Титановый сплав ВТ 3-1	152	0,127	37,5	0,203	

Расчет триботехнических параметров здесь и в дальнейших исследованиях выполнялся по следующим зависимостям для стационарной скорости изнашивания в 10^3 мм/мин

$$V_{из} = \frac{h - h_{пр}}{t_o - t_{пр}}, \quad (4.1)$$

для общего ресурса в циклах нагружения

$$R_{ц} = \left(\frac{\delta^* - \delta_{\infty} - h_{пр}}{V_{из}} + h_{пр} \right) \cdot n, \quad (4.2)$$

для интенсивности изнашивания в 10^8

$$I = \frac{\delta^* - \delta_{\infty}}{2LR_{ц}}. \quad (4.3)$$

В формулах обозначено:

δ^* – толщина покрытия,

$h_{пр}, h$ – приработочный и общий износ покрытия,

$t_o, t_{пр}$ – общее время и время приработки,

δ_{∞} – вязкоупругая деформация в диаметральном сечении [133],

n – частота вращения кривошипа,

L – длина хода в одном направлении.

Результаты выполненных расчетов триботехнических параметров исследуемых металлополимерных трибосистем приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Расчетные данные

№	Скорость изнашивания, $V_{из} \cdot 10^{-3}$ мм/мин	Ресурс, $R_{ц}$ · циклов	Интенсивность изнашивания, $I \cdot 10^{-8}$
1	0,288	87454,3	3,693357
2	0,382	64006,9	5,030708
3	0,405	54415,9	5,770372

Полученные результаты представлены графически в виде столбчатых диаграмм на рисунке 4.1.

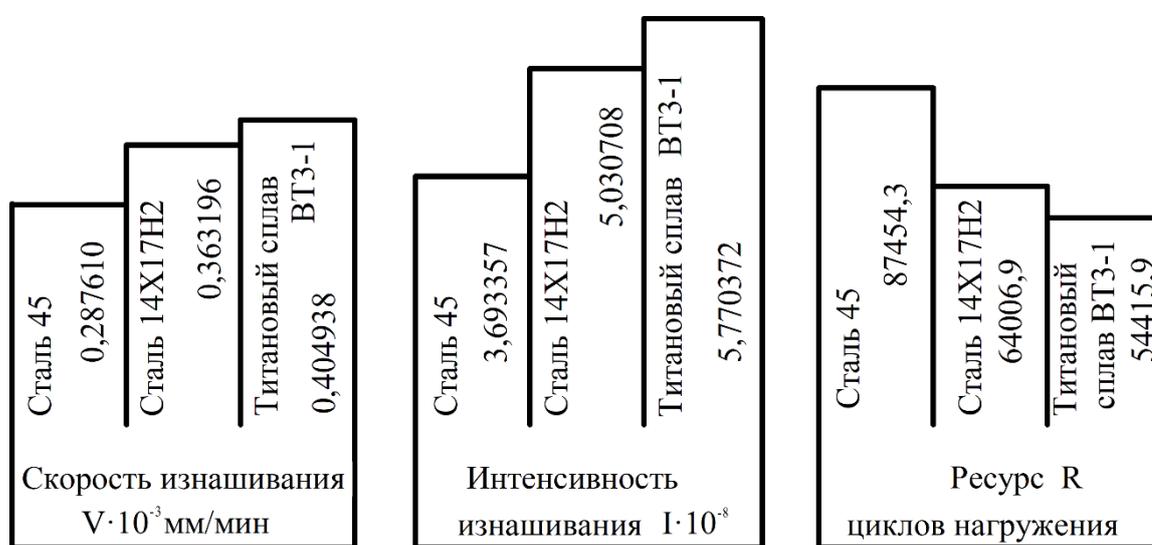


Рисунок 4.1 – Зависимость эксплуатационных параметров металлополимерных трибосистем от материал контртел

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие заключения. Соотношение всех приведенных трибохарактеристик металлополимерной трибосистемы, исследуемой при возвратно-поступательном движении, свидетельствует о влиянии материала контртел на эти параметры в среднем более чем на 50% (43,6 – 60,7). Основное воздействие оказывает температура трибосистем, различающаяся на 24,3%. Ее уровень определяется скорее теплоемкостью, чем теплопроводностью. Так, практически равная теплоемкость сталей 45 и 14X17H2 (см. таблицу 2.5) обеспечивает и близкую по величине температуру, хотя теплопроводность этих материалов различается почти в 3 раза. А теплоемкость титанового

сплава в сравнении со сталями повышается на 12%, что увеличивает температуру примерно на ту же величину.

Таким образом, снижение температуры при возвратно-поступательном движении обеспечивается в основном отбором тепла в контртело, а не диссипацией в окружающую среду через его поверхность.

В связи с тем, что прочность и жесткость полимерного композита покрытия на порядок меньше этих свойств металлического контртела шероховатость поверхности последнего существенно влияет на все эксплуатационные параметры рассматриваемой металлополимерной трибосистемы. Степень этого влияния установлена при вращательном движении [172]. Однако специфика возвратно-поступательного движения придает фактору шероховатости еще большее значение, требуя дополнительных исследований.

Установление влияния шероховатости контртел металлополимерной трибосистемы выполнялось на образцах из стали 45 при тех же режимах эксплуатации что и предыдущий экспериментальный блок. Диапазон варьирования параметра Ra составлял 0,053 – 2,92 мкм, что соответствовало 11–5 классу шероховатости. Следует отметить, что нижнее ограничение устанавливает границу применимости рассматриваемых трибосистем. Отметим, что при $Ra = 4,25$ мкм (также 5 класс) ресурс трибосистемы при тех же режимах составлял всего 5 минут.

Результаты расчета триботехнических параметров, выполненные по экспериментальным данным ($V = 19,5$ м/с, $\sigma = 14,2$ МПа) приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Расчет влияния шероховатости на трибопараметры

Ra , мкм	0,053	0,19	0,89	2,92
$V_{из} \cdot 10^{-3}$, стац. мм/мин	0,162	0,196	0,398	2,704
$I \cdot 10^{-8}$	1,79	2,382	4,421	50,593
$R_{ц}$, цикл.	184296,5	138549,5	74637,8	6529,5

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований позволила получить регрессионные модели в виде показательных функций следующего вида.

Для скорости изнашивания покрытия в 10^3 мм/мин

$$V_{\text{из}} = 0,152 \cdot 2,642^{Ra} , \quad (4.4)$$

Для интенсивности изнашивания покрытия в 10^8

$$I = 1,738 \cdot 3,149^{Ra} , \quad (4.5)$$

Для общего ресурса трибосистемы в циклах нагружения

$$R_{\text{ц}} = 188911,3 \cdot 0,319^{Ra} . \quad (4.6)$$

Средние погрешности приведенных моделей равны соответственно 6,1%, 6,2%, 5,9%.

В связи со значительной величиной диапазона варьирования параметров выхода, при графической интерпретации результатов, применяется логарифмический масштаб. График зависимостей всего комплекса выходных параметров представлен на рисунке 4.2.

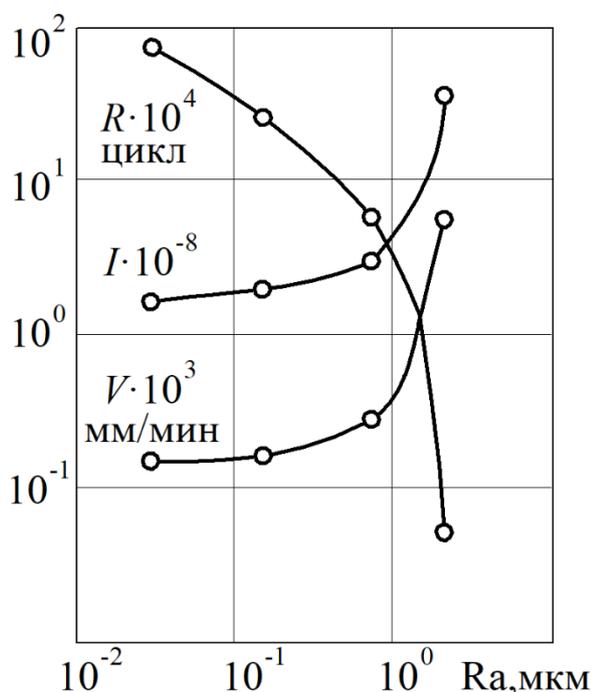


Рисунок 4.2 – Зависимость эксплуатационных параметров металлополимерных трибосистем от шероховатости рабочей поверхности контртел

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что интенсивность влияния шероховатости рабочей поверхности металлического контртела на полимерное покрытие при возвратно-поступательном движении существенно интенсивнее, чем при вращательном движении. Так, сравнение с покрытиями, работающими при вращательном движении показывает, что, несмотря на рост параметра PV в 2,35 раза, предельное значение величины Ra ограничена 0,6 мкм [172], а в нашем случае оно не должно превышать 0,2 мкм.

Следовательно, трибосистемы с рассматриваемыми полимерными покрытиями для исследуемых условий эксплуатации необходимо комплектовать контактирующими с ними деталями, рабочая поверхность которых обработана до шероховатости, соответствующей не менее чем 9 классу.

Все основные триботехнические характеристики исследуемых трибосистем определяются объемом фторопластовых нитей и их распределением по сечению композита. Но следует отметить, что прочностные и адгезионные свойства покрытий, позволяющие фторопласту работать, выполняя функции смазочного материала, обеспечиваются полиимидными нитями. Опыт эксплуатации исследуемых композиционных покрытий, позволил оптимизировать баланс конструктивных и технологических свойств, реализовавшись в специальных тканях – каркасе антифрикционных покрытий.

В работе исследуются трибосистемы с покрытиями из четырех полимерных фторопластсодержащих композитов с различными тканными каркасами. Это полторослойный двууточный шестиремизный атлас толщиной 0,544 мм с наибольшим количеством фторопласта и высоким ресурсом, идентичная по плетению ткань, но толщиной 0,229 мм используется для малогабаритных трибосистем; полторослойная двууточная саржа 1/3 применяется для высоких нагрузок, а однослойная саржа 1/1 для наиболее жестких покрытий.

Экспериментальные исследования покрытий на основе этих каркасов проводились при указанных выше нагрузочно-скоростных режимах. Полученные результаты представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Экспериментальные данные

№	Каркас покрытия	Толщина, мм	Приработка		Работа	
			$h_{пр}$, мм	$t_{пр}$, мин	h_{max} , мм	t_{max} , мин
1	Атлас	0,544	0,101	31,5	0,126	120
2		0,229	0,063	59,5	0,081	105
3	Саржа 1/3	0,48	0,085	38,0	0,105	150
4	Саржа 1/1	0,33	0,080	17,5	0,090	55

Результаты расчета триботехнических характеристик, выполненные по экспериментальным данным приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Параметры работы покрытий

№	Скорость изнашивания, $V_{из} \cdot 10^{-3}$ мм/мин	Ресурс, $R_{ц}$ циклов	Интенсивность изнашивания, $I \cdot 10^{-8}$
1	0,288	87454,3	3,693357
2	0,387	39611,6	4,569368
3	0,179	125592,6	2,261287
4	0,267	39465,5	4,358237

Графическая интерпретация полученных результатов представлена диаграммами на рисунке 4.3.

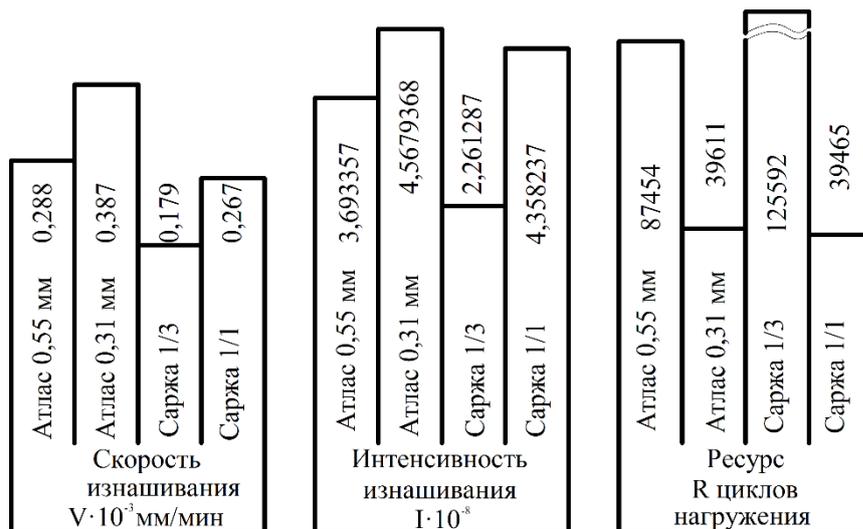


Рисунок 4.3 – Влияние армирующей компоненты композита на эксплуатационные параметры металлополимерных трибосистем с фторопластсодержащим покрытием

Анализ полученных результатов позволяет рекомендовать в качестве армирующего каркаса композиционных антифрикционных покрыти, работающих в условиях возвратно-поступательного движения, два материала: атлас толщиной 0,544 мм и саржу 1/3.

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 класса шероховатости.

Таким образом, на основе комплекса экспериментальных исследований выполнена адаптация конструктивных параметров металлополимерных фторопластсодержащих трибосистем с композиционными полимерными антифрикционными покрытиями для работы в узлах трения с возвратно-поступательным рабочим движением.

4.2 Прирабочные параметры

В этом подразделе представлены результаты экспериментальных исследований работы металлополимерных трибосистем с полимерным композиционным фторопластсодержащим самосмазывающимся покрытием в процессе нестационарного прирабочного периода. Приводятся данные, полученные при эксплуатации трибосистем в режиме граничного трения, при смазывании фторопластом в условиях возвратно-поступательного движения.

Описанные условия трения характеризуются целым рядом особенностей триботехнического контакта, влияющих на весь комплекс эксплуатационных характеристик исследуемых трибосистем. К этим характеристикам необходимо отнести следующие.

Первой кинематической особенностью возвратно-поступательного движения является переменная величина скорости, которая за каждый цикл дважды изменяется от нуля до максимума (см. рисунок 3.2). Величина скорости в трибосистеме наиболее сильно влияет на контактную температуру. В связи со сравнительно низкой теплостойкостью полимерного покрытия контактная

температура в зоне трения, а, следовательно, и скорость должны быть ограничены. Однако скорость достигает максимума только в центральной части полуцикла движения. Это снижает термонагружение и позволяет в дальнейшем оперировать средней скоростью.

Второй значимой особенностью трибоконтакта является, отмеченное выше, направление вектора скорости рабочего движения металлического контртела относительно полимерного покрытия. Это обстоятельство значительно усиливает влияние микронеровностей поверхности металлического контртела даже при низкой общей его шероховатости.

Третья особенность контактирования – это наличие коэффициента взаимного перекрытия меньше единицы ($K_{вз} < 1$) [173]. С одной стороны, большая площадь контртела и его масса снижают температуру зоны трения [15,167], способствуя росту теплоотдачи в окружающую среду, что сохраняет уровень физико-механических свойств покрытия и повышает эксплуатационный ресурс. С другой стороны, значительный рост длины хода и вызванное этим увеличение работы силы трения повышает температуру контакта.. Кроме того, увеличивается износ фторопласта, реализуемый в виде его постепенного переноса на относительно большую поверхность контртела. Параллельное течение этих процессов может заметно изменять температуру как в сторону увеличения, так и в сторону снижения. То же самое произойдет и с износостойкостью покрытия.

Прирабочный нестационарный период является одним из важнейших этапов взаимной адаптации контактных поверхностей, определяющий уровень последующей эксплуатации трибосистемы. По данным работы [174,175] нарушение режима приработки приводит к снижению ресурса трибосистемы на 20 % и более

Приработка металлополимерной фторопластсодержащей пары практически полностью протекает в полимерном покрытии, имеющем в сравнении с металлическим контртелом на порядок меньшую жесткость и прочность.

Процесс приработки покрытия состоит из следующих основных последовательных этапов: разрушения наружной пленки матричного связующего, вязкоупругой деформации с ростом площади фактического контакта, аморфизации волокнистых фторопластовых структур, его переносом на контртело и уносом фрагментов пленки переноса из зоны трения [171].

Экспериментальные исследования реализованы по двухуровневому трехфакторному плану с четырьмя параллельными опытами [176]. Полученные, после статистической обработки результатов, регрессионные модели описывают зависимость приработочных характеристик от экспериментальных режимов. Для компенсации некоторой нелинейности моделей использовались логарифмы выхода.

Учитывая вязкоупругую деформацию полимерных материалов под рабочей нагрузкой, трибологические исследования начинали только после часового статического нагружения покрытия на испытательном стенде. По данным работы [177] за это время процесс ползучести практически завершается (на 97%).

Регрессионные модели приработочных параметров, представлены однотипной структурой и имеет следующий вид:

для времени приработки

$$t_{\text{пр}} = 10^{1,283} \cdot \sigma^{-0,156} \cdot \text{Квз}^{-0,136} \cdot V^{0,404}, \text{ мин}; \quad (4.7)$$

для приработочного износа

$$h_{\text{пр}} = 10^{-0,0063} \cdot \sigma^{-0,448} \cdot \text{Квз}^{-0,138} \cdot V^{2,102-1,124 \lg \sigma}, \text{ мм}, \quad (4.8)$$

где σ – контактные нормальные напряжения, МПа;

V – средняя скорость скольжения, м/с;

Квз – коэффициент взаимного перекрытия.

Модели адекватны и обеспечивают интерполяционные расчеты в пределах погрешности 2,6 % – 4,9%.

Характерной особенностью полученных зависимостей является отсутствие смешанных взаимодействий (нагрузка, скорость) при определении времени приработки и их наличие, при получении модели приработочного износа. Объяснение этого факта в том, что время приработки является следствием приработочного износа, величина которого определяется параметрами трибоконтакта узла трения.

Количественный анализ влияния переменных факторов на выходные параметры представлен виде таблиц 4.6-4.13. В таблицах выделен диапазон варьирования тех факторов чье среднее влияние на результаты исследований устанавливается. Расчеты усреднены по всему диапазону отклика факторного пространства.

Результаты проведенного количественного анализа полученной модели времени приработки (4.7) позволили установить процентный вклад каждого переменного фактора в величину выходного параметра (см. таблица 4.6).

Таблица 4.6 – Влияние переменных факторов на время приработки

Диапазон переменных факторов			Изменение времени приработки, %		
Коэф. взаим. перекрытия	Нагрузка, σ МПа	Скорость, V м/с	от Квз	от σ	от V
0,167 – 0,476	5 – 22	0,12 – 0,27	– 13,2	– 20,6	–28,2

Знак минуса здесь (в таблице 4.6) и далее показывает, что выходной параметр (время приработки) уменьшается с ростом переменных факторов.

Анализ табличных данных доказывает, что влияние всех переменных факторов во всей исследованной области их варьирования обеспечивает снижение времени приработки. Наименьшее влияние на время приработки оказывает коэффициент взаимного перекрытия, среднее – нормальная контактная нагрузка и максимальное – скорость скольжения, влияние которой в 2,13 раза больше вклада контактной нагрузки и в 1,36 раза больше вклада коэффициента взаимного перекрытия. Влияние нормальной контактной нагрузки больше коэффициента взаимного перекрытия в 1,56 раза.

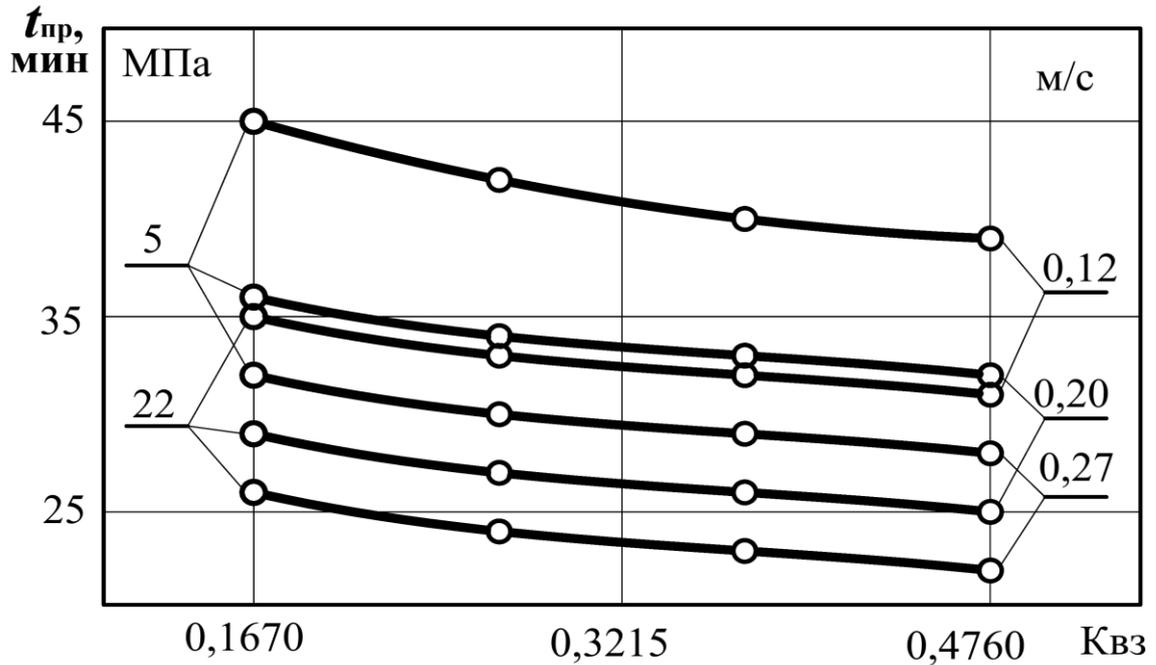


Рисунок 4.4 – Зависимость времени приработки от нагрузочно-скоростных режимов

График регрессионной модели зависимости времени приработки от коэффициента взаимного перекрытия (4.7) представлен на рисунке 4.4. Он наглядно демонстрирует взаимодействие всех переменных факторов.

Значительное превышение влияния скорости на время приработки по отношению к влиянию других переменных факторов дополнительно подтверждается еще и тем, что наибольшее воздействие скорости сохраняется несмотря на то, что диапазон ее варьирования (0,27...0,12 м/с) почти в 2 раза меньше диапазона варьирования нагрузки (22...5 МПа) и в 2,8 раза меньше варьирования коэффициента взаимного перекрытия (0,167 – 0,476).

Таким образом, установлено, что в исследованной металлополимерной трибосистеме наибольший вклад в снижение продолжительности времени приработки обеспечивается скоростью скольжения. Этот факт может быть объяснен тем, что скорость вносит наибольший вклад в генерацию температуры, к которой чувствительны полимерные материалы.

Далее рассматривается влияние переменных факторов на величину приработочного износа покрытия, которое имеет более важный и,

одновременно более сложный характер, чем время приработки. Величина износа влияет на рабочий зазор и определяет ресурс трибосистемы. Сложность зависимости прирабочного износа от суммы переменных факторов учитывается наличием в регрессионной модели (4.8) статистически значимого коэффициента при смешанном взаимодействии.

Результаты экспериментальных исследований влияния переменных факторов и оценка их вклада в величину прирабочного износа приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Влияние переменных факторов на прирабочный износ

Параметры режима трения			Изменения прирабочного износа, %	
Квз	V м/с	σ , МПа	Текущие	Средние
0,167 – 0,476	0,12 – 0,27	5 – 22	13,1	– 13,1
0,167 – 0,476	0,12 – 0,27	5	187,3	124,3
		22	61,3	
	0,12	5 – 22	136,6	84,7
	0,27		32,28	

Проанализировав таблицу 4.7, можно сделать нижеследующие выводы.

Рост коэффициента взаимного перекрытия Квз уменьшает величину прирабочного износа незначительно в среднем на 13,1%.

– При относительно малой нагрузке (5МПа) скорость влияет на прирабочный износ более, чем в 3 раза интенсивнее, чем при большей (22МПа).

– При низкой скорости (0,12м/с) нагрузка влияет на прирабочный износ в 4,23 раза интенсивнее, чем при более высокой (0,27м/с).

– Причем, по усредненным показателям, скорость влияет на износ интенсивнее коэффициента взаимного перекрытия почти в 9,48 раза и интенсивнее контактных напряжений почти в 1,45 раза.

Следовательно, на величину прирабочного износа, как и на время приработки наибольшее влияние оказывает скорость. Необходимо также отметить, что в исследованном диапазоне нагрузочно-скоростных режимов с

ростом скорости падает влияние нагрузки и наоборот – с ростом нагрузки еще интенсивнее снижается влияние скорости. Таким образом, в зависимости от сочетания режимов нагружения меняется величина выхода. График модели приработочного износа представлен на рисунке 4.5.

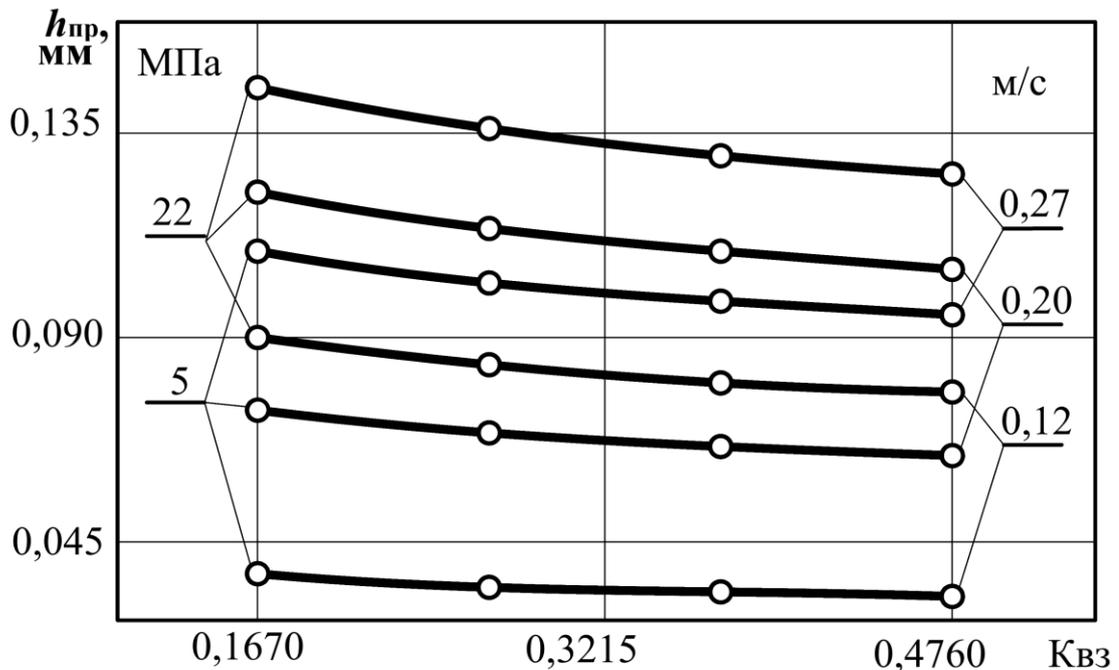


Рисунок 4.5 – Зависимость приработочного износа от исследуемых параметров

Сделанные выводы наглядно просматриваются на графике. Рост коэффициента взаимного перекрытия влияет на величину приработочного износа относительно слабо, но одинаково во всем диапазоне нагрузочно-скоростных режимов. С ростом нагрузки и скорости величина износа возрастает.

Общеизвестно, значительное влияние температуры практически на все эксплуатационные характеристики полимерных материалов, к которым относится исследуемое антифрикционное фторопластсодержащее покрытие.

В результате проведенных экспериментальных исследований было установлено влияние на рост температуры, генерируемой в зоне трения, нагрузочно-скоростных режимов и коэффициента взаимного перекрытия.

Статистическая обработка результатов позволило получить регрессионную модель следующего вида:

$$T = 10^{2,193} \cdot \sigma^{0,149} \cdot K_{ВЗ}^{-0,228} \cdot V^{0,583}, \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (4.9)$$

Модель не имеет статистически значимых смешанных взаимодействий. Она адекватна и обеспечивает среднюю погрешность в 4,1%. Влияние отдельных переменных факторов на температуру антифрикционного покрытия приведена в таблице 4.8

Таблица 4.8 – Влияния переменных факторов на температуру покрытий

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

Анализ регрессионной модели и табличных данных показывает, что рост режимных параметров приводит к росту температуры. Наиболее интенсивно на температуру влияет скорость. Увеличение температуры под действием скорости превышает в 2,82 раза ее снижение в результате влияния коэффициента взаимного перекрытия. Рост температуры при увеличении нагрузки также превышает в 1,16 раза ее снижение от коэффициента взаимного перекрытия. С ростом скорости температура возрастает на 60,4 %, а с увеличением нагрузки – на 24,8 %.

Коэффициент взаимного перекрытия меньше единицы, что характерно для возвратно-поступательного движения, значительно снижает температуру в зоне трения в результате перехода теплового потока на большее по площади и объему металлическое контртело с последующей диссипацией тепловой энергии. Это подтверждается экспериментально тем, что при увеличении, в исследованных пределах коэффициента взаимного перекрытия, температура падает для всех нагрузочно-скоростных режимов на постоянные 21,5%. График регрессионной модели температуры представлен на рисунке 4.6.

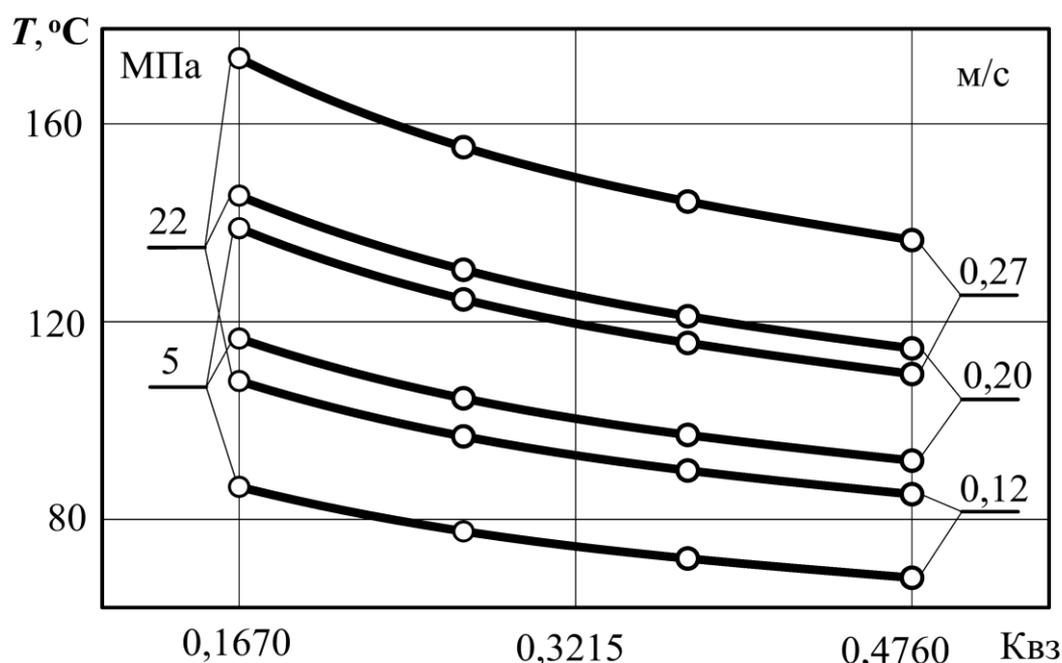


Рисунок 4.6 – Влияние нагрузочно-скоростных режимов на температуру в зоне трения

Экспериментальными исследованиями установлено, что в данном факторном пространстве температура в зоне трения увеличивается с ростом скорости в 2,44 раза интенсивнее, чем при росте контактных напряжений.

Гораздо меньшее влияние нагрузки объясняется малой жесткостью полимерного покрытия, которое, деформируясь под нагрузкой, увеличивает фактическую площадь трибоконтакта, снижающую уровень реальных нормальных напряжений и соответственно их влияние.

Поскольку температура, как результат воздействия на антифрикционное полимерное покрытие трибосистемы нагрузочно-скоростных режимов, оказывает наиболее значимое влияние на физико-механические свойства полимера, а, следовательно, условия контактирования и износные характеристики, установим непосредственную зависимость приработочных параметров от температуры. Для этого на основе экспериментальных исследований получим регрессионные модели этих параметров.

Учитывая, что влияние температуры трибоконтакта на параметры приработки рассматриваемой трибосистемы близко линейному, получим регрессионные модели следующего вида:

для приработочного износа

$$h_{np} = -0,02698 + 0,00105 \cdot T, \text{ мм}; \quad (4.10)$$

и для времени приработки

$$t_{np} = 47,76 - 0,1541 \cdot T, \text{ мин.} \quad (4.11)$$

Несмотря на линейную структуру полученные модели адекватны, а их применение допускает погрешность в 9,5 %. График моделей представлен на рисунке 4.7. Точки на графиках моделей соответствуют экспериментальным данным.

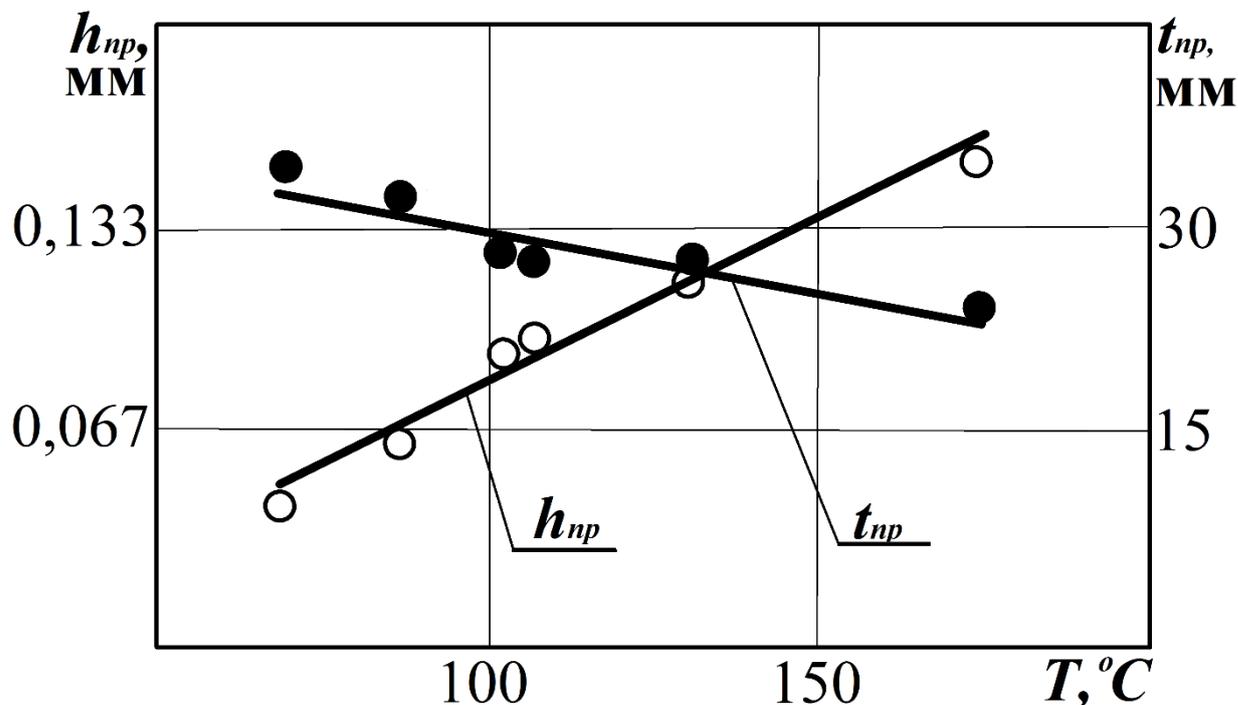


Рисунок 4.7 – Зависимость приработочных параметров композиционных фторопластсодержащих покрытий от температуры

Представленный объединенный график зависимости приработочных параметров полимерных покрытий от температуры наглядно показывает ее различие влияние на время приработки и величину приработочного износа. С ростом температуры износ увеличивается, а время приработки уменьшается.

Это дает возможность управлять параметрами приработки варьируя температурой.

В общем случае предпочтительно проводить низкотемпературную приработку, которая длится дольше, но перенос фторопласта на контртело с образованием пленки, то есть приработка требует относительно малого расхода фторопласта, что увеличивает ресурс. Сокращение времени приработки с ростом температуры выгодно в условиях технологической приработки на предприятии изготовителя, снижением трудоемкости.

Однако понижение от температуры прочностных свойств фторопласта и интенсификация всех физических процессов, включая интенсивность его переноса на контртело, увеличивают его расход, что ведет к снижению ресурса трибосистемы.

4.3 Работа трибосистемы в стационарном периоде

Основное время работы любых трибосистем, включая и металлополимерные, соответствует стационарному периоду эксплуатации. Комплекс характеристик стационарного процесса трения определяет износостойкость от нагрузочно-скоростных режимов при эксплуатации. На первом этапе исследований установим характер изменений износостойкости исследуемых трибосопряжений композиционных фторопластсодержащих покрытий в паре с контртелами из стали 45 в принятом диапазоне нагрузочно-скоростных эксплуатационных режимов и коэффициента взаимного перекрытия.

Одним из наиболее удобных параметров для непосредственной и сравнительной оценки износостойкости покрытия является скорость его изнашивания в стационарный период трения, что и является итогом данного этапа экспериментальных исследований. Адекватная регрессионная модель зависимости скорости изнашивания от режимов эксплуатации имеет следующей вид:

$$V_{\text{из}} = 1,644 \cdot \sigma^{-0,447} \cdot K_{\text{вз}}^{-0,2} \cdot V^{1,598-0,907 \lg \sigma} (\times 10^{-3} \text{ мм/мин}). \quad (4.12)$$

Степень влияния исследованного диапазона переменных факторов на величины стационарной скорости изнашивания приведена в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Влияние условий работы трибосистемы на скорость изнашивания

Параметры режима трения			Изменения скорости изнашивания, %	
Квз	V м/с	σ , МПа	Текущие	Среднее
0,167 – 0,476	0,12 – 0,27	5 – 22	18,9	– 18,9
0,167 – 0,476	0,12 – 0,27	5	119,2	77,5
		22	36,0	
	0,12	5 – 22	78,4	44,5
	0,27		10,7	

График полученной модели представлен на рисунке 4.8.

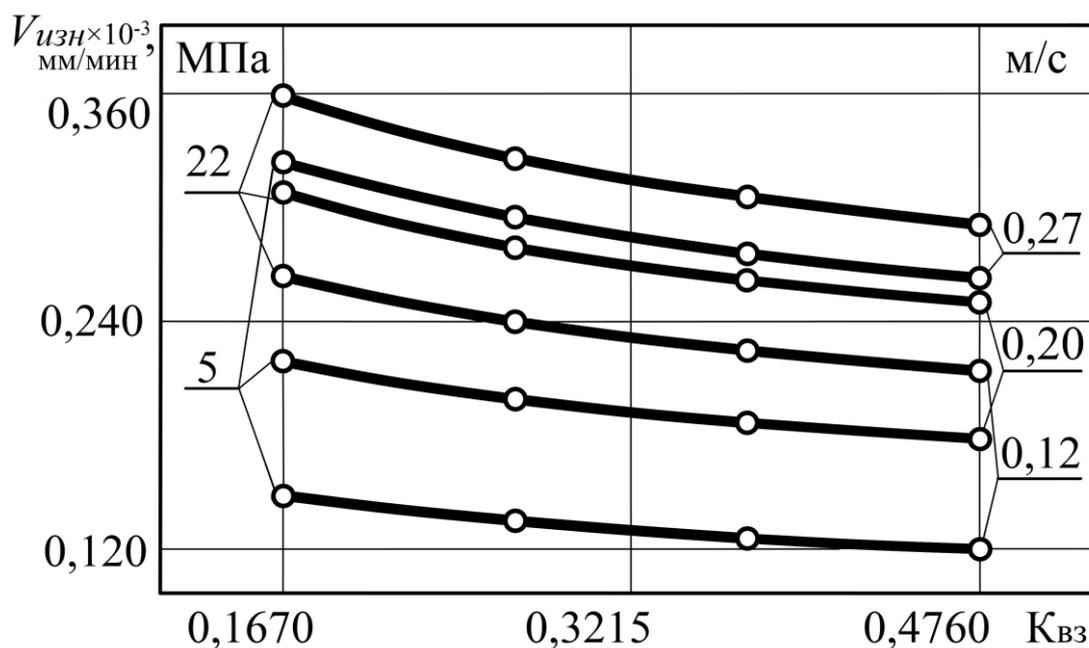


Рисунок 4.8 – Зависимость скорости изнашивания покрытий от коэффициента перекрытия и нагрузочно-скоростных режимов

Обработка и анализ полученных результатов экспериментальных исследований, моделей (погрешность не более 7,6%) влияния на скорость изнашивания полимерных композиционных покрытий и совокупности режимных параметров их эксплуатации позволил установить следующее.

Все переменные факторы, входящие в описываемый экспериментальный блок, оказывают значительное влияние на величину выходного параметра – скорости изнашивания.

Величина коэффициента взаимного перекрытия в исследованных пределах 0,167 – 0,476 уменьшает величину скорости изнашивания покрытия во всем исследованном диапазоне нагрузочно-скоростных режимов на постоянную величину, составляющую 18,9 % независимо от уровня режимов (погрешность доли процента).

В диапазоне эксплуатационной скорости трибосистемы величина выходного параметра снижается в среднем на 77,5 %. Причем, при малом значении нагрузки $\sigma = 5$ МПа, это снижение достигает 119,2%, а при большем $\sigma = 22$ МПа – 35,98%.

Уровень нагрузок трибосистемы в исследованном диапазоне 5 – 22 МПа обеспечивает среднее снижение скорости изнашивания покрытий на 44,5%. При этом на нижнем уровне эксплуатационной скорости нагрузка уменьшает скорость изнашивания на 77,5%, а на верхнем – на 10,7%.

Оценим соотношение влияния среднего уровня факторов. Наиболее интенсивное влияние на скорость изнашивания антифрикционного покрытия трибосистемы оказывает скорость движения, наименьшее (более чем в 4,1 раза) – коэффициент взаимного перекрытия; нагрузка занимает среднее положение. Ее влияние меньше, чем у скорости в 2,85 раза.

Таким образом, установлены основные закономерности влияния эксплуатационных нагрузочно-скоростных режимов на один из основных показателей работы трибосистемы.

Отмеченное соотношение воздействия на скорость изнашивания покрытий переменных факторов в некоторой степени связано с величиной их диапазонов варьирования, обеспечивающих уровень генерируемой температуры в процессе трения. Так, относительные диапазоны варьирования (max/min) скорости, коэффициента взаимного перекрытия и нагрузки соотносятся как 2,25 – 2,85 – 4,4. Однако их сравнение показывает, что

ведущую роль играют физические процессы. Это деформация полимерного покрытия под нагрузкой и снижение фактических контактных напряжений, а также наибольшая генерация тепла скоростью скольжения. Температура снижает прочность и износостойкость полимерного композита, а также повышает расход фторопласта, используемого в качестве смазочного материала. Кроме того, следует отметить, что рост нагрузки снижает влияние скорости, а рост скорости – влияние нагрузки. Очевидно, это связано с общими энергозатратами.

Следующим этапом исследований являлось определение стандартного параметра трибосистем – интенсивности изнашивания. Этот безразмерный параметр может быть установлен как для общего времени работы, так и только для стационарного периода. В первом случае приработка трибосистемы осуществляется непосредственно в машине, во втором – применяется технологическая приработка изготовителем.

Полученные на основании экспериментальных исследований адекватные регрессионные модели имеют следующий вид:

$$\text{общая} \quad I_{об} = 3,404 \cdot \sigma^{-0,275} \cdot KВз^{-0,256} \cdot V^{0,739-0,815 \lg \sigma}; \quad (4.13)$$

$$\text{стационарная} \quad I_{ст} = 2,93 \cdot \sigma^{-0,445} \cdot KВз^{-0,201} \cdot V^{0,595-0,904 \lg \sigma}. \quad (4.14)$$

Средняя погрешность моделей составляет 6,4% и 3,7%.

Степень влияния переменных факторов на величину общей интенсивности изнашивания оценена в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Влияние переменных факторов на общую интенсивность изнашивания

Параметры режима трения			Изменения температуры, %	
КВз	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	5 – 22	102,3	67,2
	0,27		32,2	

Общая интенсивность изнашивания за приработочный и стационарный периоды зависит от всех исследованных переменных факторов. В наибольшей степени она увеличивается от нагрузки – 67,2 % и от скорости при наибольшей нагрузке. Увеличение коэффициента взаимного перекрытия снижает интенсивность изнашивания на 23,5 %.

Графики полученных зависимостей представлены на рисунке 4.9.

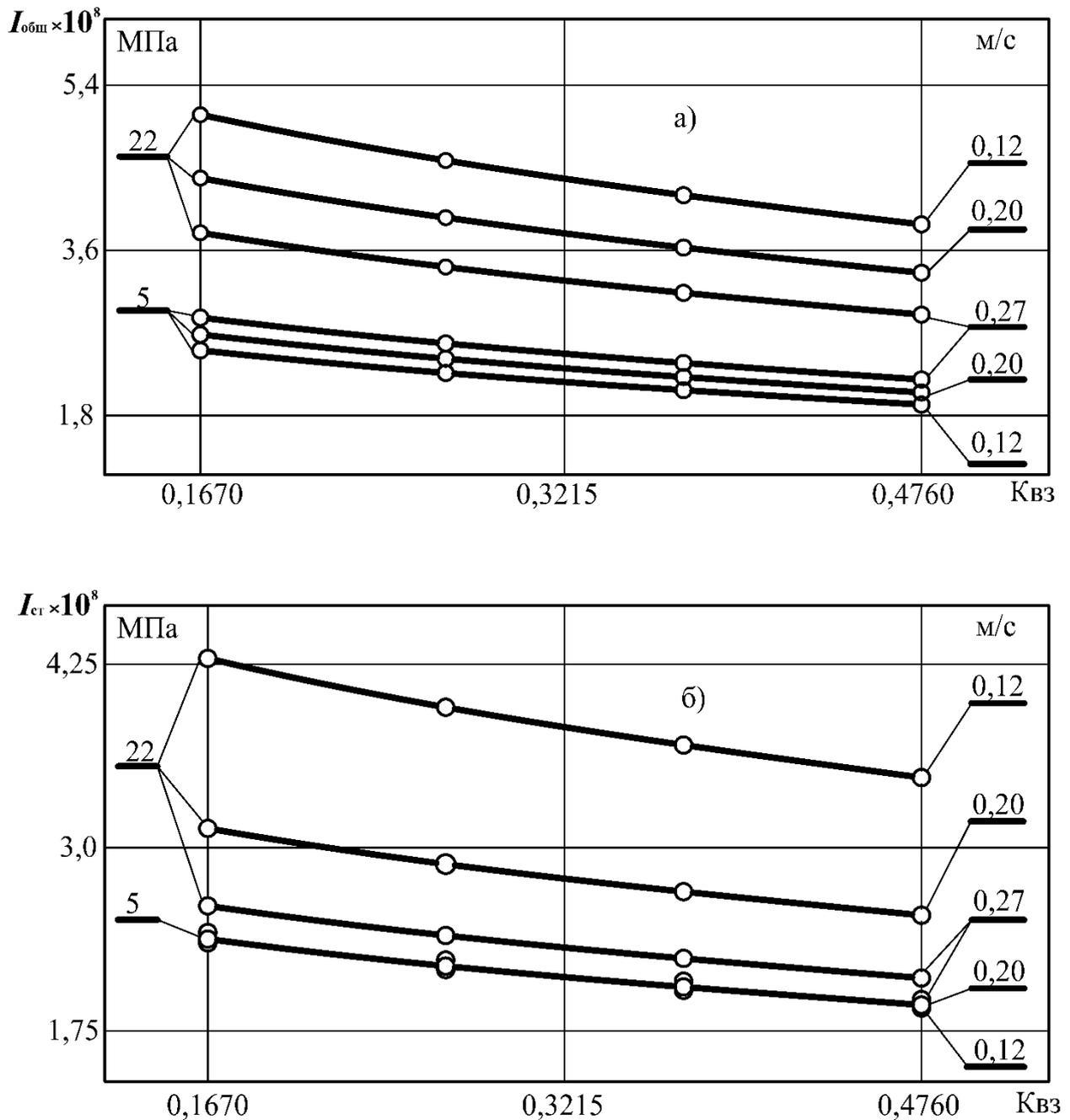


Рисунок 4.9 – Зависимость общей а) и стационарной б) интенсивности изнашивания от коэффициента взаимного перекрытия и нагрузочно-скоростных режимов

В исследованном диапазоне трибопараметров, представленных на графиках отмечается определенная специфика, заключающаяся в увеличении интенсивности изнашивания при снижении скорости, т.е. в обратной зависимости. В условиях нагрузки 22 МПа при скорости 0,12 м/с интенсивность изнашивания больше, чем при скорости 0,27 м/с.

Первой причиной подобной зависимости является возвратно-поступательное движение, скорость которого перпендикулярна шероховатости, а температура полимерного покрытия из-за низкой скорости мала. При относительно низкой температуре и высокой нагрузке сохранивший жесткость полимер царапается вдавленной в него шероховатостью и переносится на поверхность контртела крупными фрагментами, что увеличивает его износ.

Вторая причина заключается в значительном удлинении величины хода при росте скорости и постоянстве коэффициента взаимного перекрытия, что вызывает увеличение пути трения, рост которого опережает рост величины износа покрытия.

Указанный эффект может иметь место только при определенном сочетании нагрузочно-скоростных режимов и применяемых полимерных покрытий в условиях возвратно-поступательного движения. В остальном рассматриваемая трибосистема подчиняется всем стандартным закономерностям, численная оценка которых приведена в таблице 4.10.

Проведенный, на основе полученной экспериментально интенсивности изнашивания, оценочный расчет износостойкости покрытия, позволил получить диапазон величин $(2,076 - 5,358) \times 10^7$, что соответствует 11 классу износостойкости исследуемой трибосистемы [115].

Суммарным показателем уровня применимости трибосистемы является ее ресурс, который может быть измерен в часах работы или в количестве циклов нагружения за это время. Рассмотрим зависимость полного часового ресурса от нагрузочно-скоростных режимов и коэффициента взаимного перекрытия. Обработка экспериментальных данных позволила

получить адекватную регрессионную модель этой зависимости (средняя погрешность 4,6%).

$$R_{об} = 11,695 \cdot \sigma^{0,082} \cdot K_{вз}^{0,892+0,807 \lg V} \cdot V^{-1,229+0,672 \lg \sigma}, \quad (4.15)$$

Рост нагрузочно–скоростных режимов уменьшает ресурс трибосистемы, а рост коэффициента взаимного перекрытия повышает его. График полученной модели представлен на рисунке 4.10.

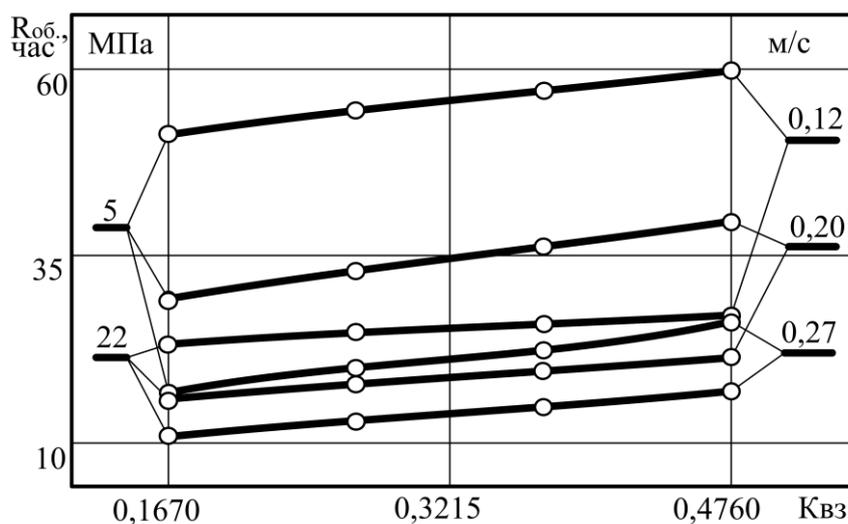


Рисунок 4.10 – Влияние режимов нагружения и коэффициента взаимного перекрытия на ресурс трибосистемы

Оценка степени влияния переменных факторов на ресурс трибосистемы выполнена в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Влияние переменных факторов на ресурс

Параметры режима трения			Изменения ресурса, %	
K _{вз}	V м/с	σ, МПа	Текущие	Среднее
0,167 – 0,476	0,12	5 – 22	16,8	37,1
	0,27		57,5	
0,167	0,12 – 0,27	5	67,5	– 53,8
0,476			22	
	53,7			
37,8				
0,167 – 0,467	0,12	5 – 22	54,8	– 45,2
	0,27		35,6	

При увеличении коэффициента взаимного перекрытия (приближения его к единице) ресурс увеличивается в среднем на 37,1% в результате уменьшения длины хода. В исследованном диапазоне режимов нагрузка снижает ресурс в среднем на 45,2% но при большей скорости это доходит до 54,8%. Наибольшее влияние на снижение ресурса в исследованном диапазоне факторного пространства оказывает скорость. В среднем это 53,7%, но в связи с общей зависимостью от нагрузки и коэффициента взаимного перекрытия ресурс может быть снижен на 45,2 %.

Имеющаяся зависимости ресурса одновременно от всего комплекса переменных факторов отражается в регрессионной модели (4.15) коэффициентами при смешанных взаимодействиях и наглядно просматривается на рисунке 4.10.

В технике применяется много механизмов, совершающих периодическое движение, которое состоит из отдельных циклов перемещений и нагружений. В этом случае удобно измерять ресурс трибосистем не в часах работы, а в количестве циклов нагружения. При этом необходимо учитывать специфику как физики нагружения (частоту, переменную скорость, страгивание, рост температуры), так и соотношение протекания отдельных процессов, например, движения и изнашивания или числа пусков и длины хода и т.д. Учитывая конкретные особенности исследования процесса трения в условиях возвратно-поступательного движения при коэффициенте взаимного перекрытия меньше единицы, в работе получена регрессионная модель ресурса трибосистемы для стационарного периода трения, выраженного в циклах нагружения.

$$R_{ст} = 5,297 \cdot \sigma^{0,086} \cdot K_{вз}^{2,371+0,834 \lg V} \cdot V^{-0,216+0,677 \lg \sigma} \cdot (10^6 \text{ циклов}). \quad (4.16)$$

Модель адекватна и обеспечивает расчеты со средней погрешностью, не превышающей 4,4%. Графическая интерпретация модели представлена на рисунке 4.11.

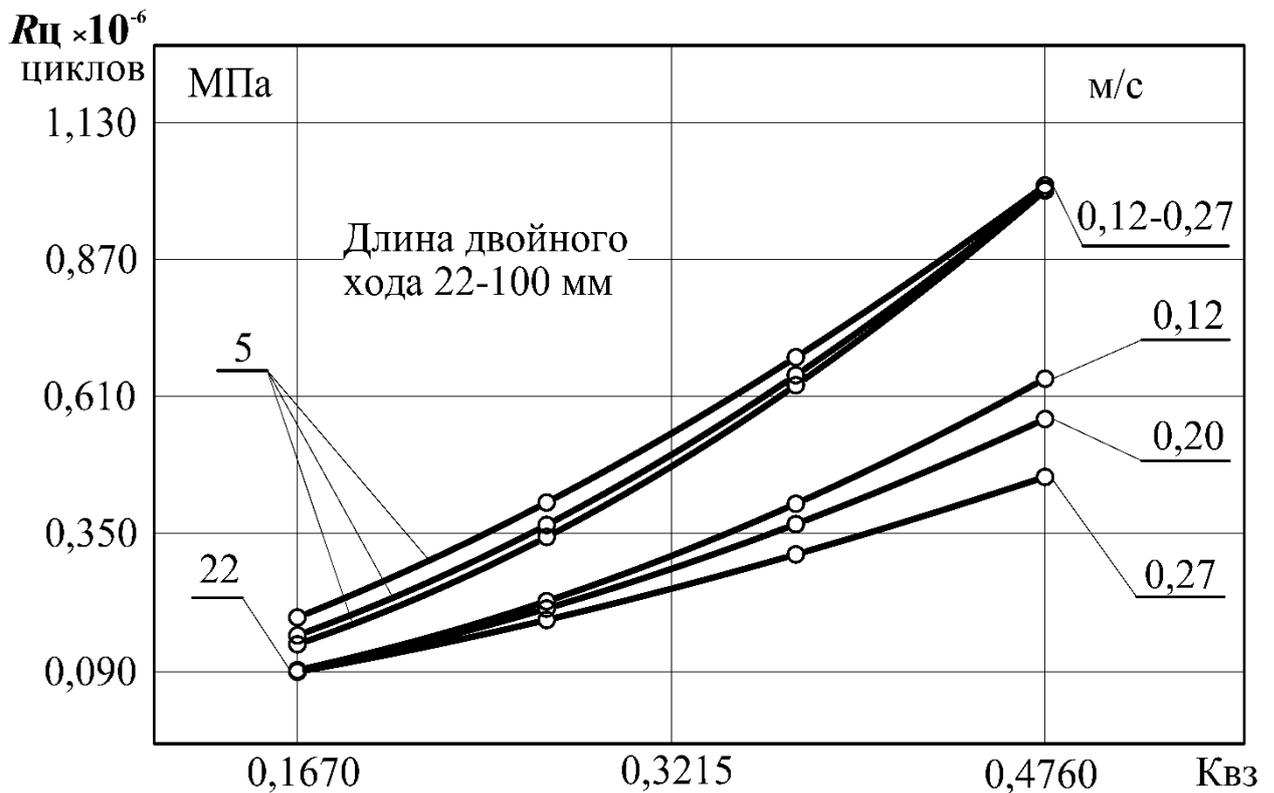


Рисунок 4.11 – Зависимость стационарного ресурса покрытия от коэффициента взаимного перекрытия и нагрузочно-скоростных режимов

Степень влияния переменных факторов на ресурс трибосистемы в циклах нагружения приведена в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Влияние переменных факторов на ресурс

Параметры режима трения			Изменения ресурса, %	
Квз	V м/с	σ , МПа	Текущие	Среднее
0,167	0,12 – 0,27	5 – 22	436,0	532,5
0,476			629,1	
0,167	0,12 – 0,27	5	–27,1	14,0
			0,9	
0,476		22	–3,7	22,3
			41,0	
0,167 – 0,476	0,12	5 – 22	–54,9	–45,3
	0,27		–35,8	

Совместное влияние на ресурс коэффициента взаимного перекрытия и скорости (отражено в модели), а также резкое увеличение с ее ростом числа циклов нагружения, приводит при малой нагрузке к снижению зависимости

ресурса от скорости (сближение точек на графике), а при большой нагрузке к снижению ресурса от нагрузки. Поэтому на графике каждый из этих диапазонов значений ресурса изображен одной точкой.

При малой нагрузке (5МПа) с ростом скорости ресурс в циклах уменьшается (в таблице 4.12). С увеличением нагрузки (22МПа), в том же диапазоне роста скорости, ресурс растет. Это объясняется увеличением частоты циклов нагружения, которая обгоняет за время ресурса процесс изнашивания и деградации полимерного покрытия.

Нагрузка во всем исследованном диапазоне параметров снижает ресурс. При малой скорости (0,12м/с) нагрузка влияет на величину ресурса (цикл) в 1,5 раза интенсивнее, чем при более высокой (0,27м/с).

Потери на трение определяют величину КПД коэффициента полезного действия любой машины, что является одним из показателей ее качества, определяющего экономичность и широту ее использования по функциональному назначению. Одним из главных критериев оценки уровня эффективности любой механической системы считается ее коэффициент трения, несмотря на то, что любой механизм имеет запас мощности.

Определим коэффициент трения для исследуемой трибосистемы в принятом диапазоне нагрузочно-скоростных параметров. Эти исследования потребовали перестройки экспериментальной установки, что сдвинуло их в конец экспериментального блока. По результатам исследований получена регрессионная модель следующего вида

$$f = 10^{-0,562} \cdot \sigma^{-1,072} \cdot K_{\sigma}^{0,474} \cdot V^{-0,3936-0,441 \log \sigma} . \quad (4.11)$$

Модель адекватна и обеспечивает среднюю погрешность расчетов не более 5 %. График модели представлен на рисунке 4.12.

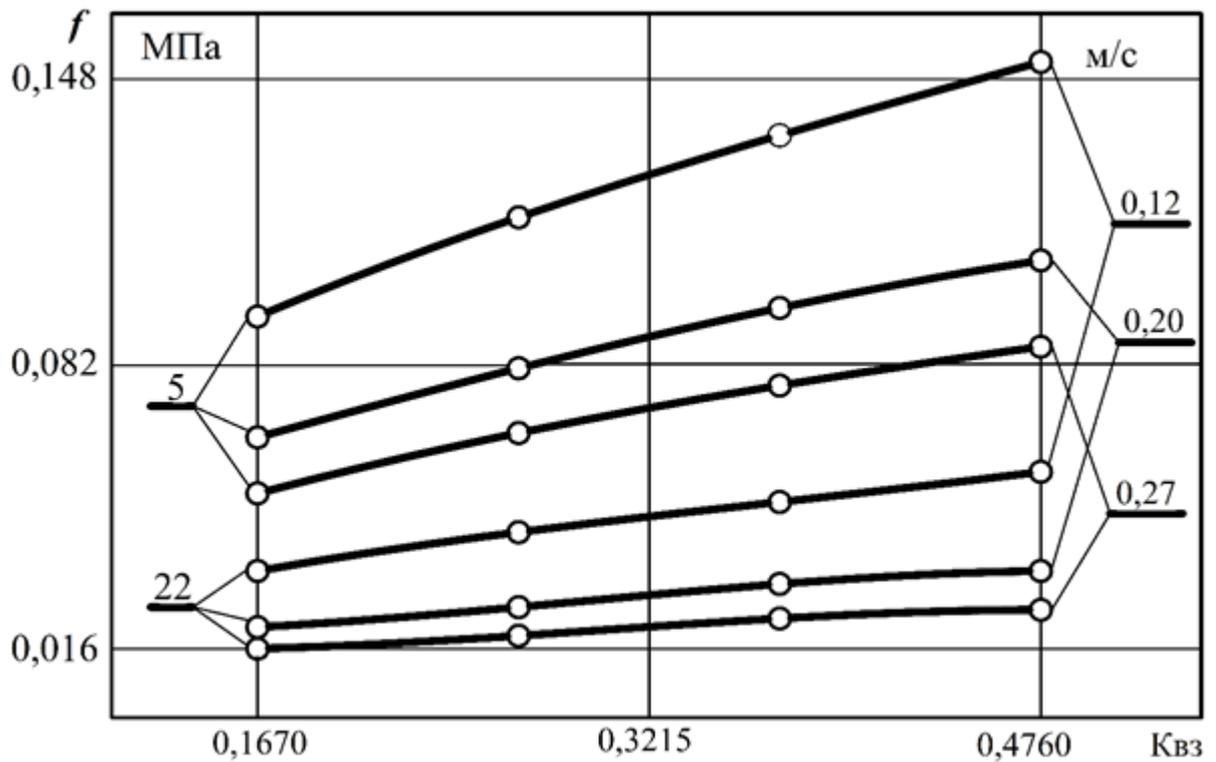


Рисунок 4.12 – Влияние эксплуатационных параметров на коэффициент трения

Необходимо отметить общий несколько пониженный уровень величин коэффициента трения в сравнении с вращательным движением [170], что может быть объяснено значительной деформацией и повышенным переносом фторопласта на поверхность контртела, вызванным поперечной шероховатостью.

Качественный анализ полученной модели и графика показывает, что величина коэффициента трения повышается при снижении нагрузочно-скоростных режимов и росте коэффициента взаимного перекрытия. Это полностью соответствует изменениям температуры в том же диапазоне исследованных режимов нагружения (Рисунок 4.6). Результаты количественного анализа влияния исследованного диапазона эксплуатационных режимов представлены в таблице 4.13.

Таблица 4.13 – Влияние эксплуатационных параметров на коэффициент трения

Параметры режима трения			Изменения коэфф. трения текущие и средние, %		
$K_{ВЗ}$	$V, \text{ м/с}$	$\sigma, \text{ МПа}$			
0,167 – 0,476	0,12	5	63,4	63,1	
		22	67,6		
	0,27	5	65,4		
		22	56,2		
0,167	0,12 – 0,27	5	44,1	49,1	
0,476			22		52,9
		0,167	0,12		5 – 22
0,27					
	0,476	0,12	5 – 22	63,4	66,5
0,27				69,2	
	0,167	0,12	5 – 22	62,5	
0,27				70,9	

Наибольшее влияние на коэффициент трения оказывают контактные напряжения, наименьшее – скорость. Коэффициент взаимного перекрытия занимает промежуточное место. Скорость и нагрузка влияют на коэффициент трения в пределах погрешности экспериментов примерно одинаково (различие $\approx 5\%$).

Итогом экспериментального раздела является решение всех поставленных в диссертационном исследовании задач, подтверждение значимости теоретической части исследовани, а также получение регрессионных моделей, которые могут использоваться для оценочных расчетов при проектировании и эксплуатации металлополимерных трибосистем, работающих при возвратно-поступательном движении.

4.4 Выводы

1. Выявлены особенности работы металлополимерных трибосистем с композиционными фторопластсодержащими антифрикционными покрытиями в условиях возвратно-поступательного движения и сформированы требования к их адаптации к этим условиям.

2. Полученные результаты экспериментальных исследований позволили установить рациональную конструкцию рассматриваемой трибосистемы, включающую диапазон теплофизических параметров металлов контртел, допустимую область шероховатости их контактной поверхности, обработанную не ниже $Ra = 0,2$ мкм (9 класс), и тип покрытия.

3. Для исследованного диапазона эксплуатации покрытий определен комплекс приработочных нагрузочно-скоростных режимов, позволяющий на основе генерируемой температуры, управлять соотношением времени приработки и приработочным износом.

4. Экспериментальные исследования эксплуатации разработанной конструкции металлополимерной трибосистемы позволили определить в рассматриваемом диапазоне приведенных нагрузочно-скоростных режимов ее основные противоизносные параметры: скорость и интенсивность изнашивания, равные $(0,12 - 0,32) \times 10^{-6}$ мм/мин и $(1,7 - 3,6) \times 10^{-8}$, что соответствует 7-му классу износостойкости

5. При эксплуатации в исследуемой области нагружения металлополимерной трибосистемы в режиме самосмазывания фторопластом установлена величина коэффициента трения, изменяющаяся в пределах $0,0016 - 0,0152$.

6. Для исследованных антифрикционных полимерных покрытий в условиях возвратно-поступательного движения при коэффициенте взаимного перекрытия меньше единицы впервые установлена область с эффектом обратной зависимости интенсивности изнашивания от скорости в трибосистеме.

5 ИТОГОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ

В разделе проведен сравнительный анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований, позволяющий оценить точность теоретических данных. Окончательная общая оценка полученных в работе результатов основывается на данных промышленных испытаний, разработанных трибосистем.

5.1 Верификация теоретических результатов

Исследуемые фторопластсодержащие композиционные покрытия впервые применяются при возвратно-поступательном движении, соответствующим значению коэффициента взаимного перекрытия меньше единицы. В этом случае движение направлено поперек шероховатости поверхности металлического контртела, являющейся результатом технологической наследственности – следом предыдущей механической обработки. Данные литературы [170] и опыт эксплуатации подобных покрытий на шероховатых поверхностях при вращательном движении свидетельствует о том, что в подобном случае влияние шероховатости эквивалентно ее увеличению в 2 – 4 раза. Однако переход к возвратно-поступательному движению изменяет всю систему силового и термического нагружения контакта. Общий рост деформирования, адгезионного переноса фторопласта на контртело и его выноса сокращает ресурс, а снижение температуры увеличивает его. Сравнение влияния шероховатости на ресурс исследуемых трибосистем при разном типе движения приведено в таблице 5.1

Таблица 5.1 – Влияние шероховатости на ресурс покрытия

№ п/п	Тип движения	K_{B3}	Расчетные формулы $R=f(Ra)$	Параметр Ra	Ресурс R , циклов	Снижение ресурса	
						одно движение	разные движения
1	Вращение	1,000	$R_B=2,045$ $e^{-1,99R_a} \times 10^6$	0,053	1840589	R_{B1}/R_{B2} = 1,995	$R_{B1}/R_{П3}$ = 10,36
2				0,4	922715		
3	Поступател.	0,167	$R_{П}=1,889$ $0,32^{R_a} \times 10^6$	0,053	177602	$R_{П3}/R_{П4}$ = 1,485	$R_{B2}/R_{П4}$ = 7,71
4				0,4	119612		

Анализ табличных данных позволяет установить для исследуемых покрытий металлополимерных трибосистем следующее.

Шероховатость поверхности металлического контртела при изменении с 8 по 11 класс обеспечивает при возвратно-поступательном движении ресурс на 25,6 % меньший, чем при вращательном движении. Это может быть объяснено более интенсивной деформацией покрытия и микрорезанием фторопласта.

Чем выше класс шероховатости, в исследованном диапазоне, тем величина ресурса у пары с вращательным движением (при $Ra = 0,053$ мкм – 1840589 и 177602 цикл.) превышает ресурс возвратно-поступательной пары (при $Ra = 0,4$ мкм – 922715 и 119612 цикл.)

Близкий линейному закон прирабочного изнашивания, относительно короткое время приработки и повышенная температура свидетельствует о наличии вклада микрорезания даже при высоком 11 классе шероховатости.

Следует отметить, что характер отмеченных закономерностей при уменьшении значения коэффициента взаимного перекрытия сохраняется, но величина влияния шероховатости на ресурс уменьшается.

Таким образом, отмеченная в работе специфика влияния шероховатости на ресурс, подтверждается результатами других исследователей. Это подтверждает обоснованность требований повышения шероховатости контртел при возвратно-поступательном движении до 12 класса (особенно при $K_{B3} < 0,5$).

Использование для регулирования приработочных параметров металлополимерных трибосистем температуры отмечено в работе [178]. В качестве ее источника здесь используют шероховатость контртел, повышающую генерацию тепла. Однако гораздо перспективнее применять для варьирования температуры нагрузочно-скоростные режимы, используя адгезионный приработочный перенос полимеров. Приработка при низкой температуре приводит к меньшему расходу фторопласта.

Расчетная оценка температуры покрытий выполнялась на основе ряда допущений, что требует экспериментальной проверки полученных теоретических результатов. Данные проведенного сравнительного анализа полученных теоретически значений температуры, исследуемой трибосистемы с экспериментальными результатами представлены в таблице 5.2

Таблица 5.2 – Степень соответствия теоретических расчетов температуры экспериментальным данным

$K_{ВЗ}$	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 схема температурного расчета обеспечивает удовлетворительную сходимость расчетных данных с экспериментальными. Средняя погрешность расчетных величин составляет 4,66 %, а ее диапазон – 0,3-7,8 %. Это относится к металлополимерным фторопластсодержащим трибосистемам с различными материалами металлических контртел (гл.2 таблица 2.6) и к нагрузочно-скоростным режимам в исследованном диапазоне коэффициента взаимного перекрытия.

Таким образом, разработанная и опробованная методика оценочного расчета температуры металлополимерных трибосистем при возвратно-поступательном движении в диапазоне нагрузочно-скоростных режимов $\sigma=5-22$ МПа, $V=0,12-0,27$ м/с может быть рекомендована и востребована для предпроектных и проектных инженерных расчетов.

5.2 Промышленные испытания

Промышленные испытания разработанной трибосистемы с фторопластсодержащим композиционным антифрикционным покрытием в условиях возвратно-поступательного движения проводились на Лопастном заводе Ростовского-на-Дону ПАО «Роствертол».

Объектом испытаний являлся станок для намотки лонжеронов лопастей несущего винта вертолетов лентами из стекло-и углепрепрега (Рисунок 5.1).



Рисунок 5.1– Общий вид станка для намотки лонжеронов лопастей несущего винта вертолета

Намоточное устройство смонтировано на каретке. Диск с четырьмя катушками ленты препрега, размещенный внутри каретки, вращается с переменной угловой скоростью для обеспечения требуемого изменения угла укладки ленты относительно оси лонжерона.

Каретка опирается на направляющие длиной 12 м шестью узлами скольжения и совершает возвратно-поступательное движение с коэффициентом взаимного перекрытия меньше единицы. Ее масса составляет 1800 кг, а скорость перемещения по направляющим вдоль оси лонжерона варьируется в пределах 0,1-0,5 м/сек.

Для исключения попадания на поверхность направляющих пыли и посторонних предметов они закрываются складчатым кожухом, снимаемым для технических осмотров и обслуживания 2 раза в месяц.

Разработанные антифрикционные покрытия наносились на 2 опоры (Рисунок 5.2), представляющие собой детали коробчатой формы, установленные на подпружиненный контактный элемент. Покрытия наносились на их наружную опорную поверхность.



Рисунок 5.2 – Обратная сторона каретки станка для намотки лонжеронов

На рисунке 5.2 стрелками указаны места установки подпружиненных контактных элементов с нанесенными антифрикционными фторопластсодержащими покрытиями.

Испытания опор с антифрикционным покрытием проводилось при работе оборудования в полном соответствии с технологическим процессом. В период испытаний не наблюдалось каких-либо нарушений требуемой скорости движения каретки и сбоев в ее перемещении. При проведении регламентных работ, включающих контроль поверхностей трения, не наблюдалось следов нарушения рабочей поверхности покрытия и его отслаивания. Ресурс трибосистемы перемещения каретки увеличился на 13,2 %

Проведенные промышленные испытания доказали перспективность применения металлополимерных трибосистем с фторопластсодержащим композиционным покрытием в узлах трения с коэффициентом взаимного перекрытия меньше единицы.

5.3 Выводы

1. Проведенная верификация данных теоретических исследований путем сравнения их с экспериментальными результатами доказала их удовлетворительную сходимость (в среднем 4,66%) и применимость для инженерных расчетов.

2. Сравнение полученных в работе параметров с данными других исследователей позволило доказать их обоснованность и объяснить причину снижения в сравнении с результатами, полученными у исследуемых покрытий при вращательном движении, как дополнительный вынос фторопласта из зоны трения.

3. Промышленные испытания разработанных металлополимерных трибосистем на Лопастном заводе Ростовского-на-Дону ПАО «Роствертол» в узле трения технологического оборудования показали удовлетворительные результаты, обеспечив стабильную работу и повышение ресурса на 13,2 %.

4. Промышленными испытаниями доказана перспективность расширения области применения покрытий из антифрикционных полимерных фторопластсодержащих композитов в трибосистемах с возвратно-поступательным движением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный комплекс теоретических и экспериментальных исследований позволил решить поставленную задачу о применении высокоэффективных самосмазывающихся антифрикционных полимерных покрытий в условиях возвратно-поступательного движения при коэффициенте взаимного перекрытия меньше единицы. При этом были учтены все особенности новой области эксплуатации исследуемых металлополимерных трибосистем: переменная скорость, повышенное влияние шероховатости контактных металлических поверхностей и теплофизические свойства металла контртел, а также композиционная структура полимерных покрытий.

Впервые установлена область нагрузочно-скоростных режимов, обеспечивающая рациональную эксплуатацию рассматриваемых металлополимерных фторопластсодержащих трибосистем.

Трибосистемы, разработанные по результатам исследований прошли промышленные испытания с удовлетворительной оценкой.

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 в условиях возвратно-поступательного движения при коэффициенте взаимного перекрытия меньше единицы.

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

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.

5. Учитывая механизм адгезионного переноса фторопласта при самосмазывании разработанной металлополимерной трибосистемы в исследованной области эксплуатации, установлены рациональные режимы приработки, обеспечивающие повышение ресурса трибосопряжения.

6. На базе экспериментальных исследований в условиях возвратно-поступательного движения разработанных трибосистем установлена область их рациональной эксплуатации в широком диапазоне величин (0,167 – 0,467) коэффициента взаимного перекрытия.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Современная трибология : Итоги и перспективы / под редакцией К. В. Фролова. – Москва : ЛКИ, 2008. – 480 с.
2. **Дроздов, Ю. Н.** Трение и износ в экстремальных условиях : справочник / Ю. Н. Дроздов, В. Г. Павлов, В. Н. Пучков. – Москва : Машиностроение, 1986. – 224 с.
3. **Гаевик, Д. Т.** Подшипниковые опоры современных машин / Д. Т. Гаевик. – Москва : Машиностроение, 1985. – 248 с.
4. **Кохановский, В. А.** Работа металлополимерных трибосистем на критических режимах / В. А. Кохановский // Транспорт наука, образование, производство («Транспорт-2019») : сборник научных трудов. – Т. 4. Технические науки. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2019. – С. 191–204.
5. **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.
6. **Белый, В. А.** Трение и износ материалов на основе полимеров / В. А. Белый [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1976. – 432с.
7. **Кутьков, А. А.** Термофрикционные свойства фторопласта-4 и его композиции с латунным порошком в интервале 70-320 К / А. А. Кутьков, Х. Я. Гостева // Трение и износ. – 1981. – Т. 2, № 1. – С. 38–42.
8. Plastics // Machin Designe. – № 3. – 1976. – P. 118.
9. **Кохановский, В. А.** Покрытия из самосмазывающихся волокнитов для подшипников скольжения / В. А. Кохановский, А. В. Кузичев, В. А. Салион // Вестник машиностроения. – 1986. – № 10. – С. 40–43.
10. **Ланкастер, У. К.** Образование третьего тела и износ сухих подшипников на основе ПТФЭ-волокон / У. К. Ланкастер // Проблемы трения и смазки. – 1980. – С. 114–124.

11. **Патент на полезную модель № RU190621U1.** Опорный шкворневой узел / В. А. Кохановский, П. Г. Иваночкин, М. А. Мукутадзе, [и др.]. – № 2019113876 ; заявл. 06.05.2019 ; опубл. 04.07.2019, Бюл. № 19. – 5 с.

12. **Кохановский, В. А.** Несущая способность покрытий из антифрикционных самосмазывающихся волоконитов при статических нагрузках / В. А. Кохановский // Известия СКНЦ ВШ. Серия : Технические науки. – 1987. – № 2. – С. 69–72.

13. **Крагельский, И. В.** Трение и износ / И. В. Крагельский. – Москва : Машиностроение, 1968. – 467 с.

14. Third body formation and the wear of PTFE fibre based dry bearings / J. K. Lancaster, P. Play, M. Godet // Trans. ASME, J. Lubric. Technol. – 1980. – Vol. 102, № 2. – P. 236–246. – DOI 10.1115/1.3251485.

15. **Колесников, В. И.** Транспортная триботехника (трение и износ материалов) : учебное пособие. Т. 1 / В. И. Колесников, В. В. Шаповалов, В. А. Кохановский. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2006. – 477 с.

16. **Смуругов, В. А.** Фрикционный перенос полимеров и его связь с молекулярными процессами в зоне контакта / В. А. Смуругов [и др.] // Трение и износ. – 1990. – Т. 11, № 3. – С. 521–525.

17. **Танака, К.** Износ композиционных полимерных материалов/ К. Танака // Сэньи гаккайси. – 1975. – Т. 31, № 8. – С. 10–17.

18. Sviridyonok, A. J. A study of transfer in frictional interaction of polymers / A. J. Sviridyonok, V. A. Bely, V. A. Smurugov // Wear. – 1973. – Vol. 25. – P. 301–308. – DOI 10.1016/0043-1648(73)90001-X.

19. **Погосян, А. К.** Трение и износ наполненных полимерных материалов / А. К. Погосян. – Москва : Наука, 1977. – 138 с.

20. **Cooper, J.** Higher speed and load limits for self-lubricating bearings // Machine Design. – 1977. – Vol. 49, No. 27. – P. 81–85.

21. **Тынный, А. Н.** Прочность и разрушение полимеров при воздействии жидких сред / А. Н. Тынный. – Киев : Наукова думка, 1975. – 206 с.

22. **Кохановский, В. А.** Износостойкость полимерных покрытий в активных водных средах / В. А. Кохановский, И. Б. Власенко // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2013. – № 11. – С. 45–48.

23. **Кохановский, В. А.** Работоспособность антифрикционных полимерных покрытий в водных средах / В. А. Кохановский, И. Б. Власенко // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2012. – № 1. – С. 13–15.

24. **Мирзоев, Р. Г.** Пластмассовые детали машин и приборов / Р. Г. Мирзоев. – Москва ; Ленинград : Машиностроение, 1971. – 364 с.

25. Gleitlager aus Fasermaterial // Production. – 1971. – Bd. 10. – No. 5. – S. 65–68.

26. **Harris, V.** More for less from teflon fabric bearings / V. Harris // Machine Design. – 1977. – Vol. 49, No. 16. – P. 88–91.

27. Ina Elges. Gelenklager, Gelenkkopfe. Maßkatalog K227D // Ausgabe Juli, 1980. – 103 s.

28. **Кохановский, В. А.** Соотношение зазоров в шарнирных подшипниках / В. А. Кохановский, Л. В. Красниченко // Безызносность : межвузовский сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону : РИСХМ. – 1990. – С. 95–101.

29. Полимерные композиционные материалы в трибологии / Ю. К. Машков, З. Н. Овчар, М. Ю. Байбарацкая, О. А. Мамаев. – Москва : ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. – 262 с.

30. **Колесников, В. И.** Композиционные материалы для узлов трения подвижного состава на основе технических тканей и их триботехнических характеристик / В. И. Колесников [и др.] // Физика, механика, техника : сборник трудов Южного научного центра РАН. – Т. II. – Ростов-на-Дону : ЮНЦ РАН, 2007. – С. 9–35.

31. Aeronautical catalogue. Les applications du roulement // Aeronautical Division, ADR. – Ivry-sur-Seine, 1976. – 133 p.

32. **Lancaster, J. K.** Composite for Aerospace Bearing Applications / J. K. Lancaster // Friction and wear of polymer composites. Composite Materials. – Series

1. – Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo : Technical University Hamburg. – P. 363–396. – DOI 10.1016/B978-0-444-42524-9.50015-6.

33. Производство и применение термо- и жаростойких волокон в СССР и за рубежом // Серия : Обзоры по отдельным производствам химической промышленности. – Москва : НИИТЭХИМ, 1972. – Вып. 19. – 83 с.

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

35. The plain bearing : handbook // Lear-Siegler Inc. – Santa Ana, California, 1976. – 39 p.

36. Pat. 4.108.381 USA. Rocket nozzle bearing seal / P. C. Sottosanti, W. H. Baker, W. T. Dolling (USA) ; Thiokol Corporation (USA). – No. 803487 ; filed. 06.06.77 ; publ. 25.08.78 ; HKU 308-238. – 5 p.

37. Evans, D. C. Self-lubricating bearing // Industrial Lubrication and Tribology. – 1981. – No. 33. – P. 132–138. – DOI 10.1108/eb053229.

38. Die wartungsfrein Gelenklager mit den zwei roten Schutzringen / Katalog HUNGER DFE. – Sciten, 1981. – November. – 46 s.

39. Gleitlager aus Teflongewebe // Ingenieur Digest. – 1973. – Bd. 12. – No. 6. – S. 94.

40. Pat. 3.000.076 USA. Loom picker and bearing / L. A. Runton, H. C. Morton (USA) ; The Russell Manufacturing Company (USA). – No. 700, 797 ; filed .05.12.57 ; publ. 19.09.61 ; HKU 308-238. – 5 p.

41. Variable speed drives // Electronical Designe. – 1962. – Vol. 6. – No. 7. – P. 33.

42. **Tschacher, M.** Trockenlauflager auf der Grundlage von PTFE / M. Tschacher, F. Gubits // Schweiz. Bauzeitung. – 1969. – Bd. 87. – No. 21. – S. 408–412.

43. **Старостипецкий, Ю. А.** Самосмазывающиеся покрытия опор скольжения / Ю. А. Старостипецкий, С. В. Степанович // Станки и инструменты, 1986. – № 8. – С. 16–17.

44. Pat. 3.950.599 USA, МК F16C 27/00, B32b 27/02. Bearing with low-friction laminate liner / D. A. Board (USA), Ball bearings Inc. (USA). – No. 444340 ; filed. 21.02.74 ; publ. 13.04.76 ; HKU 428-236. – 6 p.

45. Pat. 4.006.051 USA, МК F16C 33/20. Method of preparing a low-friction laminate liner for bearings / D. A. Board (USA). – No. 595297 ; filed. 11.07.75 ; publ. 01.02.77 ; HKU 156-247 ; 308-238. – 8 p.

46. **Кужаров, А. С.** Композиционные антифрикционные покрытия на основе волокон политетрафторэтилена / А. С. Кужаров, В. Г. Рядченко // Безызносность. – Ростов-на-Дону : РИСХМ, 1992. – Вып. 2. – С. 140–147.

47. **Лаптева, И. А.** Антифрикционное покрытие для подшипников скольжения / И. А. Лаптева, М. Ю. Сарилев. – Современные инновации в науке и технике : сборник научных трудов 8-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – 2018. – С. 110–113.

48. Подшипники скольжения из полимерных композиционно-волоконистых материалов / М. А. Бируля, П. И. Богомолов, И. А. Козлов, Л. Г. Шушарин // Техничко-технологические проблемы сервиса. – № 1 (35). – 2016. – С. 34–38.

49. Трибологические свойства и применение антифрикционных самосмазывающихся покрытий в шарнирах и подшипниках скольжения-демпферах колебаний авиационных конструкций / Ю. Н. Дроздов, В. Н. Пучков, А. Г. Пономаренко // Результаты фундаментальных исследований в прикладных задачах авиастроения. – Москва : Наука, 2016. – С. 461–472.

50. **Артамонов, В. Н.** Трибологические характеристики сферических шарнирных подшипников скольжения с самосмазывающимся покрытием на основе ткани / В. Н. Артамонов, Ю. Н. Дроздов // Вестник машиностроения. – 1987. – № 4. – С. 10–14.

51. **Кохановский, В. А.** Матричные материалы антифрикционных композитов / В. А. Кохановский, М. А. Мукутадзе // Вестник ДГТУ. – 2001. – Т. 1. – № 2 (8). – С. 51–56.

52. **Кохановский, В. А.** Антифрикционные полимерные композиты для тяжело нагруженных пар трения : специальность 05.02.04 «Трение и износ в машинах» : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Кохановский Вадим Алексеевич ; Донской государственный технический университет. – Ростов-на-Дону, 1995. – 388 с.

53. Pat. 3.053.592 USA. Antifriction bearing / L. A. Runton, H. C. Morton, L. J. Rasero (USA) ; The Russell Manufacturing Company (USA). – No. 10,687 ; filed. 24.02.60 ; publ. 11.09.62 ; HKU 308-238. – 3 p.

54. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена / Ю. К. Машков, З. Н. Овчар, В. И. Суриков, Л. Ф. Калистратова. – Москва : Машиностроение, 2005. – 240 с.

55. **Истомин, Н. П.** Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе фторполимеров / Н. П. Истомин, А. П. Семёнов. – Москва : Наука, 1984. – 147 с.

56. Фторполимеры / под редакцией П. А. Уоло. – Москва : Мир, 1975. – 448 с.

57. **Цаллагова, З. С.** Свойства и применение фторуглеродных пластиков / З. С. Цаллагова. – Ленинград : Химия, 1967. – 94 с.

58. **Кохановский, В. А.** Армирующая компонента для антифрикционных композиционных покрытий / В. А. Кохановский // Управление. Конкурентоспособность. Автоматизация. – Ростов-на-Дону : ГОУДПО, 2002. – Вып. 1. – С. 73–79.

59. **Масленников, К. И.** Химические волокна : словарь-справочник / К. И. Масленников. – Москва : Химия, 1973. – 189 с.

60. **Гусева, А. А.** Технология и оборудование плосковязального и кругловязального производства / А. А. Гусева. – Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 400 с.

61. ТУ 062-53-92 / 2 -85. Подшипники радиальные с трикотажным рукавом. – Новочеркасск : ОКТБ “Орион”, 1985. – 21 с.

62. **Кужаров, А. С.** Исследование триботехнических свойств различных текстильных структур на основе волокнистого политетрафторэтилена / А. С. Кужаров [и др.] // Трение и износ. – 1986. – Т. 7, № 5. – С. 945–950.

63. Современные композиционные материалы / под редакцией Д. Браутмана, Р. Крока. – Москва : Мир, 1970. – 672 с.

64. Amprep X-1 an improved bearingmaterial // Industrial Lubrication and Tribologi. – 1975. – Vol. 27, No. 2. – P. 54–56. – DOI 10.1108/eb053083.

65. Pat. 3.458.223 USA., МК F16C 11/06, 33/00. Low friction bearing assembly / C.S.White (USA). – No. 343677 ; filed. 10.02.64 ; publ. 29.07.69 ; НКУ 287-87. – 5 р.

66. **Марченко, А. В.** Физико-механические свойства одноосноориентированных пленок на основе ПТФЭ / А. В. Марченко, С. В. Власов, В. Б. Крашевский // Пластические массы. – 1991. – № 3. – С. 28–31.

67. **Гуль, В. Е.** Структура и прочность полимеров / В. Е. Гуль. – Москва : Химия, 1978. – 327 с.

68. **Дамидович, А. С.** Основы теории вязания / А. С. Дамидович. – Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1980. – 432 с.

69. **Белый, В. А.** Адгезия полимеров к металлам / В. А. Белый, М. И. Егоренков, Ю. П. Плескачевский. – Минск : Наука и техника, 1971. – 286 с.

70. **Кноп, А.** Фенольные смоля и материалы на их основе / А Кноп, В. Шейб. – Москва : Химия, 1983. – 280 с.

71. **Кардашов, Д. А** Конструкционные клеи / Д. А. Кардашов. – Москва : Химия, 1980. – 288 с.

72. **Кохановский, В. А.** Производство препрегов для антифрикционных композиционных покрытий / В. А. Кохановский, М. А. Мукутадзе // Вестник ДГТУ. – 2001. – Т. 1, № 4 (10). – С. 34–37.

73. **Пивень, А. Н.** Теплофизические свойства полимерных материалов / А. Н. Пивень, Н. А. Гречаная, И. И. Чернобыльский. – Киев : Выща школа, 1976. – 179 с.

74. **Кохановский, В. А.** Теплофизические свойства полимерных антифрикционных покрытий и режимы их нанесения / В. А. Кохановский, М. А. Мукутадзе // Пластические массы. – 2002. – № 12. – С. 44–45.

75. **Кохановский, В. А.** Параметры препрега для покрытий подшипников скольжения / В. А. Кохановский, Ю. А. Петров // Безопасность Ш. – Ростов-на-Дону : РИСХМ, 1994. – С. 139–144.

76. **Кардашов, Д. А.** Применение клеев в самолетостроении / Д. А. Кардашов // Вестник машиностроения. – 1978. – № 5. – С. 50–53.

77. Технология изготовления клееных конструкций / под редакцией М. Боднара. – Москва : Мир, 1975. – 445 с.

78. **Кохановский, В. А.** Оптимальный крой препрегов для покрытий подшипников / В. А. Кохановский // Тезисы конференции. – Ростов-на-Дону : РИАТМ. – С. 28–29.

79. **Кохановский, В. А.** Формирование антифрикционного композиционного покрытия / В. А. Кохановский, Е. А. Бородин // Вестник ДГТУ. – 2001. – Т. 1, № 3 (9). – С. 155–159.

80. **Машков, Ю. К.** Динамика процесса трения в металлополимерных трибосистемах / Ю. К. Машков, А. И. Блесман // Долговечность трущихся деталей машин. – Вып. 4. – Москва : Машиностроение, 1990. – С. 244–253.

81. **Makinson, K. R.** The friction and transfer of PTFE / K. R. Makinson, D. Tabor // Proceedings of the Royal Society of London. – 1964. – Vol. .281. – P. 49–61. – DOI 10.1098/rspa.1964.0168.

82. **Steijn, R. P.** The sliding surface of polytetrafluorethylene an investigation with the electron microscope // Wear. – 1968. – Vol. 12, No. 3. – P. 193–212. – DOI 10.1016/0043-1648(68)90526-7.

83. **Lancaster, J. K.** On the initial stages of wear of dry-bearing composites // Running-in Progress in Tribology : 8-th Leed Lyon Symposium, 8-11 September, 1981. – Paper II, 1982. – P. 33–46. – DOI 10.1016/B978-0-408-01226-3.50010-X.

84. **Uetz, H.** Gleitreibunguntersuchungen mit polytetrafluor-ethylen bei hin- und hergehender Bewegung / H. Uetz, V. Hakenjos // Bautechnik. – 1967. – Bd. 44, No. 5. – S. 159–166.

85. **Гороховский, Г. А.** Поверхностное диспергирование динамически контактирующих полимеров и металла / Г. А. Гороховский. – Киев : Наукова думка, 1972. – 152 с.

86. **Билик, Ш. М.** Пары трения металл-пластмасса в машинах и механизмах / Ш. М. Билик. – Москва : Машиностроение, 1965. – 311 с.

87. **Гороховский, Г. А.** Влияние ориентации и кристалличности на трение и износ политетрафторэтилена / Г. А. Гороховский, И. И. Агулов // Механика полимеров. – 1966. – № 1. – С. 123–128.

88. **Мустафаев, В. А.** Холодное течение и плавление пластиков при тяжелых режимах трения / В. А. Мустафаев, Ю. Я. Подольский, В. В. Виноградов // Механика полимеров. – 1965. – № 5. – С. 813–818.

89. Справочник по триботехнике : в 3 т. / под редакцией М. Хебды и А. В. Чичинадзе. – Москва : Машиностроение, 1989.

90. **Lhymn, Ch.** Microscopy Study of the frictional wear of polytetrafluorethylene / Ch. Lhymn // Wear. – 1986. – Vol. 107, No. 2. – P. 95–105. – DOI 10.1016/0043-1648(86)90021-9.

91. **Welz, H. U.** Eigenschaften von PTFE-kompositionen und deren Anwendungsmöglichkeiten beim verschleißschutz / H. U. Welz // Schmierungstechnik. – 1982. – Bd. 13. – S. 179–182.

92. **Барамбойм, Н. К.** Механохимия высокомолекулярных соединений / Н. К. Барамбойм. – Москва : Химия, 1978. – 384 с.

93. **Arkles, B.** Wear Characteristics of Fluoro-polymer Composites / B. Arkles, S. Geracaris, R. Goudhue // Advances in Polymer Friction and Wear. – Part

2. – New York – London, 1974. – P. 663–688. – DOI 10.1007/978-1-4613-4461-2_18/

94. **Craig, W. D.** Initial Wear of PTFE lined bearings / W. D. Craig // Lubrication Engineering. – 1966. – Vol. 22, No 5. – P. 160.

95. **Hollander, A. E.** An application of topographical analysis to the wear of polymers / A. E. Hollander, J. K. Lancaster // Wear. – 1973. – No. 25. – P. 155–170. – DOI 10.1016/0043-1648(73)90068-9.

96. **Brainard, W. A.** Adhesion and friction of PTFE in contact with metals as studied by auger spectroscopy, field ion and scanning electron microscopy / W. A. Brainard, D. H. Buckley // Wear. – 1973. – No. 26. – P. 75–93.

97. **Кравченко, В. Н.** Исследование кинетики образования пленки фрикционного переноса антифрикционного самосмазывающегося композита на основе волокон политетрафторэтилена (ПТФЭ) методом рентгеноэлектронной спектроскопии / В. Н. Кравченко [и др.] // Динамика и прочность подвижного состава : сборник научных трудов РИИЖТ. – Ростов-на-Дону, 1986. – № 185. – С. 75–80.

98. This Fafnir composite bearing just went 6000 rounds with a road grader and won // Machine Design. – 1975. – Vol. 47, No. 14. – P. 53.

99. **Каргин, В. А.** Краткие очерки по физико-химии полимеров / В. А. Каргин, Г. П. Слонимский. – Москва : Химия, 1967. – 232 с.

100. **Айнбиндер, С. Б.** Введение в теорию трения полимеров / С. Б. Айнбиндер, Э. Л. Тюнина. – Рига : Зинатне, 1978. – 223 с.

101. **Боуден, Ф. П.** Трение и смазка твёрдых тел / Ф. П. Боуден. – Москва : Машиностроение, 1968. – 543 с.

102. **Костецкий, Б. И.** Трение, смазка и износ в машинах / Б. И. Костецкий. – Киев : Техніка, 1970. – 396 с.

103. **Чичинадзе, А. В.** Расчет и исследование внешнего трения при торможении / А. В. Чичинадзе. – Москва : Машиностроение, 1967. – 232 с.

104. **Крагельский, И. В.** Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – Москва : Машиностроение 1977. – 526 с.
105. Задачи нестационарного трения в машинах, приборах и аппаратах / редактор А. В. Чичинадзе. – Москва : Наука, 1978. – 247 с.
106. **Чичинадзе, А. В.** Трение, износ и смазка / А. В. Чичинадзе, Э. М. Берменер, Э. Д. Браун. – Москва : Машиностроение, 2003. – 575 с.
107. **Крагельский, И. В.** Методика испытания тормозных материалов на новой установке трения И-47 / И. В. Крагельский, А. В. Чичинадзе // ИМАШ АН СССР Заводская лаборатория, 1954. – № 5. – С. 607–610.
108. **Бартенев, Г. М.** Трение и износ полимеров / Г. М. Бартенев, В. В. Лаврентьев. – Ленинград : Химия, 1972. – 273 с.
109. **Пехович, А. И.** Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. – Ленинград, 1976. – 350 с.
110. **Богданович, П. Н.** Трение, смазка и износ в машинах / П. Н. Богданович, В. Я. Прушак, С. П. Богданович. – Минск : Высшая школа, 1999. – 374 с.
111. **Щедров, В. С.** Температурное поле фрикционной пары как основной параметр моделирования при испытании на трение и износ / В. С. Щедров, А. В. Чичинадзе, Г. И. Трояновская // Методы испытания на изнашивание. Труды совещания, состоявшегося 7–10 декабря 1960 года. – Москва : Издательство АН СССР, 1962. – С. 140–151.
112. **Чичинадзе, А. В.** Материалы в триботехнике нестационарных процессов / А. В. Чичинадзе. – Москва : Наука, 1986.
113. **Комбалов, В. С.** Оценка триботехнических свойств контактирующих поверхностей / В. С. Комбалов. – Москва : Наука, 1983. – 134 с.
114. **Кохановский, В. А.** Контактные давления в металлополимерной паре / В. А. Кохановский, С. И. Босый // Вестник ДГТУ. – 2002. – Т. 2, № 2 (11). – С. 221–235.

115. Основы трибологии (трение, износ, смазка) / под общей редакцией А. В. Чичинадзе. – 2-е изд. переработ, и доп. – Москва : Машиностроение, 2001. – 664 с.

116. **Винников, А. В.** Исследование трения и изнашивания пластмасс в упорных подшипниках скольжения, работающих без смазки : специальность 05.02.04 «Трение и износ в машинах» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Винников Алексей Вениаминович. – Ростов-на-Дону, 1979. – 20 с.

117. **Зиновьев, Е. В.** Физико-химическая механика трения и оценка асбофрикционных материалов / Е. В. Зиновьев, А. В. Чичинадзе. – Москва : Наука, 1978. – 205 с.

118. **Голубев, Г. А.** Расчет коэффициента взаимного перекрытия при трении цилиндров торцами со смещением / Г. А. Голубев // Трение и износ. – 1985. – Т. 6, № 5. – С. 821–826.

119. **Войтов, В. А.** О расположении материалов в парах трения по твердости и конструктивных способах повышении износостойкости / В. А. Войтов // Трение и износ. – 1994. – Т. 15, № 3. – С. 452–460.

120. **Войтов, В. А.** Масштабный фактор пары трения и его учет на этапе проектирования машин и механизмов / В. А. Войтов, А. И. Жерняк, М. И. Суханов // Трение и износ. – 1994. – Т. 15, № 1. – С. 109–116.

121. **Лебедев, В. М.** Оценка износостойкости резин, наполненных медным порошком / В. М. Лебедев, В. М. Радченко // Трение и износ. – 1984. – Т. 5, № 2. – С. 278–283 .

122. **Лебедев, В. М.** Работоспособность трибосопряжений сталь-сталь смазываемых пластичными смазочными материалами / В. М. Лебедев, А. В. Баранов // Трение и износ. – 1988. – Т. 9, № 6. – С. 1040–1047.

123. Контактная задача для упругого кольца / В. М. Александров, В. А. [и др.] // Научные сообщения РГУ 1964 г. Серия : Точные и естественные науки : сборник. – Ростов -на-Дону : РГУ, 1965. – С. 64–65.

124. **Амедзаде, Ю. А.** Теория упругости / Ю. А. Амедзаде. – Москва : Высшая школа, 1971. – 288 с.
125. **Добычин, М. Н.** Влияние трения на контактные параметры пары вал – втулка / М. Н. Добычин, С. Л. Гафнер // Проблемы трения и изнашивания. – Киев : Тех. шк., 1976. – С. 30–36.
126. **Штаерман, И. Я.** Контактная задача теории упругости / И. Я. Штаерман. – Москва : Гостехтеориздат, 1949. – 272 с.
127. **Александров, В. М.** Контактные задачи для тел с тонкими покрытиями и прослойками / В. М. Александров, С. М. Мхитарян. – Москва : Наука, 1983. – 488 с.
128. **Богатин, О. Б.** Основы расчёта полимерных узлов трения / О. Б. Богатин, В. А. Морозов, И. Н. Черский. – Новосибирск : Наука, 1983. – 214 с.
129. **Горячева, И. Г.** Контактные задачи в трибологии / И. Г. Горячева, М. Н. Добычин. – Москва : Машиностроение, 1988. – 256 с.
130. **Кузьменко, А. Г.** Контактные задачи с учётом износа для цилиндрических опор скольжения / А. Г. Кузьменко // Трение и износ. – 1981. – Т. 2, № 3. – С. 502–512.
131. **Kokhanovskii, V. A.** Metal–polymer frictional contact in reciprocating motion / V. A. Kokhanovskii, N. V. Nikhotina // Russian Engineering Research. – 2022. – Т. 42, № 3. – С. 223–227. – DOI 10.3103/S1068798X22030091.
132. **Кохановский, В. А.** Реономные свойства антифрикционных полимерных композитов / В. А. Кохановский, Ю. Н. Пономарёв, Ю. М. Ворожеин // Гидросистемы технологических и мобильных машин : межвузовский сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 1995. – С. 107–111.
133. **Босый, С. И.** Условия контактирования обратной пары с полимерным покрытием / С. И. Босый // Управление, конкурентоспособность, автоматизация : сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону : ГОУДПО, 2002. – Вып. 1. – С. 40–45.

134. **Лехницкий, С. Г.** Теория упругости анизотропного тела / С. Г. Лехницкий. – Москва : Наука, 1976. – 416 с.
135. **Gee, F. W. Z.** Selektion of material for lubricated journal bearings / F. W. Z. Gee // Wear. – 1976. – Vol. 36. – P. 67.
136. **Латишенко, В. А.** Диагностика жесткости и прочности материалов / В. А. Латишенко. – Рига : Зинатне, 1968. – 320 с.
137. **Малмейстер, А. К.** Сопротивление жестких полимерных материалов / А. К. Малмейстер, В. П. Тамуж, Г. А. Тетерс. – Рига : Зинатне, 1972. – 500 с.
138. **Бабешко, В. А.** Контактная задача термоупругости для тонкого кольца / В. А. Бабешко, В. М. Александров, О. М. Пенин // Контактные задачи и их инженерные приложения : сборник. – Москва : НИИМат, 1969. – С. 2.
139. **Работнов, Ю. М.** Механика деформируемого твердого тела / Ю. М. Работнов. – Москва : Наука, 1979. – 744 с.
140. **Кохановский, В. А.** Модуль упругости покрытий на основе самосмазывающихся волокнитов / В. А. Кохановский // Известия СКНЦВШ. Серия : Технические науки. – 1986. – № 2. – С. 80–83.
141. **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.
142. **Нихотина, Н. В.** Температура в металлополимерных трибосистемах / Н. В. Нихотина, Ю. А. Проскорякова // Повышение эффективности технических систем : сборник научных трудов Всероссийской национальной научно-практической онлайн-конференции. – Ростов-на-Дону, 2020. – С. 143–147.
143. **Гоц, А. Н.** Кинематика и динамика кривошипно-шатунного механизма поршневых двигателей : учебное пособие / А. Н. Гоц. – Владимир : Редакционно-издательский комплекс ВлГУ, 2005. – 124 с.
144. **Шорин, С. Н.** Теплопередача / С. Н. Шорин. – Москва : Высшая школа, 1964. – 490 с.

145. **Попов, Э. Н.** Исследование долговечности фторопластсодержащих полиамидных подшипников скольжения при трении по стали : специальность 05.02.04 «Трение и износ в машинах» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Попов Эдуард Николаевич ; Новочеркасский политехнический институт им. С. Орджоникидзе. – Новочеркасск, 1968. – 178 с.

146. **Платонов, В. Э.** Подшипники из полиамидов. – Москва : Машгиз, 1961. – 112 с.

147. **Евдокимов, Ю. А.** Тепловая задача металлополимерных трибосопряжений / Ю. А. Евдокимов, В. И. Колесников, С. А. Подрезов. – Ростов-на-Дону : РГУ, 1987. – 165 с.

148. **Блюмен, А. В.** Методология расчетной оценки надежности триботехнических сопряжений по износу / А. В. Блюмен, М. Н. Добычин // Трение и износ. – 1992. – Т. 13, № 1. – С. 90–109.

149. **Гольдман, А. Я.** Объемное деформирование пластмасс / А. Я. Гольдман. – Ленинград : Машиностроение, 1984. – 232 с.

150. **Уржумцев, Ю. С.** Прогностика деформативности полимерных материалов / Ю. С. Уржумцев, Р. Д. Максимов. – Рига : Зинатне, 1975. – 416 с.

151. Марочник сталей и сплавов / под редакцией В. Г. Сорокина. – Москва : Машиностроение, 1980. – 640 с.

152. **Нихотина, Н. В.** Методика исследований антифрикционных полимерных покрытий / Н. В. Нихотина // Транспорт: наука, образование, производство : труды Международной научно-практической конференции. – 2020. – С. 301–305.

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

154. **Айнбиндер, С. Б.** Свойства полимеров в различных напряженных состояниях / С. Б. Айнбиндер, Э. Л. Тюнина, К. И. Цируле. – Москва : Химия, 1981. – 232 с.

155. **Веденяпин, Г. В.** Общая методика экспериментальных исследований и обработки опытных данных / Г. В. Веденяпин. – Москва : Колос, 1965. – 199 с.

156. **Дружинин, Н. К.** Выборочное наблюдение и эксперимент / Н. К. Дружинин. – Москва : Статистика, 1977. – 148 с.

157. **Спиридонов, А. А.** Планирование эксперимента / А. А. Спиридонов, Н. Г. Васильев. – Свердловск : Изд-во УПИ, 1985. – 149 с.

158. **Кохановский, В. А.** Идентификация полимерных реологических систем / В. А. Кохановский, Ю. Н. Пономарёв, Ю. М. Ворожеин // Термическая обработка стали (теория, технология, техника эксперимента). – Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 1994. – С. 121–126.

159. **Рузинов, Л. П.** Планирование эксперимента в химии и в химической технологии / Л. П. Рузинов, Р. И. Слободчиков. – Москва : Химия, 1980. – 280 с.

160. **Адлер, Ю. П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва : Наука, 1976. – 276 с.

161. **Мюллер, П.** Таблицы математической статистики / П. Мюллер, П. Нойман, Р. Шторм // Москва : Финансы и статистика, 1982. – 272 с.

162. Методика статистической обработки эмпирических данных. – Москва : Изд-во стандартов, 1966. – 100 с.

163. **Бронштейн, И. Н.** Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – Москва : Наука, 1986. – 544 с.

164. **Большев, Л. Н.** Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. – Москва, 1983. – 416 с.

165. Конструкция антифрикционных фторопластсодержащих покрытий / В. А. Кохановский, С. И. Иванов, А. А. Петренко // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2017. – № 10. – С. 455–458.

166. **Kokhanovskiy, V. A.** Friction of fluoroplastic coatings in swinging motion / V. A. Kokhanovskiy, N. V. Nikhotina // Russian Engineering Research. – 2022. – Т. 42, № 4. – С. 339–341. – DOI 10.3103/S1068798X22040177.

167. **Кохановский, В. А.** Трение и изнашивание фторопластсодержащих композитов (обзор) / В. А. Кохановский, Ю. А. Петров // Вестник ДГТУ. – 2009. – Т. 9, № 1 (40). – С. 30–35.

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

169. **Патент на полезную модель RU 177431 U1.** Узел трения скольжения с плавающим вкладышем для реверсивного движения / В. А. Кохановский, Н. В. Нихотина, И. В. Больших. – № 2017120266 ; заявл. 08.06.2017 ; опубл. 21.02.2018, Бюл. № 6. – 11 стр.

170. Инженерия поверхности деталей / под редакцией А. Г. Сулова. – Москва : Машиностроение, 2008. – 320 с.

171. К механизму фрикционного переноса и самосмазывания ПТФЭ / А. Н. Синатров, В. А. Смуругов, В. Г. Савкин // Трение и износ. – 1991. – Т. 12, № 6. – С. 1023–1027.

172. Контртела в трибосистемах с фторопластсодержащим покрытием / В. А. Кохановский, Ю. А. Петров, М. А. Мукутадзе [и др.] // Вестник ДГТУ. – 2007. – Т. 7, № 2 (33). – С. 177–181.

173. **Kokhanovskii, V.** Coefficient of mutual overlap in metal-polymer tribosystems / V. Kokhanovskii, N. Nihotina, M. Nikitina // Journal of Physics : Conference Series. Сер. «Intelligent Information Technology and Mathematical Modeling 2021, ИТММ 2021- Mathematical Modeling and Computational Methods

in Problems of Electromagnetism, Electronics and Physics of Welding». – 2021. – С. 052031. – DOI 10.1088/1742-6596/2131/5/052031.

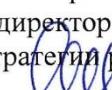
174. **Карасик, И. И.** Прирабатываемость материалов для подшипников скольжения / И. И. Карасик. – Москва : Наука, 1978. – 136 с.

175. **Нихотина, Н. В.** Приработка фторопластсодержащих покрытий при поступательном движении / Н. В. Нихотина // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2022. – № 1 (85). – С. 29–35. – DOI 10.46973/0201-727X_2022_1_29.

176. **Кохановский, В. А.** Планирование экспериментальных исследований / В. А. Кохановский, М. Х. Сергеева. – Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2014. – 256 с.

177. **Кохановский, В. А.** Деформационные свойства композиционных покрытий / В. А. Кохановский, С. И. Босый // Трибология на железнодорожном транспорте : сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2001. – С. 86–90.

178. **Металлический компонент металлополимерных трибосистем / В. А. Кохановский, И. В. Больших, С. И. Иванов, А. А. Петренко// Сборник трудов Международной научной конференции «Мех Трибо Транс – 2016».** – Т. II. – Ростов-на-Дону : РГУПС. – С. 182– 185.

УТВЕРЖДАЮ Проректор по научной работе ФГБОУ ВО РГУПС д.т.н., профессор  А.Н. Гуда	УТВЕРЖДАЮ Первый заместитель генерального директора по финансам и реализации стратегии развития ПАО «Роствертол»  С.В. Шамирина
--	--

Акт

промышленных испытаний опоры скольжения с полимерным композиционным покрытием при возвратно-поступательном движении

Комиссия, включающая представителей ФГБОУ ВО РГУПС В.А. Кохановского, Н.В. Нихотину, и ПАО Роствертол составила настоящий акт по результатам промышленных испытаний специальных опор скольжения с антифрикционным композиционным полимерным покрытием.

Цель испытаний – установить ресурс опор скольжения с фторопластовым самосмазывающимся композиционным покрытием при возвратно-поступательном движении, характеризующимся значительной массой контактирующих деталей и коэффициентом взаимного перекрытия меньшим единицы.

Объект испытаний – опора скольжения, представляющая собой деталь коробчатой формы с наружным полимерным покрытием, устанавливаемую на подпружиненный контактный элемент меньшего размера (подвижную каретку) намоточного устройства. Скорость перемещения подвижной части в зависимости от характера намотки варьируется в процессе движения в пределах 0,1 – 0,5 м/с. Однако, условия контактирования, в связи со значительной массой объекта и очень малым коэффициентом перекрытия, ограничивают нагрев металлополимерной контактной зоны.

Периодичность регламентных технических осмотров и обслуживания намоточного агрегата – 2 раза в месяц. Регламентные работы включают контроль контактных поверхностей трения.

Методика испытаний. Опытные покрытия были установлены на двух подпружиненных опорах. Испытания опор с антифрикционными покрытиями проводились при работе оборудования в соответствии с директивным технологическим процессом. В период испытаний не наблюдалось нарушений требуемой скорости движения каретки и сбоя в ее перемещении.

Результаты испытаний. Результаты исследований показали полное отсутствие отслаивания покрытий и следов нарушения его рабочей поверхности.

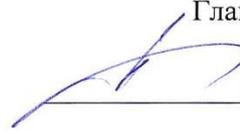
От ФГБОУ ВО РГУПС
Аспирант ФГБОУ ВО РГУПС

 Н.В. Нихотина

д.т.н., профессор

 В.А. Кохановский

От ПАО «Роствертол»
Главный инженер ЛЗ

 И.Ю. Меркулов