

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

На правах рукописи

Больших Иван Валерьевич

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ ТРИБОСИСТЕМ
С КОМПОЗИЦИОННЫМ ПОКРЫТИЕМ ХОЛОДНОГО ОТВЕРЖДЕНИЯ

05.02.04 - 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

2019 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	10
1.1 Область применения самосмазывающихся покрытий	10
1.2 Состав и структура композита	16
1.3 Технология нанесения	26
1.4 Выводы	30
1.5 Цель и задачи исследований	31
Глава 2. ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЁТЫ	33
2.1 Определение контактной температуре покрытия	33
2.2 Моделирование тепловых процессов	42
2.3 Выводы	50
Глава 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	51
3.1 Структура исследований	51
3.2 Оборудование и инструменты	55
3.3 Применяемые материалы и образцы	66
3.4 Планирование экспериментов и обработка результатов	73
Глава 4 КОМПОЗИЦИОННОЕ АНТИФРИКЦИОННОЕ ПОКРЫТИЕ И ЕГО ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА	76
4.1 Разработка композита для антифрикционных покрытий	76
4.1.1 Технология нанесения покрытий	77
4.1.2 Прочность матричного материала	78
4.1.3 Адгезионная прочность покрытий	85
4.1.4 Вязкоупругие свойства покрытия	87
4.2 Оптимизация состава композита	92
4.3 Триботехнические свойства антифрикционных покрытий	99
4.4 Определение теплофизических свойств покрытия	108
4.5 Выводы	112

Глава 5. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ	113
5.1 Сравнение теоретических и экспериментальных результатов	113
5.2 Промышленные испытания	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	120

Введение

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

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

Композиционная структура полимерного покрытия образована специальным тканым каркасом и фенольной матрицей. Ткани имеют рабочую поверхность из антифрикционных нитей фторопласта («полифен»), а изнанку – из прочных нитей полиимида («аримид Т»).

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

Расширение области промышленного применения высокоэффективных антифрикционных покрытий требует разработки нового матричного связующего холодного отверждения. Это вызывает необходимость в решении целого

комплекса связанных задач о технологических режимах нанесения покрытия и его триботехнических характеристиках.

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

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

Степень разработанности темы исследования. Конструкция и технология применения фторопластсодержащих антифрикционных покрытий, рассматриваемого класса, достаточно хорошо исследованы для относительно малогабаритных деталей. Их разработкой и применением занимались как ученые нашей страны Г.П. Барчан, В.А. Кохановский, А.С. Кужаров, так и зарубежные W.D.Craig, J.K. Lancaster. При этом нанесение композиционного покрытия выполнялось, в основном, при горячем отверждении, а некоторые результаты применения холодноотверждаемой матрицы носят разовый несистематический характер. Всё это значительно снижает возможности расширения применения антифрикционных покрытий данного класса и требует дальнейших исследований.

Цель и задачи работы. Расширение области применения антифрикционных полимерных композиционных покрытий на основе модификации матричного связующего холодного отверждения.

Выполнение поставленной цели требует решения следующего комплекса задач:

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

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

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

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

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

Научная новизна результатов исследований заключается в следующем.

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

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

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

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

Теоретическая и практическая значимость исследований.

Теоретическая часть работы включает следующее.

1. Расчёт пороговой и фактической величины, допустимой при эксплуатации покрытия, температуры и установленная зависимость температуры

зоны трения, в исследуемой металлополимерной трибосистеме от режимов нагружения.

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

Практическая значимость работы заключается в следующем.

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

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

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

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

Методы исследований. Основные теоретические исследования базируются на известных классических зависимостях Фурье, Ньютона – Рихмана и других исследователей.

Все экспериментальные исследования были выполнены на современном, специально разработанном оборудовании, которое было своевременно поверено. К нему относится стенд, собранный на основе сверлильного станка модели 2М112 и установка для определения вязкоупругих свойств покрытий. Эксперименты выполнялись на основе многофакторных планов; их результаты обрабатывались статистически и оценивались с достоверностью 95%.

Положения, выносимые на защиту.

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

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

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

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

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

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

Апробация результатов. Основные положения работы выносились на обсуждения участников 13-ой Международной научно-практической конференции. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова; научно-технической профессорско-преподавательской конференции ДГТУ в 2015 г.; Международной научной

конференции «МЕХТРИБОТРАНС-2016»; Всероссийской национальной научно-практической конференции «Наука-2017»; Всероссийской национальной научно-практической конференции «Наука-2018».

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

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

Диссертация выполнялась в лабораториях кафедры «Технология металлов» и «Теоретическая механика» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения».

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Эффективность эксплуатации и долговечность современных машин зависят на 80% зависят от износостойкости применяемых трибосистем, особенно в тяжело нагруженных узлах [1-4].

Использование металлополимерных трибосистем с композиционными антифрикционными покрытиями позволило достигнуть существенного прогресса в повышении несущей способности и ресурса трибосистем. Эти материалы обладают жёсткостью на порядки меньшей, чем металлы, и, деформируясь под действием рабочих нагрузок, существенно увеличивают площадь фактического контакта трибосопряжений, снижая величину фактически действующих контактных напряжений [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13].

В зависимости от требуемого ресурса, условий эксплуатации и экономичности полимерные материалы используются в виде различных покрытий, облицовок и монолитных деталей трибосистем. В последние годы очень быстро расширяется группа композитов на основе тканых компонентов. [14, 15, 16, 17].

1.1 Область применения самосмазывающихся покрытий

Современные антифрикционные полимерные самосмазывающиеся композиционные материалы являются в настоящее время одними из наиболее перспективных для применения в тяжело нагруженных узлах трения [18, 19].

Материалы рассматриваемого класса содержат ткани из полимерных нитей различной природы, выполняющих как армирующую, так и антифрикционную функцию [20, 21, 22].

Рассматриваемые композиционные материалы были разработаны и эффективно применяются в виде покрытий с армирующей и одновременно антифрикционной компонентой на тканной основе в авиакосмической технике [23, 24, 25] в шарнирных подшипниках серии ШЛТ [26, 27]. Пример

крупносерийного выпуска различных типоразмеров этой продукции на ГПЗ №3 представлен на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1. Шарнирные подшипники серии ШЛТ

В настоящее время покрытия из этих полимерных композитов широко используются в самых разных отраслях современной отечественной и зарубежной техники: автотранспортной, строительной, грузоподъемной, сельскохозяйственной и ряде других областей [28, 29].

Массовый выпуск различных типов подшипников с композиционными полимерными самосмазывающимися покрытиями выполняется целым рядом зарубежных фирм: HUNGER, INA ELGES, SKF и др. (таблица 1.1).

На самосмазывающемся покрытии работает поворотная опора ракетного двигателя [30]. В шасси, хвостовом оперении и системе управления «Боинга 747» применяется более 1000 таких подшипников [31]. Подобные покрытия нашли

применение в транспортном, подъемно-транспортном машиностроении [31], в вариаторах [32] и плоских направляющих в виде накладок [33, 34].

Антифрикционные композиционные покрытия рассматриваемого класса широко используются в поворотных шкворнях, шаровых опорах и шарнирах рулевых тяг легковых автомобилей марок «Жигули», «Фиат», «Dino» [35,36].

Таблица 1.1 - Предельные эксплуатационные режимы покрытий

№ п/п	Фирма, торговая марка или состав материала	Предельные режимы эксплуатации			Источ- ник
		Уд. контакт нагрузка, Р, МПа	Скорость скольжения V, м/с	Темпера- тура Т, К(°С)	
1	2	3	4	5	6
1	фирма «HUNGER»	130	-	533(260)	[37]
2	фирма «LEAR SIEGLER»	281	0,762	505(232)	[38]
3	материал «Fiberslip»	300	1,0	-	[39]
4	фирма «FIBERGLIDE»	210	0,5	523(250)	[40]
5	ПТФЭ и стекловолокно	350	0,3	-	[41]
6	фирма «INA ELGES»	100	0,1	473(200)	[42]
7	фирма «ADR»	120	-	423(150)	[43]
8	ткань с ПТФЭ и эпоксидной смолой	140	1,5	403(130)	[44]
9	фирма «FAFNIR»	210	0,762	394(121)	[45]
10	материал «Fiberglide»	145	0,85	533(260)	[46, 47, 48]

В текстильной и пищевой промышленности, где применение смазочных материалов ограничено, антифрикционные самосмазывающиеся композиты и покрытия из них практически незаменимы. Использование этих композитов в

ткачком оборудовании позволило избежать применения жидких и пластичных смазочных материалов [37, 49, 41, 50].

Кроме того, самосмазывающиеся полимерные покрытия используются в самом разном технологическом металлообрабатывающем оборудовании. Они нашли применение в качестве покрытий направляющих суппортов металлорежущих станков токарной группы и направляющих кривошипного обрезающего пресса (рисунок 1.2) усилием 2500кН [24, 33, 34].

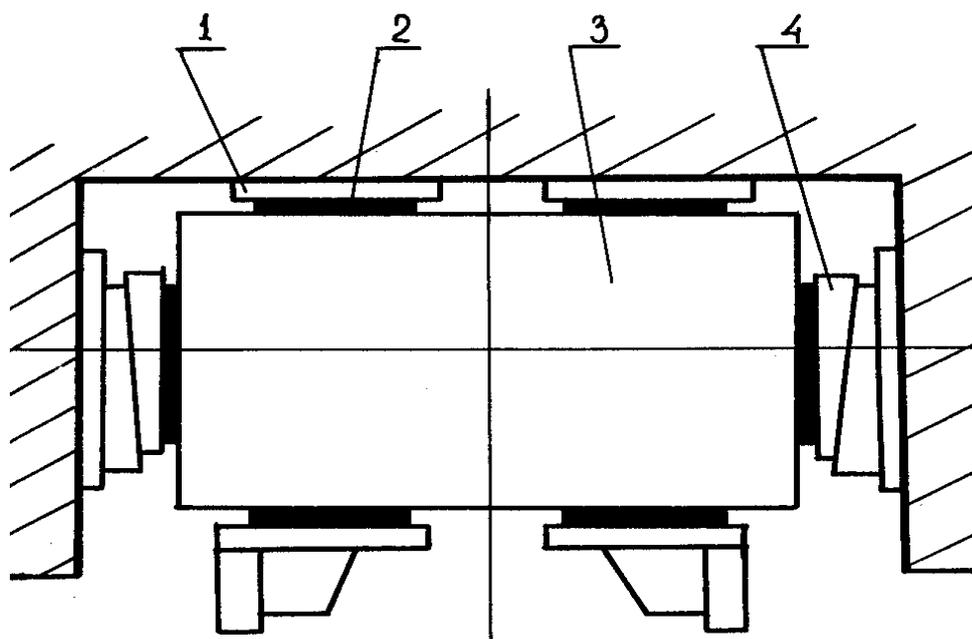


Рисунок 1.2 Схема расположения направляющих с покрытием
(1-планка, 2-покрытие, 3-ползун, 4-регулятор зазора)

Планки с покрытием состояли из двух модулей длиной 280мм, а композит покрытия формировался на основе технической ткани «Нафтлен-8» и эпоксидного матричного связующего в виде товарного клея «К300». В данном случае нанесение антифрикционного покрытия выполнялось во время ремонта пресса и применялось связующее горячего отверждения. Отсутствие нагревательного устройства и габариты направляющих вызвали необходимость разделения направляющих на отдельные модули, что существенно увеличило трудоемкость и снизило качество покрытия из-за стыков.

Широкое применение металлополимерных трибосистем с антифрикционными полимерными композиционными покрытиями в самых разных отраслях промышленности обусловлено способностью данного материала одновременно обеспечивать целый комплекс конструкционных и антифрикционных свойств трибосистем при одновременном повышении экономичности [6, 27, 28, 51, 52].

Удешевление триботехнических конструкций получается за счет отсутствия сложных систем смазки и необходимости в частых техосмотрах.

К основным преимуществам этих покрытий можно отнести следующие:

- высокие ресурсы, обеспечивающие до 10^8 циклов нагружения;
- исключение текущего обслуживания по нанесению смазочных материалов в результате самосмазывания;
- значительная несущая способность до 250МПа;
- способность снижать вибронагружение трибоконтакта и уровень шума трибосистемы;
- низкие потери на трение (коэффициент трения до 0,02);
- способность работать в активных (кислых и щелочных) водных и жидких смазочных средах;
- полное исключение процессов схватывания (как первого, так и второго рода).
- экономичность.

Следует отметить, что наиболее термостойкими являются композиционные покрытия на фенольных (АФК-101), эпоксидных (К300) и других матричных связующих горячего отверждения. Для этих связующих используются специальные автоклавы практически любых габаритов. Однако для производства относительно малых серий крупногабаритных изделий или при ремонтах различной техники дополнительное крупногабаритное термооборудование может являться неэкономичным. В этих условиях представляется необходимой разработка матричных связующих холодного отверждения со специальными присадками, обеспечивающими как термостойкость, так и адгезионные свойства к

армирующей компоненте композита и субстрату. Подобные материалы могут значительно расширить область рационального применения рассматриваемых металлополимерных трибосистем с композиционными покрытиями [53, 54].

Кроме того, в металлополимерных трибосистемах, в связи со значительным различием прочности и жесткости полимерной опоры и стального вала, существенное влияние на ресурс оказывает шероховатость поверхности стальных контртел [55, 56, 57, 58].

Твердые шероховатости сопряжённых металлических деталей [59, 60], контактирующие с самосмазывающимися композиционными покрытиями, могут разрывать отдельные филаменты фторопластовых нитей или разрушать контактную поверхность в результате микрорезания. В работе [61] приведены зависимости основных триботехнических параметров композитов рассматриваемого класса от шероховатости сопряженной металлической поверхности (рисунок 1.3).

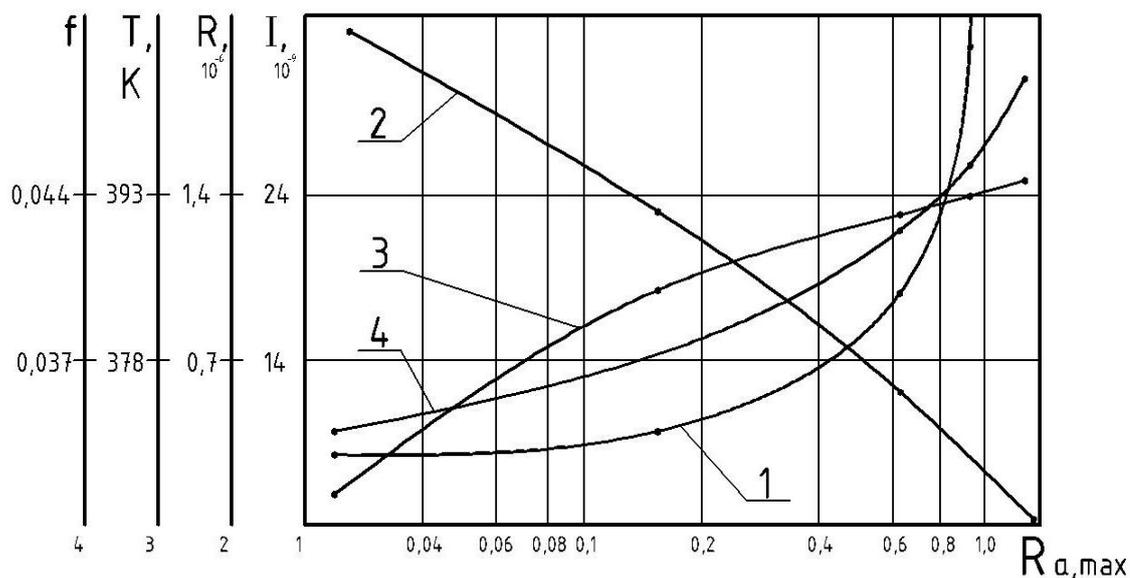


Рисунок 1.3 Влияние шероховатости контртела на параметры металлополимерной трибосистемы с композиционным покрытием: 1 – интенсивность изнашивания; 2 – ресурс; 3 – температура; 4 – коэффициент трения

Необходимо отметить, что, приведенные на рисунке 1.3 экспериментальные результаты относятся к антифрикционным композитам с фенольным матричным

связующим горячего отверждения. Данные о поведении исследуемых материалов на связующих другой химической природы, включая эпоксидные холодного отверждения в литературе полностью отсутствуют.

Таким образом, несмотря на высокую эффективность использования антифрикционных самосмазывающихся покрытий в целом ряде трибосистем, изменение типа матричного связующего, для расширения области их применения, требует дополнительных исследований.

1.2 Состав и структура композита

Каждый компонент рассматриваемого композита выбран с целью выполнения определенной функции. Так, фторопластовые волокна (марка «полифен») выполняют основную антифрикционную функцию, обеспечивая самосмазывание контактной области. Преимуществом полимерных волокон по сравнению с полимерным блоком является значительное уменьшение деформации ползучести при одновременном росте прочностных характеристик практически на два порядка. Это объясняется ориентированием макромолекул полимера вдоль волокон, что достигается многократной их вытяжкой при нагреве [62, 63, 64, 65].

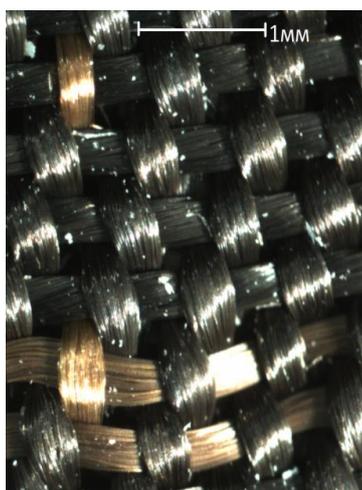
Однако фторопласт не имеет адгезии практически ко всем имеющимся связующим и фиксирование волокон фторопласта в композите или на субстрате невозможно. Кроме того, несмотря на существенное повышение прочности при применении фторопласта в виде волокон ($E = 210...270\text{МПа}$), она остается очень низкой и не удовлетворяет требованиям эксплуатации [9, 66, 67, 68].

Изложенное заставляет вплетать нити из фторопластовых волокон в специальные технические ткани атласного или саржевого плетения. При этом фторопластовые нити низкой прочности механически соединяются с другими, гораздо более прочными нитями, которые одновременно обладают высокой адгезией к связующим. В качестве прочных, в нашем случае, применяются нити из полиимидных волокон «аримид Т» ($E = 650...700\text{МПа}$) [26, 69, 70, 71].

Армирующий компонент фторопластсодержащего композита представляет собой одно- или полуторослойные ткани. Последние выполнены таким образом, что на лицевую поверхность выведено до 100% ПТФЭ, обеспечивающего самосмазывание, а на изнанку, служащую для закрепления покрытия на субстрате, до 90% полиимидных нитей с хорошей адгезией к связующему. В этом случае рабочий слой композита связан с матричным связующим только механически за счет межфиламентных промежутков во фторопластовых нитях. При этом композит имеет «низкую» матрицу [9, 69, 72].

Для шарнирных подшипников скольжения до типо-размера ШЛТ15 используются полуторослойная ткань атласного переплетения (артикул 5392-81 ТУ ВНИИПХВ 300 - 83), толщиной 0,23мм, а для шарниров большего размера – покрытие из полуторослойной саржи 1/3, толщиной 0,45 мм.

В случае необходимости повышения прочности и жесткости композиционного покрытия на рабочей поверхности ткани образуется сетка из полиимидных нитей с шагом 5 мм (каждый 6-й уток и 12-я основа), которые имеют адгезию к связующему и выводят матрицу на рабочую поверхность. Так, для шарнирных подшипников размером более 15мм применяется полуторослойная саржа 1/3 (артикул 5384/3 - 80 ТУ ВНИИПХВ 278 - 81) (рисунок 1.4), толщиной 0,45 мм.



а)



б)

Рисунок 1.4. Полуторослойная двууточная саржа: а) рабочая поверхность, б) изнанка

Обе рассмотренные ткани выполнены с нитями основы и верхним утком из фторопластовых нитей торговой марки «полифен» (ТУ 6-06-9-7-81). Нижний уток изготовлен из полиимидных нитей - «аримид Т» (ТУ 6-06-9-11-80) (см. рис.1.5,б).

Во все полуторослойные ткани фторопластовые нити вводятся путем ткацких переплетений. Использование более жестких однослойных тканей саржевого плетения (например, полотна – саржи 1/1 артикул5386/1 – 80 по ТУ ВНИИПХВ 277 - 80) требует другого способа. В этом случае каждая нить и утка и основы ткани представляет собой скрутку двух нитей: фторопластовой и полиимидной (рисунок 1.5,а).

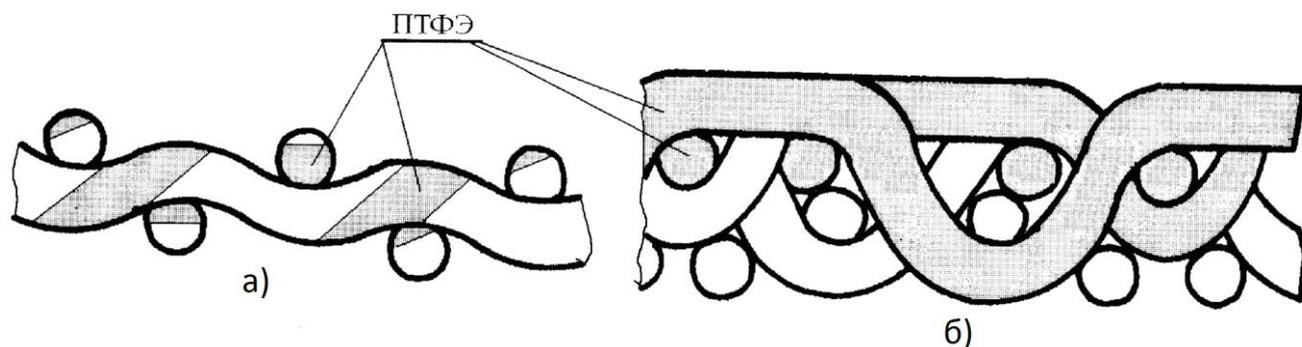


Рисунок 1.5. Однослойная саржа а) и полуторослойный атлас б)

Исследуемый композиционный материал является гибридным, так как содержит в армирующем каркасе нити из волокон разной химической природы и строения.

Функциональным антифрикционным компонентом композита, ответственным за триботехнические свойства и ресурс является фторопласт, вплетённый в тканную армирующую компоненту. В зависимости от типа плетения ткани («атлас», «саржа» и др.) на её рабочую поверхность может быть выведено разное количество фторопластовых нитей. В связи с тем, что фторопласт, работая в режиме самосмазывания, переносится по адгезионному механизму на контртело, триботехнические свойства покрытия зависят от объёма фторопласта в рабочем слое композита. Для антифрикционных покрытий на

фенольном связующем количество фторопласта определено экспериментально и представлено на рисунке 1.6.

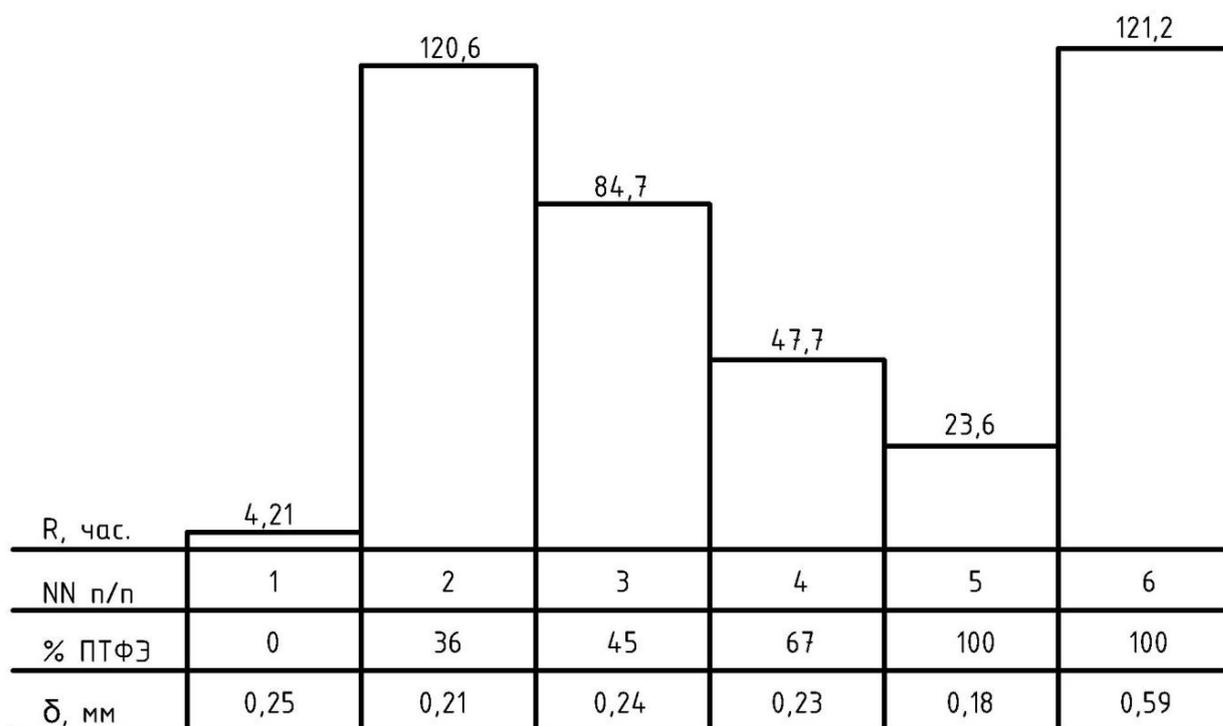


Рисунок 1.6 Влияние количества фторопласта в рабочем слое на ресурс покрытия

Таким образом, если на рабочую поверхность выведено некоторое количество прочных нитей, то перенос фторопласта и его расход осуществляется медленнее и ресурс покрытия растет. Следовательно, ресурс покрытия может быть повышен двумя способами: общим увеличением количества фторопласта и определенным повышением количества высокопрочных волокон.

Матричное связующее выполняет функцию объединения всех компонентов композита в единый блок, обеспечивает адгезионное фиксирование покрытия на рабочей поверхности деталей трибосистем, а также перераспределяет действующие усилия между отдельными прочными нитями армирующей компоненты, выравнивая нагрузку.

В качестве матрицы композита могут быть использованы самые разные связующие [40, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81]: эпоксидные, фенолоформальдегидные, полиимидные, кремнийорганические, полиэфирные,

цианакрилатные и т.п. Одними из наиболее экономичных при достаточной термостойкости являются фенолоформальдегидные смолы, модифицированные термостойким каучуком, например, связующее АФК-101(ГИПК-114). Его применяют в отечественных материалах данного класса [82, 83].

Это связующее представляет собой растворный клей, из резольной смолы, модифицированной термостойким каучуком. Оно отверждается при температуре 250°C, что представляется неэкономичным для крупногабаритных деталей трибосистем, выпускаемых в условиях единичного или мелкосерийного производства, а также для ремонтируемых деталей трения. Поэтому для подобных работ гораздо перспективнее связующее холодного отверждения. Наиболее доступными и экономичными являются эпоксидные товарные клеи.

В зависимости от способа отверждения эпоксидные смолы можно разделить на:

- эпоксидные смолы холодного отверждения (в качестве отвердителя применяются полиэтиленполиамин, гексаметилендиамин, метафенилендиамин);
- эпоксидные смолы горячего отверждения (в качестве отвердителя применяются триэтаноламин, дициандиамида, малеиновый, фталевый и янтарный ангидриды или фенолоформальдегидные смолы).

Отверждение эпоксидных смол может происходить как при комнатной, так и при повышенной температурах, что зависит от типа отвердителя и его количества.

Эпоксидные смолы обладают большим количеством положительных качеств (технологичностью, малой усадкой, хорошей адгезией к различным наполнителям, низким влагопоглощением), данные факторы указывают на универсальность свойств этого связующего.

Хотелось бы отметить, что эпоксидные олигомеры, благодаря сочетанию ценных свойств, являются основой многочисленных клеящих систем и прежде всего высокопрочных конструкционных клеев. Эпоксидные и эпоксиднодиановые смолы обладают следующими преимуществами [82, 83]:

- способностью быстро отверждаться при повышенных и комнатной температурах;
- при их отверждении не происходит значительных выделений летучих продуктов;
- в клеевом шве образуются относительно невысокие остаточные напряжения и усадка;
- прочность шва обеспечивается до 200⁰С и кратковременно 315⁰С;
- имеются широкие возможности управления эксплуатационными свойствами клеевых композиций, добавлением специальных присадок.

Одним из наиболее важных свойств эпоксидных смол является их длительная жизнеспособность, выражающаяся в продолжительности времени пребывания в полуотверждённом состоянии.

В зависимости от условий применения покрытий в различных трибосистемах и окружающих средах, требования к их механическим и триботехническим свойствам могут значительно изменяться. Возникает необходимость в материалах, обладающих, кроме износостойкости, высокой жесткостью (подшипники систем управления), нечувствительностью силы трения к изменению температуры (исключение резонансных явлений) и другими особенностями. Для повышения уровня необходимых эксплуатационных свойств в матричный материал добавляют различные присадки, добавки или наполнители. Это изменяет не только механические и теплофизические свойства матричного связующего, но и полимерного композита в целом.

За рубежом эпоксидные клеевые композиции холодного отверждения выпускаются многими фирмами, например, Giba-Geigy [83] (марки Аральдит, Giba ECN и EPN); Shell Chemical Co. (марка Epon); Union Carbide (марки Bakelite ERL, ERR); Dow Chemical Co. (марки DER, DEN, Reinhold Chemicals (марки Epotuf). В нашей стране количество выпускаемых марок эпоксидных клеев значительно меньше. Рассмотрим в таблице 1.2 основные характеристики отечественных товарных эпоксидных клеевых композиций и области их использования.

В чистом виде эпоксидные смолы имеют ограниченные прочностные и другие эксплуатационные свойства. При использовании их в качестве матричного материала антифрикционного композиционного покрытия они имеют значительный коэффициент наполнения армирующей тканью. Однако для повышения прочностных и противоизносных свойств, а также термостойкости связующего и композита в целом остаются значительные резервы. Влияние применяемых модификаторов и наполнителей рассмотрим на примере монолитных композитов с эпоксидной матрицей [82].

Таблица 1.2 - Состав и свойство отечественных эпоксидных клеев холодного отверждения

Марка	Олигомер	Отвердитель	Модификатор	Максимальная температура, °С	Назначение: склеивание
СКДА	Эпоксикремнийорганический олигомер		Клей содержит наполнитель	400	стали, титана, меди, латуни и других металлов
ТКЛ-75	ЭД-20	Низкомолекулярный полиамид Л-20	Нитрид бора	200	металлов, стеклопластиков и других неметаллических материалов
К-300-61	Декалит-6	Низкомолекулярный полиамид Л-20	Клей содержит наполнитель	300	стали, титановых, алюминиевых и магниевых сплавов, асбестовых и стеклотекстолитов
К-400	Т-111	Низкомолекулярный полиамид Л-20	Нитрид бора	200, кратковременно до 400	металлов и неметаллических конструкций

Наполнители являются весьма важным компонентом эпоксидных компаундов и могут изменять целый набор технологических и конструкционных функций. К технологическим относятся следующие:

- доведение вязкости связующего до требуемой величины;
- увеличение времени его жизнеспособности и т.п.

К конструктивным параметрам можно отнести следующие:

- придание связующему тиксотропных свойств;
- минимизация усадки при отверждении;
- сближение коэффициентов линейного термического расширения клея и субстрата;
- повышение прочности и вязкости разрушения и др.

Чаще всего в качестве наполнителей используются различные порошкообразные материалы, а в последнее время ультрадисперсные нанопорошки.

Кроме того, известно применение в качестве функциональных наполнителей жидких и пластичных смазочных материалов. Дисперсные наполнители могут состоять из различных металлов, их оксидов и солей, например, диалкогогенидов, нитридов бора и алюминия, кремнезёма и каолина. Кроме того, в качестве наполнителей используются короткие рубленые стеклянные и асбестовые волокна, а также, тканей, лент, ровницы, сеток и др.

Например, введение в эпоксидные смолы дисперсных наполнителей, таких как кремнезём, существенно снижает линейную усадку при их формировании в 2 раза (с 0,1-0,4% до 0,05-0,2%). При работе трибосистем с полимерным покрытием в условиях повышенных температур существенным достоинством ряда наполнителей является способность увеличивать их термостойкость, особенно в тех случаях, когда рабочая температура клеевого соединения выше температуры размягчения клея.

Следует отметить также, что добавление наполнителей в клеевую основу может не только улучшить, но и снизить уровень их свойств. Эти наполнители - экстендеры или балласт. Они обычно применяются в качестве твердых

компонентов для повышения экономичности адгезива. Чаще всего таким балластом являются различные мелкодисперсные наполнители и порошкообразные частично отверждённые полимеры.

Клеевые матричные связующие, путем добавки некоторых наполнителей могут приобретать свойства, препятствующие развитию коррозионных процессов. В качестве таких наполнителей используют хроматы стронция, бария, кальция, соединения свинца, молибдена цинка (1-10 %).

Для любой химической природы матричного адгезива для исследуемых композитов, имеет место общий ряд особенностей. Адгезия (и смачиваемость) матрицы к фторопласту полностью отсутствует [84]. В ходе пропитки и отверждения матричным адгезивом давление способствует заполнению пространств между нитями и неплотностями между отдельными волокнами во фторопластовых нитях. Это вызывает образование пор, расположенных по сечению композита и, как следствие, неравномерную плотность.

В ходе работы композиционного покрытия в узле трения процесс изнашивания развивается в следующей последовательности.

В начальный период приработки поверхность композита содержит кроме волокон ткани аморфные относительно жёсткие частицы матричного связующего отделяемые в результате усталостных процессов [85]. При этом вступают в контакт с контртелом антифрикционные фторопластовые волокна. Фторопласт и фторопластовые композиты изнашиваются в результате адгезионного переноса [9, 26, 63]. Фрикционный массоперенос характерен для всех полимеров, поэтому в плёнке переноса рассматриваемых покрытий отмечены и фрагменты связующего, равномерно распределённые по сечению плёнки переноса [85]. Но поверхностный слой этой плёнки в 2 – 3 мкм состоит только из фторопласта. Плёнка переноса находится в динамическом равновесии разрушаясь и возникая вновь [21, 86, 87, 88].

Из-за слабой адгезии пленка переноса ПТФЭ не является сплошной, а состоит из отдельных фрагментов [85], уносимых из зоны трения, когда она достигает критической толщины 10...40 нм [88, 89, 90]. Продукты износа ПТФЭ

(третье тело) представляют собой как бы граничную смазку. Так, предварительное натирание фторопластом контртела [33] или переворачивание неподвижного наружного кольца подшипника с покрытием на 180 градусов [91] увеличивает ресурс пары на 10...25%.

В период катастрофического износа в полимерном покрытии израсходован практически весь объем фторопласта и в зоне трения обнажены прочные волокна, адгезионно связанные с матрицей композита. Коэффициент трения, контактные напряжения и температура резко возрастают и, почти сразу же, обнажается металлический субстрат. В этот период значительно возрастает вклад усталостного изнашивания, который из сопутствующего становится основным. Особенно быстро разрушение наступает у прочных волокон из жесткоцепных полимеров с относительно низким пределом усталостной прочности, к которым относятся нити из арамидаТ.

Перенесенный материал - это полимер, подвергнутый температурному и механическому воздействию при трении [63]. Масс-спектрометрические исследования [70] в перенесенном ПТФЭ показали отсутствие в нем пиков с массовым числом более 100. Это говорит о разрушении макромолекул фторопласта. В результате механодеструкции интенсифицируемой температурой (термомеханическая) и кислородом воздуха (термоокислительная) [33, 70, 88, 92], в полимере возникают активные макрорадикалы [70, 93], которые частично рекомбинируют, а частично реагируют с активированной трением поверхностью контртела [63, 70, 87, 88, 94], адсорбируясь на ней. Деструкцию ПТФЭ, сопровождающую процесс переноса, подтверждает наличие в пленке переноса ионов фтора [85]. Косвенным подтверждением наличия смазывающей пленки переноса ПТФЭ является, отмеченное в работе [56, 68], снижение износостойкости подшипников с покрытием в морской воде на 67...75%, связанное, по мнению авторов, с вымыванием частиц износа. Аналогичные данные для наполненного фторопласта в воде получены в работе [87].

Деструкция ПТФЭ двояко влияет на адгезионный контакт: образование макрорадикалов ускоряет его, а возникновение низкомолекулярных фрагментов (включая газообразные продукты) - затрудняет [70].

Таким образом, процесс трения политетрафторэтилена характеризуется нарушением межмолекулярных связей, а процесс изнашивания, кроме того, - межатомных, химических.

1.3 Технология нанесения

Выполнение рациональной технологии склеивания обеспечивает требуемую работоспособность клеевого соединения. Нарушение технологического процесса в виде недостаточной подготовки поверхности под нанесение адгезива приводит к нарушениям сплошности клеевого шва.

Целью технологической подготовки поверхности под нанесение связующего является очищение подготавливаемых поверхностей от различных загрязнений, которые отрицательно влияют на прочность клеевых соединений.

Выбор способа подготовки поверхностей зависит от природы склеиваемых материалов, конструктивных особенностей изделия, условий эксплуатации и типа используемого клея. Существующие способы подготовки поверхности можно разделить на физические (механические), химические и физико-химические. Наиболее эффективными считаются химические способы подготовки. После обработки или обезжиривания в некоторых случаях наносятся защитные покрытия (хроматные, анодные плёнки и т.д.), что позволяет добиваться повышения коррозионной стойкости соединений. Повышение прочности и долговечности клеевых соединений также достигается склеиванием деталей со свежеподготовленными поверхностями [82, 33].

Для удаления следов масла с поверхностей, подлежащих склеиванию, применяются органические растворители или водные растворы моющих средств щелочного состава. Тип технологии обезжиривания определяется видом загрязнения и необходимой степенью очистки поверхности, воздействием на неё

обезжиривающего раствора, при соблюдении необходимых правил безопасности при работе.

В роли обезжиривающих поверхность жидкостей применяются следующие: бензин, керосин, уайт-спирит, ацетон и др. Металлические поверхности обычно обезжириваются при помощи бензина и ацетона, а также тетрахлорэтилена, трихлорэтилена, изопропилового спирта и др.

Одним из основных, а во многом и определяющих, этапов создания и эксплуатации композиционного покрытия является технология его нанесения.

Технология нанесения антифрикционных покрытий рассматриваемого класса зависит от конструкции узла трения, от состава и типа связующего и масштабов производства. Технологические процессы нанесения покрытий на основе непрерывных (длинных) волокон можно разделить на три группы:

- прямое прессование в прессформах [95, 96, 97, 98, 99] или непосредственно между рабочей деталью и контртелом [70, 100, 101, 102, 103, 104];

- намотка нитями, лентами или шнурами [104, 105- 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114];

- изготовление листового материала с покрытием на специальных технологических линиях [115, 116, 117, 118].

Наиболее экономичным и универсальным представляется последний способ. Он упоминается в патентной литературе, а реализован только для массового производства металлофторопластовой ленты – антифрикционного покрытия другого типа (рисунок 1.7).

Недостатками намоточной технологии наряду с известными преимуществами является отсутствие поперечной связности между волокнами. Слабая поперечная связность влияет на толщину покрытия, делая его более толстым, что в свою очередь резко понижает теплопроводность полимерной части узла.

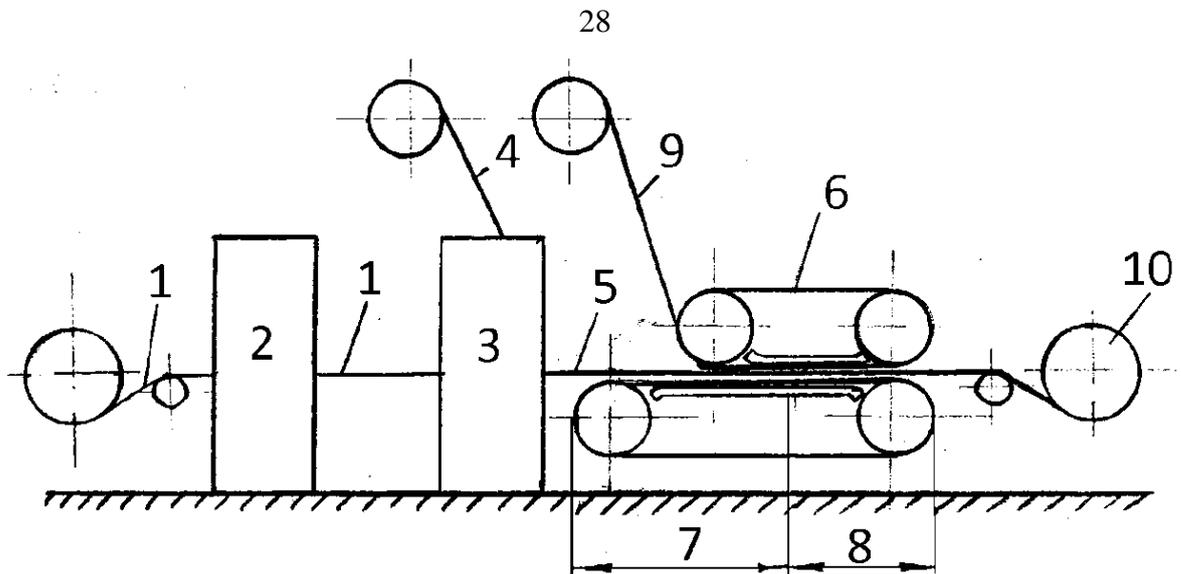


Рисунок 1.7. Схема технологии производства стальной ленты с полимерным антифрикционным покрытием на автоматической линии: 1- стальная лента, 2- камера подготовки поверхности, 3- дозатор адгезива, 4- механизм подачи фторопластовой ткани, 5- лента с покрытием, 6- устройство для отверждения покрытия, 7- зона нагрева, 8- зона охлаждения, 9- механизм подачи консервационной ленты, 10- барабан намотки готового материала

Оно осуществляется посредством сборки и термосилового нагружения усилием отверждения и температурой технологического пакета (препрег, антиадгезив, поверхность детали узла трения, устройство для силового замыкания) рисунок 1.8. В открытом технологическом пакете нагрузка отверждения создаётся внешней силой, в замкнутом – за счёт упругих деформаций подшипниковой втулки.

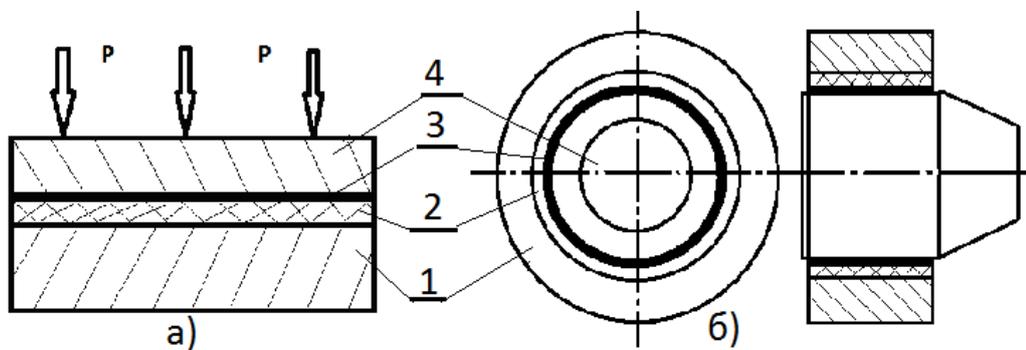


Рисунок 1.8. Технологический пакет: а) – открытый, б) – замкнутый:
1 – деталь, 2 – покрытие, 3 – антиадгезив, 4 - приспособление

Контроль изготовленного антифрикционного покрытия в основном сводится к проверке качества приклейки композита к субстрату.

Для нанесения описанных покрытий используется прямое прессование, как правило, в самом узле трения или при опрессовке деталей с покрытием [75, 119]. Так, АО «Новокраматорский машиностроительный завод» использует для нанесения покрытия из трикотажного рукава на полусферу специальный формующий элемент, играющий роль пуансона при прямом прессовании [75].

Некоторые технологии изготовления шарнирных подшипников, разработанные ранее, имеют ряд недостатков. К примеру, существующая технология изготовления шарнирных подшипников, принятая на Ухтомском вертолетном заводе, включающая обжим (опрессовку) на прессе сырого наружного кольца с препрегом вокруг закаленного внутреннего кольца, требует отверждения покрытия в печи и механическую обработку наружного кольца. Этот недостаток заключается в невозможности создания требуемого давления отверждения покрытия за счет упругой деформации наружного кольца подшипника, что в свою очередь приводит к уменьшению реальной опорной поверхности узла и его несущей способности.

Зарубежные конструкции шарнирных подшипников [38, 43] имеют на боковых поверхностях наружного кольца специальный кольцевой бурт, который позволяет формировать сферу не опрессовкой, а отгибом бурта раскаткой. Такая конструкция повышает качество шарнирного подшипника, но наружное кольцо остается сырым, что ограничивает область применения таких подшипников.

Жизнеспособность связующего оказывает существенное влияние на выбор технологии нанесения композиционного покрытия. При использовании в качестве матричного связующего фенолоформальдегидных смол, вначале изготавливают препрег – армирующую компоненту, пропитанную неотверждённым связующим. Затем препрег фиксируется на рабочей поверхности трибосистемы и отверждается при требуемом, для применяемого матричного связующего, давлении и температуре.

Одними из наиболее экономичных матричных связующих холодного отверждения представляются эпоксидные компаунды. Их применение требует разработки новой технологии нанесения покрытий.

Так, если матричное связующее получено на основе эпоксидных смол, изготовление препрега невозможно из-за малой жизнеспособности эпоксидного компаунда. Кроме того, необходимо учитывать его текучесть до определенной стадии отверждения и требование при этом относительно низкого давления для обеспечения размерной точности.

Общая последовательность нанесения таких покрытий состоит из следующих технологических этапов:

- подготовка деталей трибосистемы, включающая механическую зачистку (зашкуривание) металлических элементов субстрата и выкройку каркаса (ткани, трикотажа, войлока) покрытия;
- обезжиривание рабочей поверхности детали (протирка) и каркаса покрытия (окунание и отжим);
- пропитка эпоксидным компаундом каркаса покрытия и нанесение тонкого слоя связующего на поверхность субстрата;
- сборка технологического пакета (субстрат, связующее, армирующий каркас, пленка антиадгезива) и обеспечение силового замыкания;
- выдержка технологического пакета под нагрузкой до полного отверждения связующего.

Следует отметить, что для обеспечения требуемого ресурса антифрикционных покрытий необходима разработка конкретной технологии их нанесения на данную деталь трибосистемы при использовании связующего холодного отверждения и экспериментальная отработка этой технологии.

1.4 Выводы

1. Анализ изученной литературы показал, что антифрикционные композиционные полимерные покрытия широко применяются во многих

машиностроительных отраслях в ответственных тяжело нагруженных трибосистемах.

2. Функциональные возможности покрытий обеспечиваются наличием на рабочей поверхности композита определенного количества фторопластовых нитей и строением тканного армирующего каркаса.

3. Технологические характеристики покрытий определяются в основном природой и свойствами матричного связующего, в особенности нагрузочно-тепловыми режимами его отверждения.

4. Матричные связующие горячего отверждения, в связи с присущими им технологическими особенностями, ограничивают области применения антифрикционных покрытия рассматриваемого класса особенно для крупногабаритных трибосистем в условиях индивидуального, мелкосерийного производства и ремонтов.

1.5 Цель и задачи исследований

Изучение специальной научной и технической литературы позволило установить, что благодаря своим эксплуатационным качествам композиционные полимерные материалы в виде антифрикционных покрытий в настоящее время широко применяются в современной технике для обеспечения высоких нагрузок и ресурсов узлов трения.

Требования к механическим и триботехническим свойствам антифрикционных покрытий могут изменяться в зависимости от условий их эксплуатации, в связи с этим возникает потребность в разработке новых и совершенствовании уже существующих полимерных покрытий.

Рассматриваемый материал имеет много положительных качеств и выдерживает очень высокие нагрузки при скоростях до 0,5 м/с, но технология нанесения покрытий из-за термореактивного матричного связующего требует нагревательных устройств неэкономичных в условиях единичного или мелкосерийного, а также ремонтного производства. Зачастую, габариты

нагревательных устройств ограничивают размеры деталей, на которые наносится покрытие, сужая этим область его применения. Вследствие этого представляется целесообразным, для расширения области применения покрытий, использовать матричное связующее холодного отверждения.

Целью настоящей работы является расширение области применения антифрикционных полимерных композиционных покрытий на основе создания их модификации с матричным связующим холодного отверждения.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач.

1. Разработать модификацию композиционного материала с эпоксидным матричным связующим холодного отверждения, обеспечивающим работоспособность тяжело нагруженных трибосистем.

2. Определить основные закономерности адгезионных и вязкоупругих характеристик модифицированных антифрикционных покрытий.

3. Установить рациональные нагрузочно-скоростные режимы эксплуатации металлополимерных трибосистем с новым композиционным покрытием.

4. Разработать технологию нанесения композиционных покрытий, обеспечивающую требуемую точность трибосопряжения.

5. Проверка в промышленных условиях эффективности разработок, значимости выводов и рекомендаций.

2 ТЕПЛОВЫЕ РАСЧЁТЫ

2.1 Определение контактной температуры покрытия

Надёжность и долговечность подшипников зависят от нормального теплового режима, который обеспечивает стабильность физико-механических свойств материалов пары трения и геометрических размеров.

Определение контактной температуры покрытия является целью исследований, описанных в данной главе. В настоящее время задача о контактной температуре покрытий может быть решена со значительными упрощающими допущениями. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов возможно провести для конкретных конструкций и условий эксплуатации, что в свою очередь, влечёт за собой наличие значительного объёма информации. Для решения поставленной задачи в тепловых расчётах учитываем упрощающие допущения и размеры конкретных деталей [120, 121, 122, 123, 124].

Упрощенная схема для расчёта температуры покрытия представлена на рисунке 2.1. Расчёты температуры покрытия ведём относительно среднего диаметра контртела [75, 125].

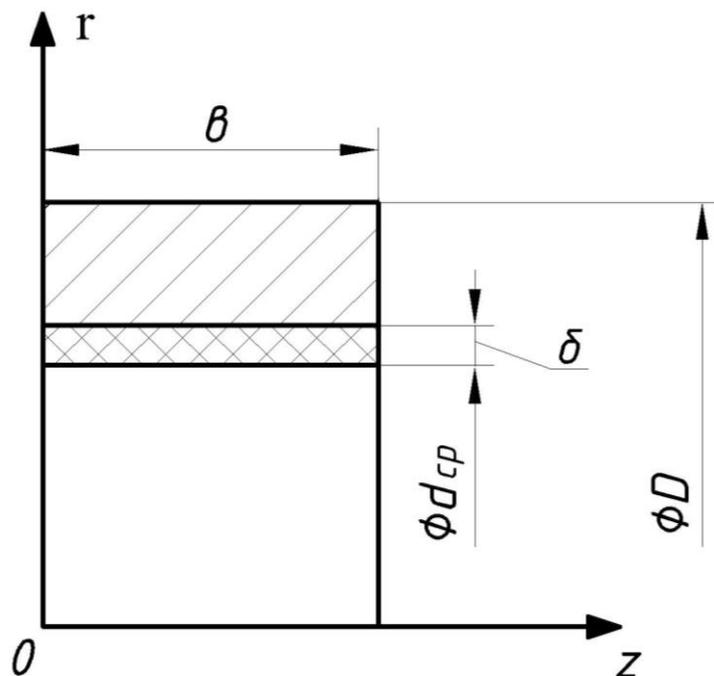


Рис 2.1 Схема для расчёта температуры покрытия

Выберем условия:

1) Для втулок и для подшипников отношения $b/d \leq 1,5$, а $\delta/d \ll 1$. Сохраняем в расчётах величину поверхности наружного кольца подшипника, считаем внутреннюю его поверхность цилиндрической с приведённым радиусом $0,5d$. Координаты располагаем таким образом, чтобы их ось совпадала с центральной осью пары трения. Теплоотдача с торцевых поверхностей покрытия незначительная, поэтому мы ей пренебрегаем [75, 125].

2) Предполагаем, что температурная функция во всей системе не имеет разрывов. Граничные условия для покрытия имеют вид:

$$T(r_0) = t_0;$$

и (2.1)

$$T(r_1) = t_1,$$

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

Для втулки (наружного кольца подшипника):

$$T(r_1) = t_1;$$

и (2.2)

$$T(R) = t_2,$$

где $R = 0,5D$.

3) Принимаем постоянство исходной температуры $t_c = \text{const}$. Также предполагаем, что подшипник теряет тепло только в результате теплообмена с окружающей средой, а изотермические поверхности в сечении, перпендикулярном оси подшипника считаем цилиндрическими [126].

В связи с тем, что антифрикционное композиционное покрытие предназначено для тяжело нагруженных крупногабаритных узлов и является низкоскоростным, влиянием тепловых вспышек в контактах пренебрегаем [2, 124].

Также предполагаем, что вся работа сил трения расходуется на генерацию тепла.

4) Источник тепла сосредоточен в зоне контакта, ограниченной кольцевой поверхностью и шириной втулки b . Так как расчёт ведётся для стационарного режима, считаем, что источник тепла непрерывного действия и постоянен во времени.

5) Применяемые материалы рассматриваемой системы считаем изотропными с известными теплофизическими характеристиками.

Согласно принятой системе координат дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье, соответствующее стационарным условиям, имеет вид [127, 128]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0, \quad (2.3)$$

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

Учитывая первое условие, с погрешностью не более 3% [129] считаем, что температура не зависит от координаты z , то есть:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0. \quad (2.4)$$

Согласно третьего условия, с погрешностью не более 10% [126] принимаем:

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi} = 0. \quad (2.5)$$

Тогда уравнение (2.1) примет вид:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad (2.6)$$

или

$$\frac{d}{dr} \left(r \cdot \frac{dT}{dr} \right) = 0. \quad (2.7)$$

Проинтегрировав (2.7) с учётом условий (2.1), получим:

$$T(r) = t_0 + (t_0 - t_1) \cdot \frac{\ln \frac{r_0}{r}}{\ln \frac{r_0}{r_1}} \quad (2.8)$$

Для наружного кольца подшипника получаем из (2.7) и (2.2):

$$T_1(r) = t_1 + (t_1 - t_2) \cdot \frac{\ln \frac{r_1}{r}}{\ln \frac{R}{r_1}} \quad (2.9)$$

Выражения (2.8) и (2.9) используем при определении количества тепла, проходящего в единицу времени через цилиндрические поверхности:

$$F_i = 2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot b. \quad (2.10)$$

По закону Фурье [127, 128] имеем:

$$Q(r_i) = -\lambda_i \cdot \frac{dT}{dr} \cdot F_i, \quad (2.11)$$

где λ_i - коэффициент теплопроводности.

Для границы покрытие-корпус, определив $\frac{dT}{dr}$ при $r_i = r_1$ из (2.11) получим количество тепла, проходящее через цилиндрическую поверхность покрытия в единицу времени:

$$Q(r) = \frac{2 \cdot \pi \cdot b \cdot \lambda}{\ln \frac{r_1}{r_0}} \cdot (t_0 - t_1). \quad (2.12)$$

Аналогично, для наружного кольца подшипника (втулки) получим:

$$Q(r)_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot b \cdot \lambda_1}{\ln \frac{R}{r_1}} \cdot (t_1 - t_2). \quad (2.13)$$

Согласно первого условия, теплоотдачей с торцевых поверхностей покрытия пренебрегаем. Количество тепла, отдаваемого с поверхности наружного кольца в окружающую среду, определим по формуле Ньютона-Рихмана [127, 128]:

$$Q^* = \alpha \cdot K_T \cdot F_1 \cdot (t_K - t_C), \quad (2.14)$$

где α - средний коэффициент теплоотдачи;

K_T - коэффициент неравномерности нагрева, $K_T = 0,8$ [2];

t_K - температура кольца, К;

t_C - средняя температура окружающей среды, К;

F_1 - площадь поверхности втулки, м².

Согласно четвертому условию, тепловой поток постоянен для всех поверхностей и равен количеству тепла, генерируемого в зоне трения, получаем:

$$F_1 = 2 \cdot \pi \cdot (R^2 - r_1^2 + R \cdot b), \quad (2.15)$$

Из выражений (2.12) (2.13) и (2.14) получаем:

$$t_0 - t_1 = Q \cdot \frac{\ln \frac{r_1}{r_0}}{2 \cdot \pi \cdot b \cdot \lambda}; \quad (2.16)$$

$$t_2 - t_1 = Q \cdot \frac{\ln \frac{R}{r_1}}{2 \cdot \pi \cdot b \cdot \lambda_1}; \quad (2.17)$$

$$t_K - t_C = Q \cdot \frac{1}{\alpha \cdot K_T \cdot F_1}. \quad (2.18)$$

Суммируя левые и правые части выражений (2.16), (2.17) и (2.18), получим выражение для контактной температуры композиционного покрытия:

$$t_0 = t_c + Q \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot b} \cdot \left(\frac{\ln \frac{r_1}{r_0}}{\lambda} + \frac{\ln \frac{R}{r_1}}{\lambda_1} \right) + \frac{1}{\alpha \cdot K_T \cdot F_1} \right] \quad (2.19)$$

или

$$t_0 = t_c + K_n \cdot Q \quad (2.20)$$

где K_n - термическое сопротивление подшипника.

Учитываем, что:

$$r_1 = r_0 + \delta = r_0 \cdot \left(1 + \frac{\delta}{r_0} \right); \quad (2.21)$$

$$\ln \frac{r_1}{r_0} = \ln \left(1 + \frac{\delta}{r_0} \right). \quad (2.22)$$

Перейдя к диаметрам, получаем:

$$\ln \frac{r_1}{r_0} = \ln \left(1 + \frac{2 \cdot \delta}{d} \right). \quad (2.23)$$

Разложив выражение (2.23) в степенной ряд [130]:

$$\ln\left(1 + \frac{2 \cdot \delta}{d}\right) = \frac{2 \cdot \delta}{d} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{2 \cdot \delta}{d}\right)^2 + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{2 \cdot \delta}{d}\right)^3 - \dots + \frac{(-1)^{n+1}}{n} \cdot \left(\frac{2 \cdot \delta}{d}\right)^n. \quad (2.24)$$

С учётом первого условия однозначности, ограничимся линейным членом разложения (2.24). Подставляя его в выражение термического сопротивления получим:

$$t_0 = t_c + Q \cdot \left[\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot b} \cdot \left(\frac{\ln \frac{r_1}{r_0}}{\lambda} + \frac{\ln \frac{R}{r_1}}{\lambda_1} \right) + \frac{1}{\alpha \cdot K_T \cdot F} \right]. \quad (2.25)$$

Количество тепла, образующееся в подшипнике, определяется из выражения [2, 126,129]:

$$Q = \beta \cdot f \cdot P \cdot V, \quad (2.26)$$

где β - коэффициент распределения тепловых потоков;

f - коэффициент трения;

P - нагрузка, Н;

V – скорость, м/с.

Учитывая, что коэффициент перекрытия для нашего случая фактически равен 1, тогда коэффициент распределения тепловых потоков будет равен [2]:

$$\beta = 1 - \frac{\sqrt{\lambda_1 \cdot c_1 \cdot \gamma_1}}{\sqrt{\lambda_1 \cdot c_1 \cdot \gamma_1} + \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \gamma}}, \quad (2.27)$$

где λ - коэффициент теплопроводности;

c - удельная теплоёмкость;

γ - плотность.

Индекс (1) относится к материалу втулки подшипника.

Таким образом, решение данной температурной задачи для пары трения с антифрикционным композиционным полимерным покрытием получено в виде конечных приближенных выражений. В связи с тем, что разработанное покрытие является новым, ряд теплофизических констант (λ , c , γ) необходимо определить экспериментально.

Величины расчётных параметров теплофизических констант антифрикционного композиционного покрытия (λ , c , γ) определялись экспериментально (см. гл. 4) и представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Теплофизические параметры покрытия

№ п/п	Параметры	Материалы
		Покрытие
1	Теплопроводность, Вт/м·К	0,47
2	Теплоёмкость, Дж/кг·К	1500
3	Плотность, кг/м ³	1200

Согласно полученного выражения (2.25), для антифрикционного покрытия и материалов выполним расчёт контактной температуры покрытия. Результаты расчётов представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 - Зависимость контактной температуры от режимов нагружения и материала контртел

Материал контртел	Режимы нагружения			
	5 МПа; 0,1 м/с	5 МПа; 0,2 м/с	70МПа;0,1 м/с	70МПа;0,2 м/с
	Контактная температура, °С			
Сталь 45	49,1	90,4	137,5	157,7
Сталь ШХ-15	50,7	93,3	140,7	160,8
Сталь 12Х18Н9Т	57,7	97,4	143,7	166,5
Титановый сплав ВТ3-1	63,7	107,	152,2	178,2

Наибольшую температуру при всех режимах нагружения развивает трибосистема с контртелом, выполненным из титанового сплава. Это можно объяснить низкой величиной теплопроводности этого материала, которая обеспечивает низкий теплоотвод из зоны трения.

Марки, исследованных в тепловых экспериментах материалов контртел, приведены в таблице 3.5.

Графическая интерпретация влияния режимного параметра PV на температуру в зоне контакта трибосистемы для разных материалов контртел (сталь 45; сталь ШХ-15; сталь 12Х18 Н9Т; титановый сплав ВТ3-1) представлена на рисунке 2.2.

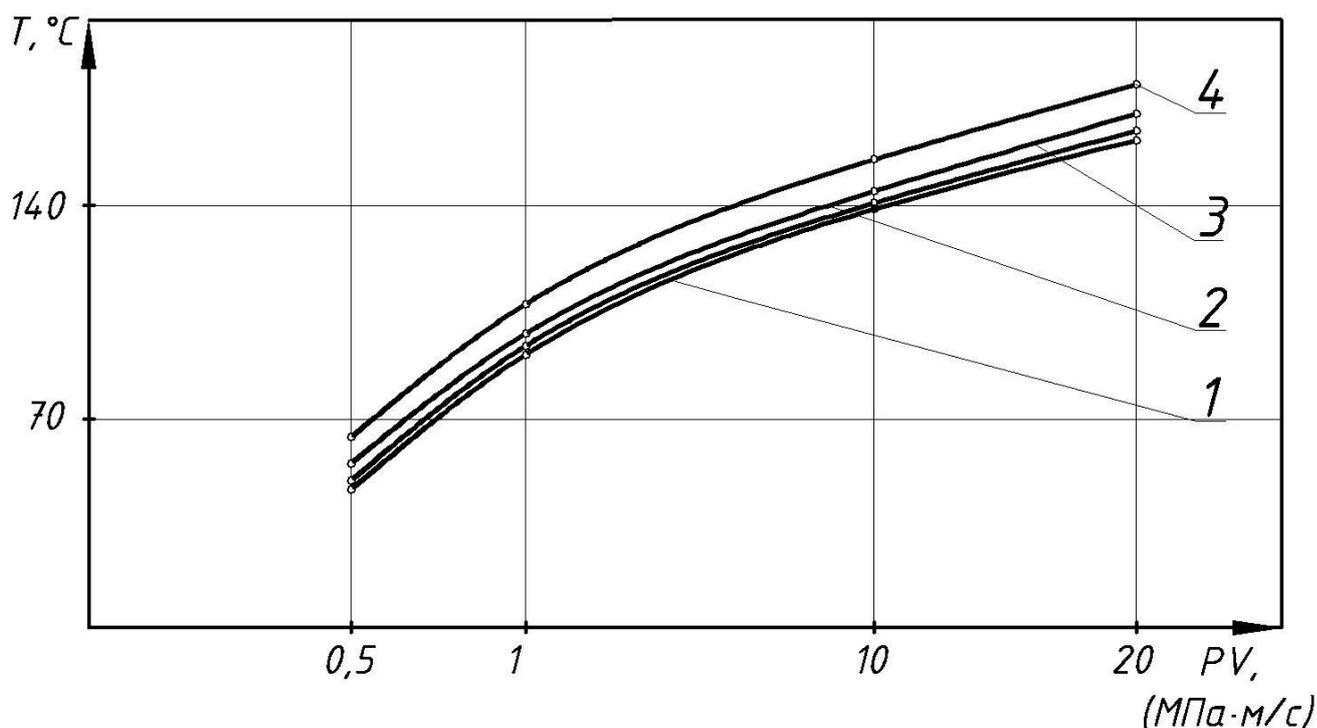


Рисунок 2.2 Зависимость температуры от режимов эксплуатации: 1 - сталь 45; 2 - сталь ШХ-15; 3 - сталь 12Х18 Н9Т; 4 - титановый сплав ВТ3-1.

Выполненный выше приближённый температурный расчёт используется для предварительной инженерной оценки теплового порога, который ограничивает применение данного антифрикционного полимерного композиционного покрытия. С целью достижения большей точности и учёта некоторых допущений

при определении контактной температуры трибосопряжения расчёт контактной температуры был выполнен методом конечных элементов с применением компьютерного моделирования в комплексе COMSOL Multiphysics, который приведён в следующем разделе.

2.2 Моделирование тепловых процессов

Как правило, тепловые процессы в основном описываются уравнениями в частных производных. Численный расчёт таких уравнений в настоящее время наиболее продуктивно производить с помощью метода конечных элементов. Расчёт теплового поля пары трения с антифрикционным композиционным покрытием произведён в комплексе COMSOL Multiphysics.

В качестве модели тепловых процессов принято следующее описание:

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

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

где ρ - плотность, кг/м³;

C_p - теплоёмкость, Дж/кг·К;

k - теплопроводность, Вт/м·К;

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

∇ - векторный дифференциальный оператор;

\mathbf{q} - тепловой поток, Вт/м²;

Q - теплоотвод, Вт/м³.

На начальном этапе моделирования тепловых процессов были построены геометрические модели контртела (рисунок 2, а) и втулки (рисунок 2, б). Антифрикционное покрытие на рабочую поверхность втулки показано на общем виде пары трения, представленной на рисунке 2.4.

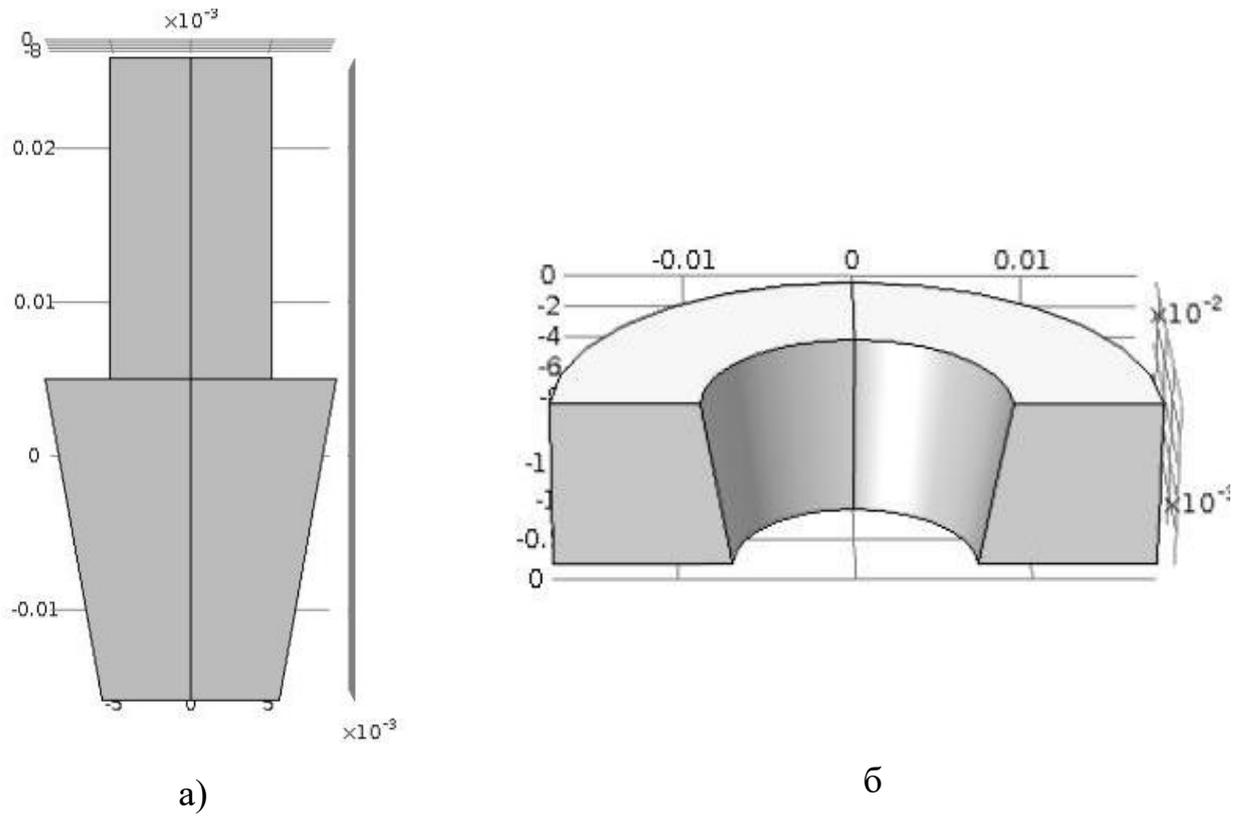


Рисунок 2.3 Геометрические модели: а) контртела; б) втулки

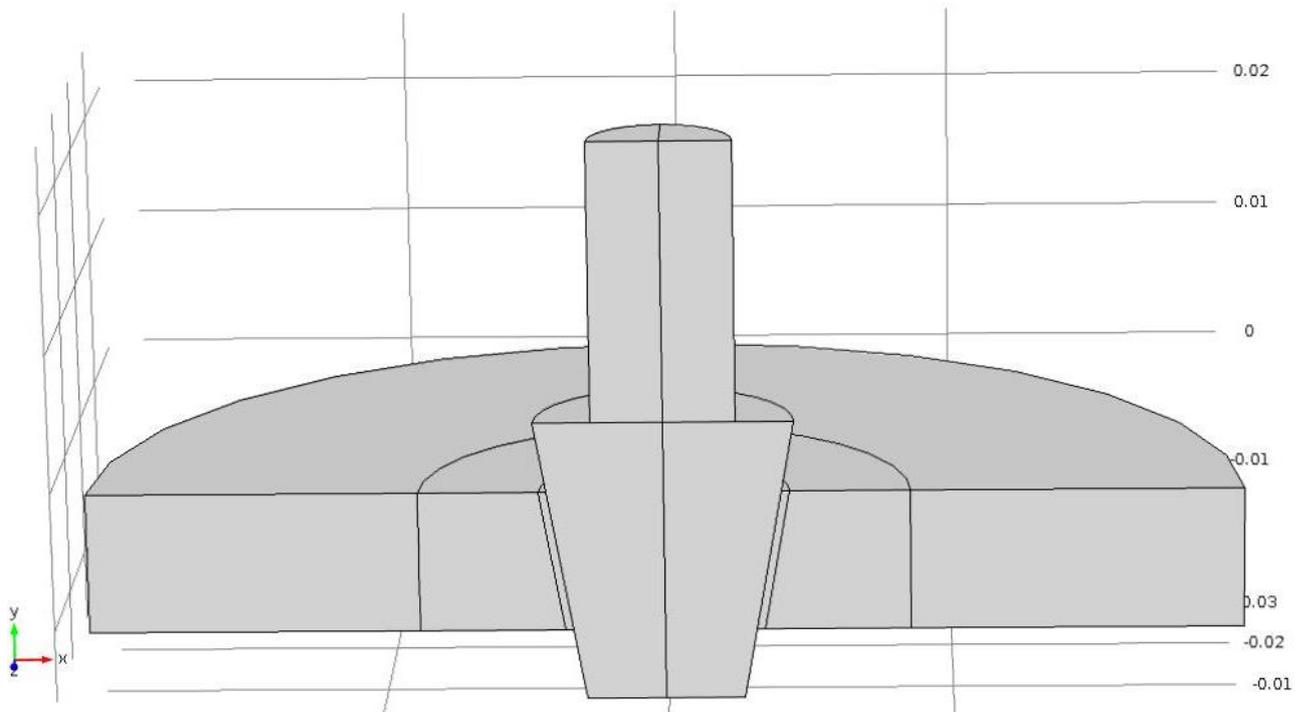


Рисунок 2.4 Общий вид пары трения

Для проведения численного расчёта все элементы геометрической модели трибосистемы (втулка, покрытие, контртело) были разбиты сеткой конечных элементов. Разбиение представлено на рисунке 2.5.

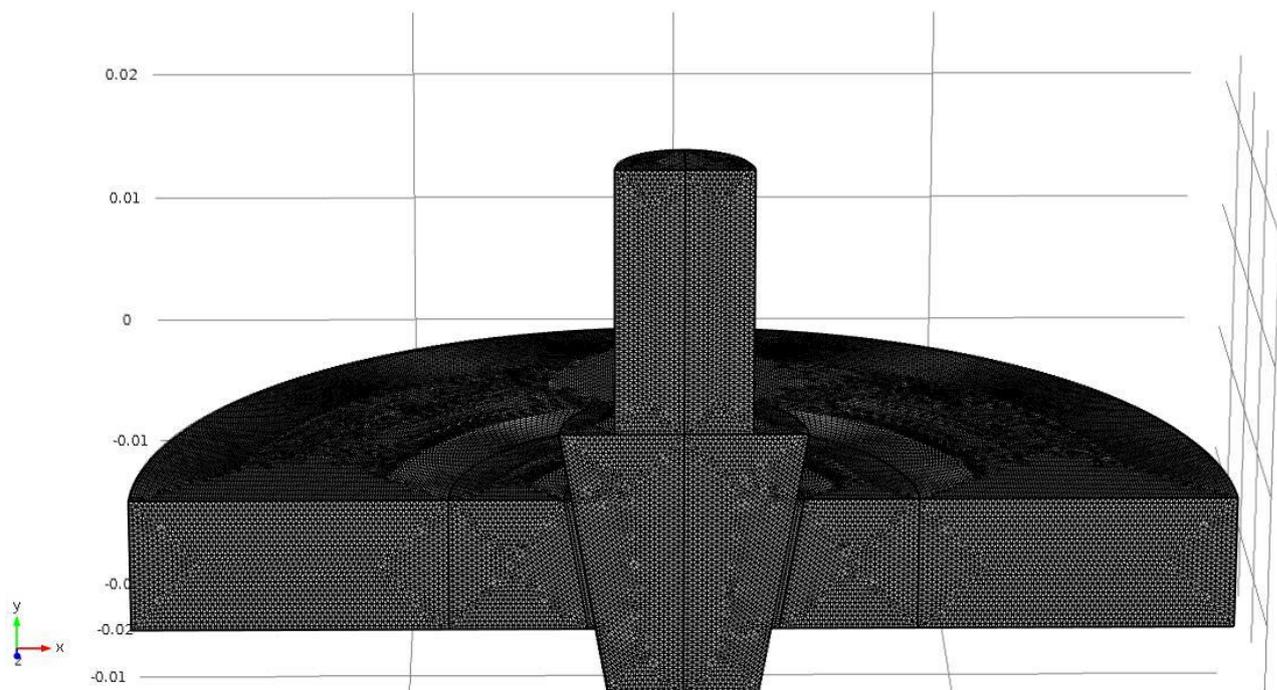


Рисунок 2.5 Разбиение элементов трибосистемы сеткой конечных элементов

В качестве материала для изготовления втулки использовалась сталь марки 45; контртела выполнялись из материалов, приведённых в таблице 2.3 (стали 45, ШХ-15, 12Х18 Н9Т и титанового сплава ВТ3-1) и антифрикционного покрытия, выполненного на основе тканого каркаса саржевого плетения. Для определения исходных данных, в ходе проведения расчётов использовались, как теплофизические характеристики контртел и втулки, представленные в таблице 2.3, так и теплофизические характеристики полимерного покрытия, представленные в таблице 2.1. Расчёт выполняется для среднего сечения конического радиально-упорного подшипника, используемого в качестве экспериментального образца. Все исходные данные для металлических контртел и втулок взяты из справочной литературы [131, 132], а теплофизические данные для материала антифрикционного композиционного полимерного покрытия получены экспериментально (см. глава 4).

Таблица 2.3 - Теплофизические характеристики пары трения

Параметры	Материалы			
	Сталь 45	Сталь ШХ-15	Сталь 12Х18 Н9Т	Титановый сплав ВТ3-1
Теплопроводность, Вт/м·К	60	40	18	8,5
Теплоёмкость, Дж/кг·К	460	475	490	523
Плотность, кг/м ³	7800	7770	7950	4500
Коэффициент температурного расширения, 1/К	$11,96 \cdot 10^{-6}$	$12 \cdot 10^{-6}$	$16,8 \cdot 10^{-6}$	$9,5 \cdot 10^{-6}$
Модуль Юнга, Па	$200 \cdot 10^9$	$211 \cdot 10^9$	$198 \cdot 10^9$	$120 \cdot 10^9$
Коэффициент Пуассона	0,29	0,26	0,29	0,33

Расчёты производились для стационарных режимов эксплуатации. В результате получена, представленная ниже, подробная картина теплового поля (рисунок 2.6) и изотермических контуров (рисунок 2.7) для материала контртел из стали 45 и картина теплового поля (рисунок 2.8) и изотермических контуров (рисунок 2.9) для материала контртел из титанового сплава ВТ3-1.

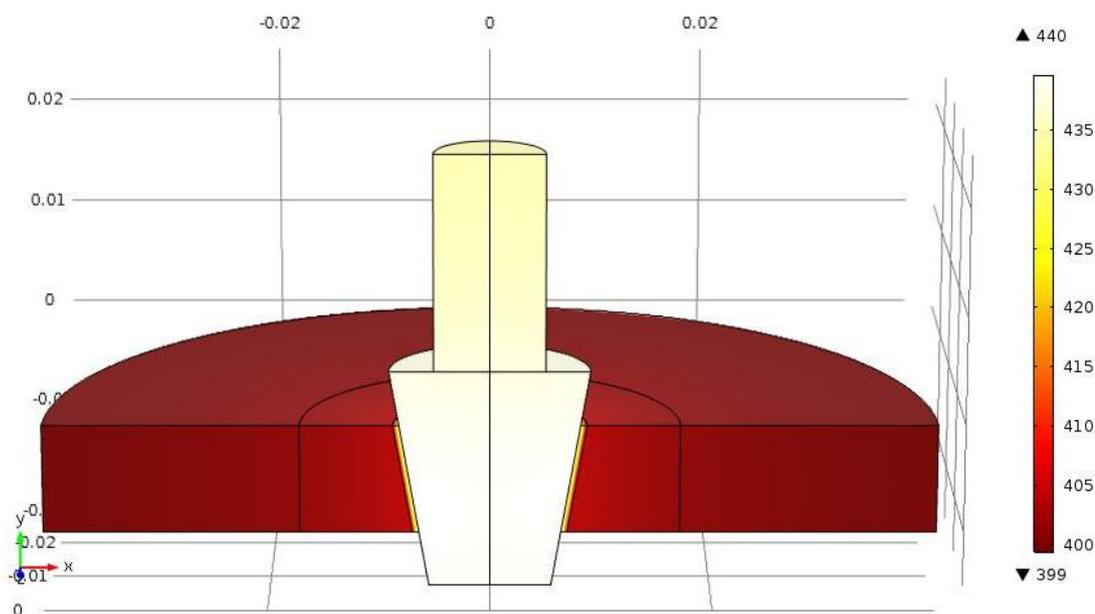


Рисунок 2.6 Картина теплового поля (сталь 45)

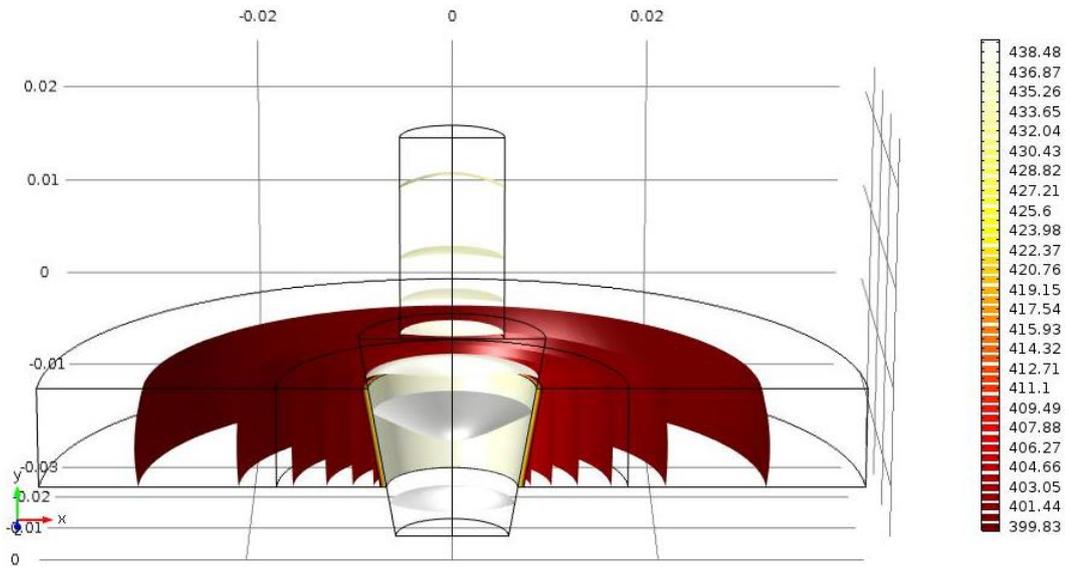


Рисунок 2.7 Изотермические контуры (сталь 45)

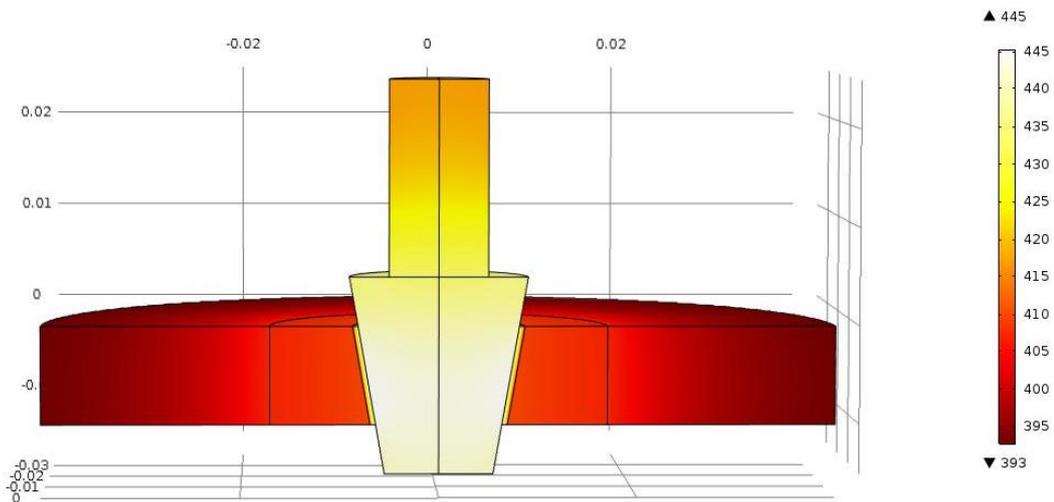


Рисунок 2.8 Картина теплового поля (титановый сплав ВТ3-1)

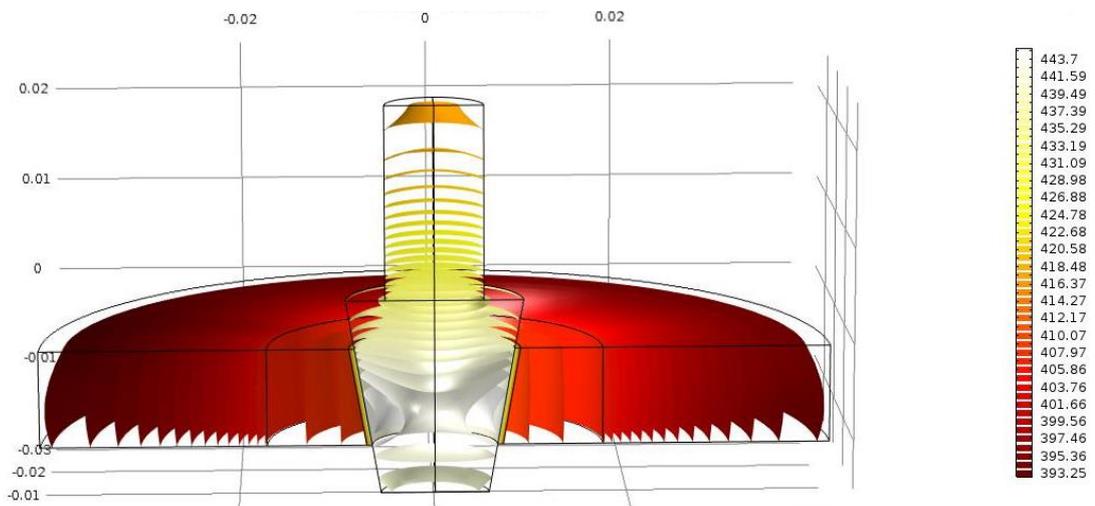


Рисунок 2.9 Изотермические контуры (титановый сплав ВТ3-1)

Расчёты контактной температуры выполнялись для всех исследуемых материалов контртел. На рисунках 2.6, 2.7, в качестве примера представлены результаты расчётов для контртела из стали 45. Эти данные получены для среднего сечения контактной зоны, при максимальных режимах нагружения ($\sigma=70$ МПа; $V=0,2$ м/с).

Данные о конкретном вкладе каждого параметра режимов нагружения для контртел из разных материалов для удобства сравнения приведены в таблице 2.4. Приведённые в таблице результаты относятся к контртелам, выполненным из стали 45 и титанового сплава ВТЗ-1.

Таблица 2.4 - Зависимость контактной температуры от режимов

Материал	Скорость, м/с		Нагрузка, МПа		Температура, °С	
Сталь 45	V_{\min}	0,1	σ_{\min}	5	T_1	48,6
			σ_{\max}	70	T_2	122,4
	V_{\max}	0,2	σ_{\min}	5	T_3	79,9
			σ_{\max}	70	T_4	157,04
Титановый сплав ВТЗ-1	V_{\min}	0,1	σ_{\min}	5	T_1	51,9
			σ_{\max}	70	T_2	131,7
	V_{\max}	0,2	σ_{\min}	5	T_3	83,5
			σ_{\max}	70	T_4	169,4

Аналогичные данные по другим материалам контртел представлены на рисунках 2.10 – 2.14.

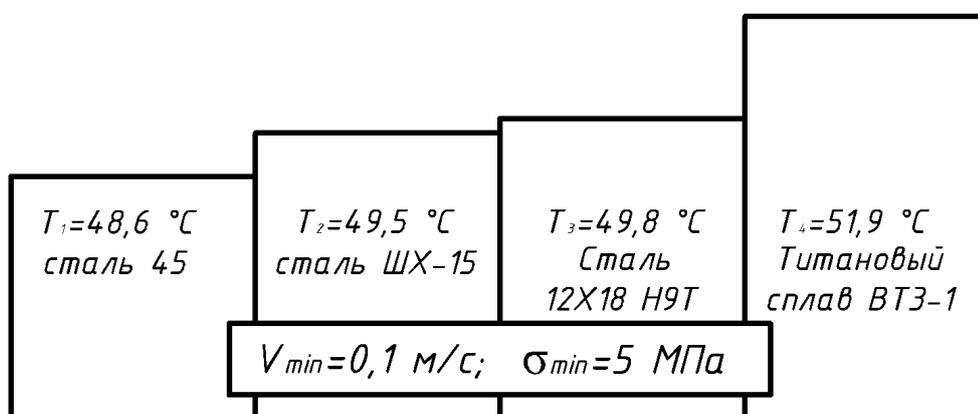


Рисунок 2.10 Влияние режимов нагружения на работу исследуемых пар трения: 1 - сталь 45; 2 - сталь ШХ-15; 3 - сталь 12X18 Н9Т; 4 - титановый сплав ВТЗ-1.

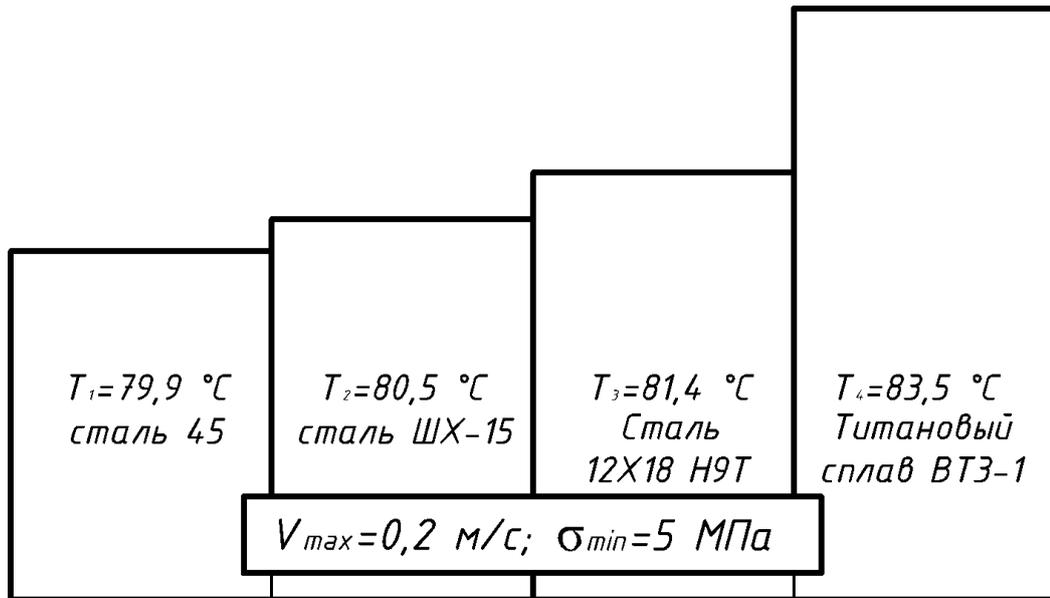


Рисунок 2.11 Влияние режимов нагружения на работу исследуемых пар трения:

1 - сталь 45; 2 - сталь ШХ-15; 3 - сталь 12Х18 Н9Т; 4 - титановый сплав ВТ3-1.

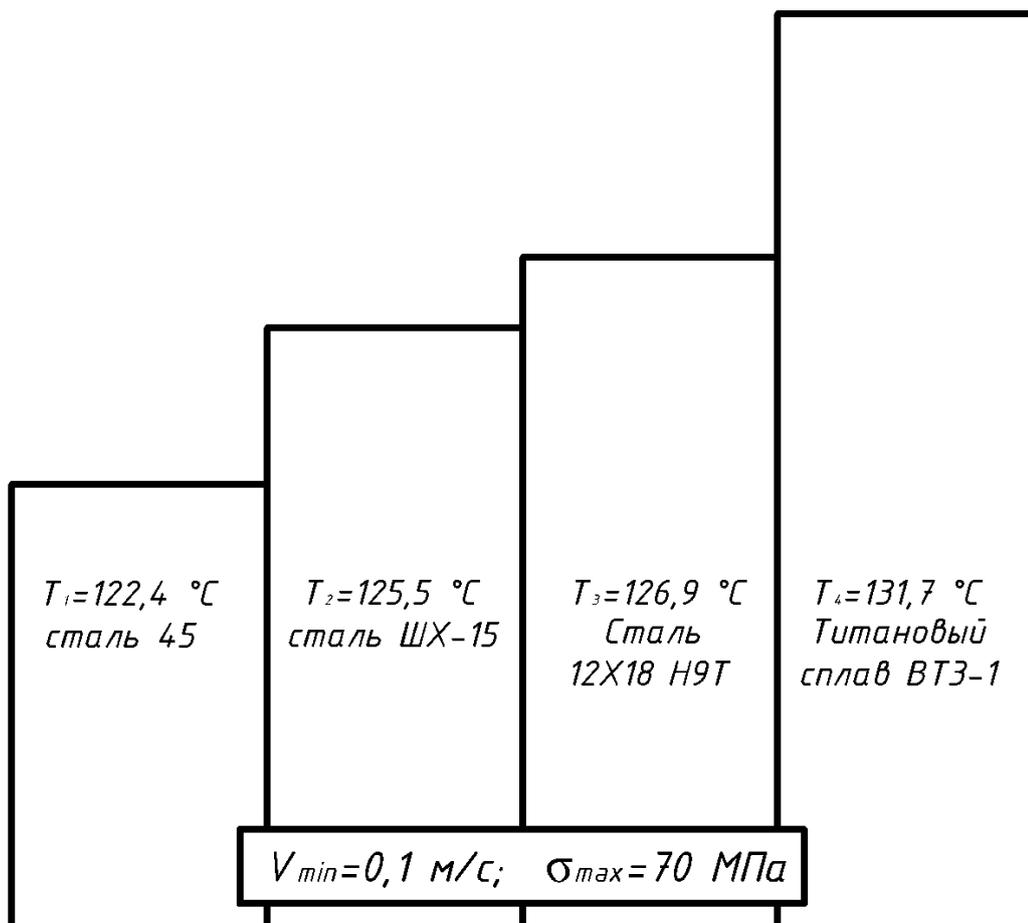


Рисунок 2.12 Влияние режимов нагружения на работу исследуемых пар трения:

1 - сталь 45; 2 - сталь ШХ-15; 3 - сталь 12Х18 Н9Т; 4 - титановый сплав ВТ3-1.

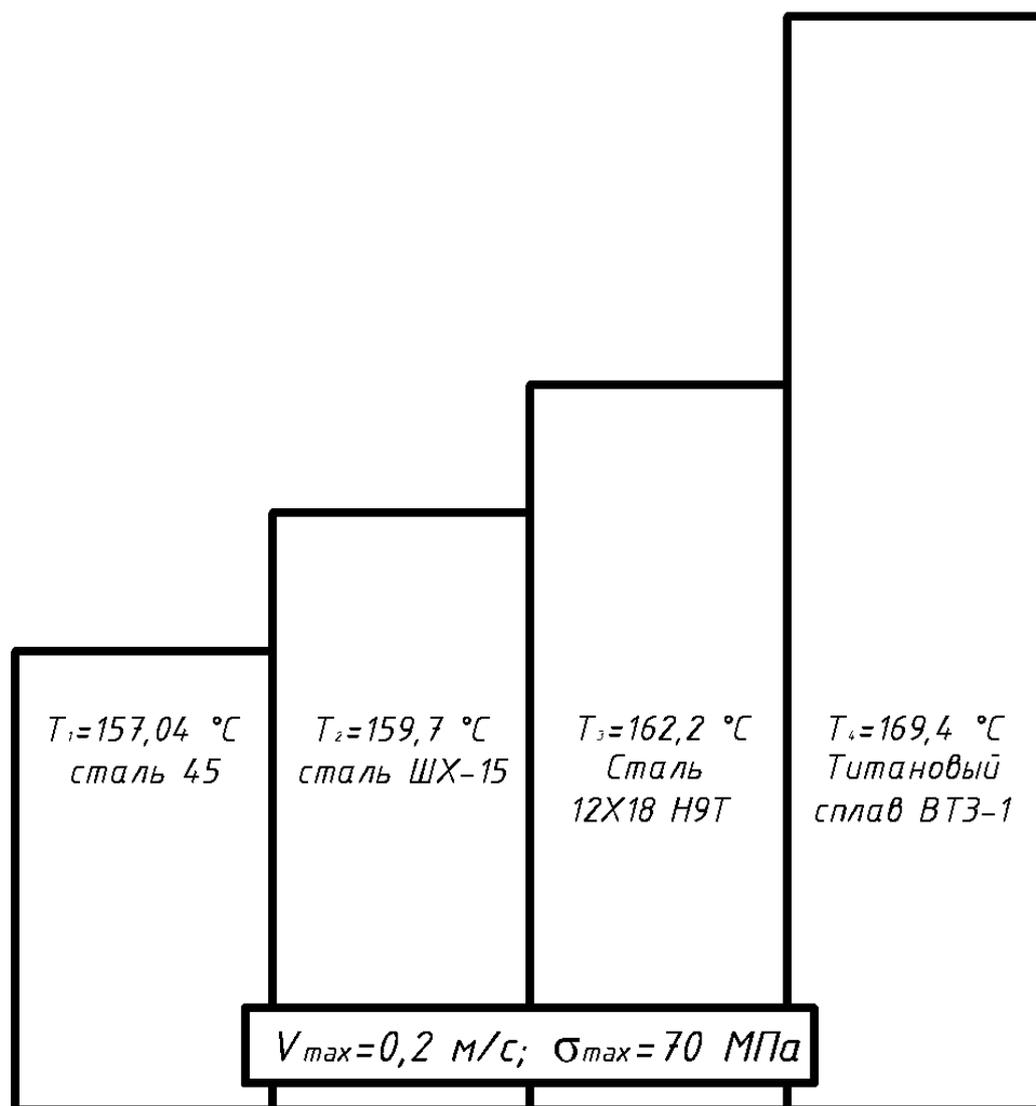


Рисунок 2.13 Влияние режимов нагружения на работу исследуемых пар трения:
 1 - сталь 45; 2 - сталь ШХ-15; 3 - сталь 12X18 Н9Т; 4 - титановый сплав ВТЗ-1.

Для минимальной скорости увеличение нагрузки в исследуемом диапазоне вызывает рост температуры на 64,4 %, при максимальной скорости в этом же диапазоне нагрузки температура увеличивается на 28,3 %. Таким образом, рост скорости в исследуемом диапазоне повышает общий уровень температуры, снижая влияние на неё нагрузки.

Следовательно, результаты полученные, как теоретическими расчётами, так и расчётами, выполненными в комплексе COMSOL Multiphysics, совпадают с погрешностью не более 20 % и могут быть рекомендованы для инженерной практики.

2.3 Выводы

1. На основе законов Фурье и Ньютона-Рихмана выполнен теоретический расчёт для определения температурного порога применимости разработанных покрытий, достигаемого в зоне трения антифрикционного полимерного фторопластсодержащего покрытия и ответной детали – контртела, выполненной из сталей наиболее распространенных марок и титанового сплава.

2. С целью повышения численных результатов исследований температуры в контактной зоне, рассматриваемой трибосистемы, выполнено компьютерное моделирование геометрии её элементов и получена модель проходящих в них тепловых процессов.

3. Сравнение результатов приближённых теоретических расчётных данных и полученных с использованием комплекса COMSOL Multiphysics с последующими численными решениями показало, что разница между точностью полученных результатов колеблется в пределах 5 - 18 %.

3 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Применение полимерных композиционных фторопластсодержащих покрытий положительно зарекомендовало себя в самых разных узлах трения машин, обеспечивая высокую износостойкость и работоспособность фрикционных сопряжений при высоких нагрузках в режиме самосмазывания.

В данной главе описаны общая структура и частные методики проведения экспериментальных исследований, направленных на разработку и установление области эффективного применения композиционных покрытий с матричным материалом холодного отверждения. Исследования выполнены на примере радиально-упорных подшипников скольжения.

3.1 Структура исследований

В ходе исследования определена их структура и описаны алгоритмы выполнения частных процедур по накоплению фактов. На рисунке 3.1 приведена общая структурная схема исследований, устанавливающая порядок выполнения отдельных экспериментальных блоков, а также в данной главе представлены основные данные об оборудовании, инструментах и образцах.

Изменение типа матричного материала композита практически соответствует разработке нового материала, что требует выделения в методическом плане самостоятельного экспериментального блока.

Новое антифрикционное полимерное покрытие сформировано на фторопластсодержащем тканом каркасе с эпоксидным матричным связующим холодного отверждения. Более низкая теплопроводность эпоксидной смолы частично компенсируется вводом порошковой меди, повышающей теплопроводность и прочность, а также добавкой масла, уменьшающего генерацию тепла при трении.

Оптимизировав состав, необходимо установить рациональную область эксплуатационных нагрузочно-скоростных режимов (σ , V , T). Учитывая

относительно низкую теплостойкость полимерных материалов, необходимо в теоретической части работы оценить допустимый уровень температурной нагрузки, возникающий при эксплуатации. Теплофизические параметры композита определяются экспериментально.

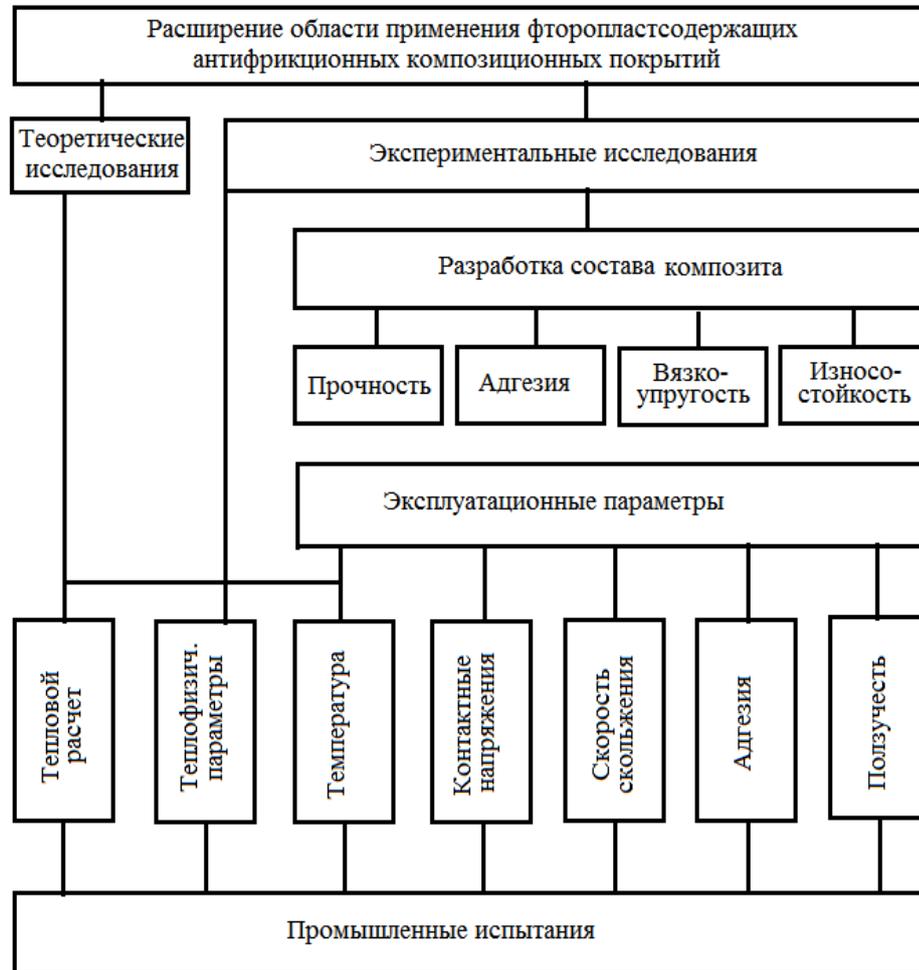


Рисунок 3.1 Структурная схема исследований

Комплекс экспериментальных исследований разделён на два основных блока. В первом - определяется оптимальный состав полимерного материала. Для обеспечения достаточной фиксации покрытия на субстрате необходимо исследовать адгезионную прочность клеевого соединения, выполняемого матричным связующим. Требования к жесткости покрытия и деформации, в процесс образования зазора трибосопряжения, требует исследования вязкоупругих свойств композита.

Для определения оптимального состава покрытия используется методика многокритериальной оптимизации, состоящая в совмещении одномасштабных симплекс-решетчатых диаграмм и определении в пространстве исследованных свойств точки, находящейся на кратчайшем расстоянии от всех средневзвешенных частных оптимумов отдельных факторов. Средневзвешенные коэффициенты определялись методом ранговой корреляции.

Критерием окончательной оценки эффективности применения разработанного материала для антифрикционных покрытий является его износостойкость и потери на трение.

На втором этапе исследований устанавливаются рациональный диапазон эксплуатационных режимов и их влияние на стандартные триботехнические характеристики разработанного материала. К ним относятся интенсивность изнашивания, коэффициент трения, температура трибоконтакта, ресурс покрытия и т.д. В заключении проводятся промышленные испытания разработанных покрытий.

Содержание описанных экспериментальных блоков комплекса приведено в таблице 3.1. Теоретический комплекс исследований выполняется после экспериментального установления состава покрытия и определения его теплофизических свойств. Он представляет собой постановку и решение задачи о температуре в зоне трения и ее зависимости от величины нагрузочно-скоростных режимов.

Анализ информации, приведенной в литературных источниках, величины вариаций полученных результатов и данные о точностных параметрах аналогов позволили установить среднюю величину экспериментальной погрешности [133, 134, 135].

Величина базы испытаний выбиралась в соответствии с конкретными экспериментальными задачами. Для ползучести она соответствовала одному часу, для изнашивания – времени достижения композитом стационарного периода трения. Средние контактные напряжения вычислялись исходя из величины контакта, определяемого площадью наименьшей поверхности пары вал – втулка.

Таблица 3.1 - Схема комплекса экспериментальных исследований антифрикционного полимерного покрытия

№ п/п	Блок	Цель исследований	Выход	Переменные факторы	Диапазон варьирования	Оборудование	Погрешность
1	Состав компози та	Установление оптимальный состава холоднотвердеющей матрицы композиционного покрытия	Количественный состав матрицы композита	Смола ЭД-20+ПЭПА	86-92 %	Стенды для исслед. прочности, адгезии, вязкоупругости, износостойкости	±(5-15)%
				Порошок Си	7-13 %		
				Масло МС-20	1-7 %		
2	Адгезионная прочность	Обеспечение прочности закрепления покрытия на субстратах	Прочность клеевого шва	Тип масла	Тп-22С,МС-20	Стенд для оценки адгезионной прочности	±10%
				Тип субстрата	Сталь 45, латунь Л63		
3	Вязкоупруг ие свойств	Определение жесткости покрытий и вклада деформации ползучести в формирование зазора трибосопряжения	Величина ползучести при сжатии, равновесный модуль	Тип покрытия	Атлас0,55,0,3 саржа 1/3	Установки для исследования вязкоупругих свойств полимерных материалов	± 10%
				Контактные напряжения	10 – 120 МПа		
4	Триботехнические параметры	Установление рациональной области нагрузочно-скоростных режимов	Температура	Тип покрытия	Атлас 0,55;0,3 саржа 1/3	Стенд для триботехнических исследований металлополимерных трибосистем	±15%
				Тип контртела	Сталь 45, ШХ15, 12Х18Н9Т, Титановый сплавВТ3-1		
				Контактные напряжения	5 – 100МПа		
				Скорость	0,1 – 0,3м/с		

Итоги первого экспериментального блока получены на основе реализации симплекс-решетчатых планов типа «состав – свойство». Данные исследований второго и третьего блоков основаны на результатах двухуровневых полнофакторных экспериментальных планов [133, 134, 135].

3.2 Оборудование и инструменты

Для проведения экспериментальных исследований использовалось различное оборудование, как стандартное, так и специально разработанное. Все испытания проводились при нормальных климатических условиях (25 ± 5 °С; относительная влажность не более 80 %; атмосферное давление от 630 до 800 мм рт. ст.).

Разработка антифрикционного композиционного покрытия начиналась с установления состава матричного материала композита. Его качественный состав был установлен на основе априорной информации. Так, медный порошок повышает прочность и теплопроводность, капсулированный жидкий смазочный материал снижает генерацию тепла при трении, а эпоксидная смола с отвердителем обеспечивают технологическое требование о холодном отверждении покрытия.

Рецептура матричной смеси устанавливалась как общее среднее между оптимумами в пространстве различных физико-технических свойств связующего материала. Этими свойствами являются: прочность связующего на изгиб, адгезионная прочность, вязкоупругие свойства всего композита и, наконец, его износостойкость. Все исследования проводились по симплекс-решетчатым планам типа «состав – свойство».

Прочность матричного связующего [136, 137] на изгиб исследовалась на специальной установке представленной рисунке 3.2. Установка состоит из двух колонок, по которым при завинчивании винта свободно перемещается планка с нагружаемым образцом, опирающимся на динамометр сжатия. Образец призматической формы опирается на специальную подставку. Разрушающее усилие фиксируется по индикатору динамометра. Исследования проводились по симплекс-решетчатому плану третьего порядка в 10 точках при 3 параллельных опытах.

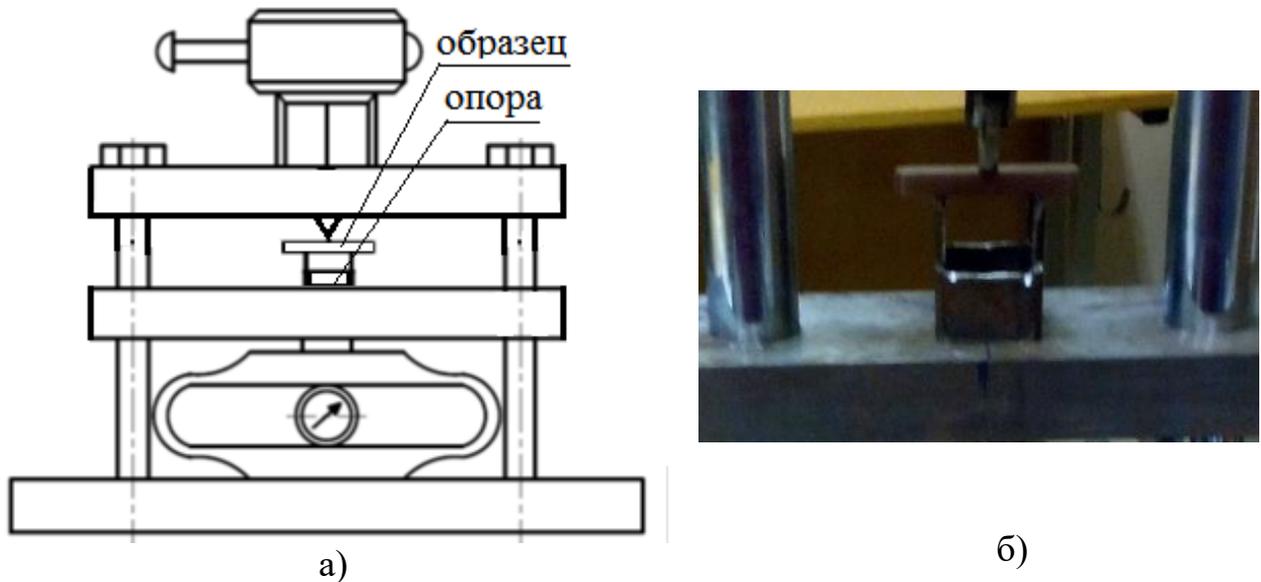


Рисунок 3.2 Установка для исследований прочности на изгиб:

а) схема; б) рабочая зона

Установка смонтирована на плите; нагружающее устройство выполнено в виде винтовой пары, действующей на образцовый динамометр сжатия ДОСМ - 3-1.

Адгезионная прочность композиционных покрытий с эпоксидной матрицей оценивалась по стандартной методике - величине усилия на отслаивание при отгибе свободного не приклеенного конца покрытия на 180 градусов. Схема установки для определения адгезионной прочности представлена на рисунке 3.3.

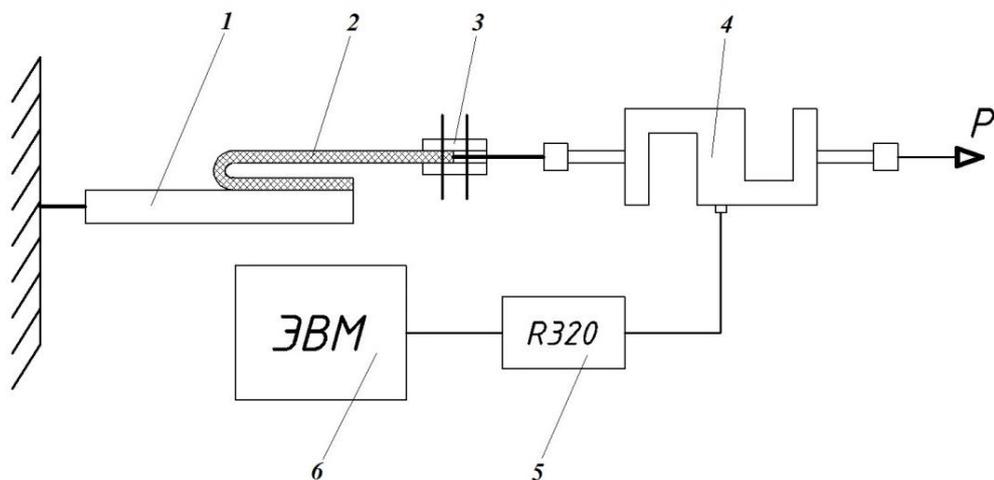


Рисунок 3.3 Схема установки для исследования адгезионной прочности покрытий: 1 – образец; 2 – покрытие; 3 – приспособление для фиксации покрытия; 4 - тензометрический S-образный датчик; 5 - индикатор R320; 6 – персональный компьютер

Фиксирование покрытия на образцах напряжениями отверждения, осуществлялась в специальном приспособлении, представленном на рисунке 3.4.

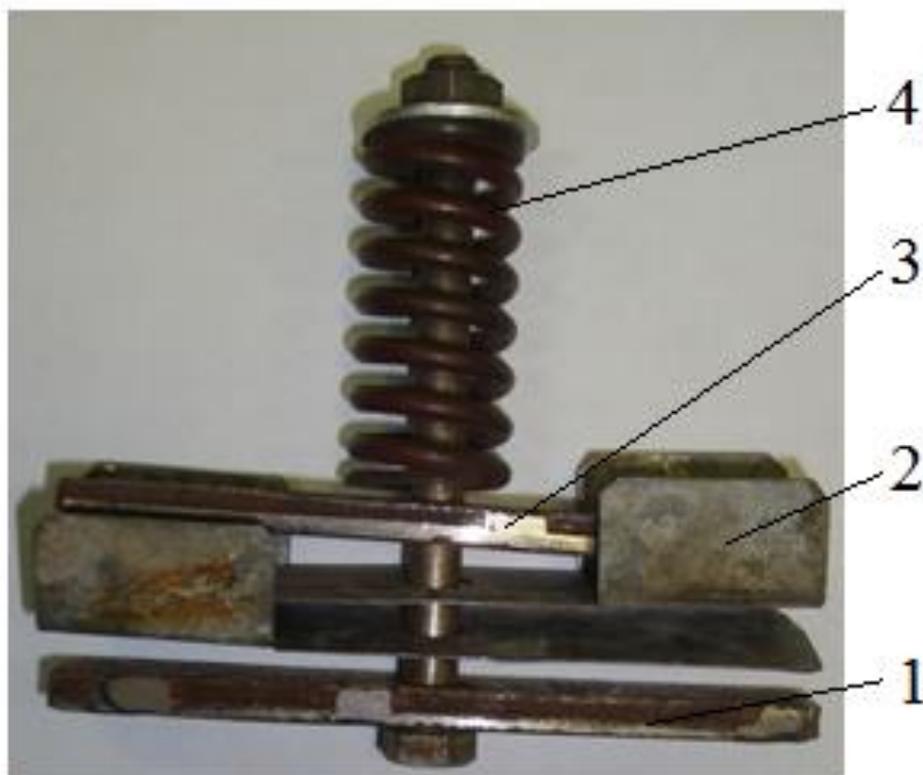


Рисунок 3.4 Приспособление для фиксации покрытия на субстрате:
1 - нижняя планка; 2 – ограничители; 3 - верхняя планка; 4 - нагружающая пружина

Пружина приспособления для фиксации покрытия при давлении отверждения тарировалась заранее. При сборке технологического пакета между образцами и в зоне между сухим покрытием и субстратом в качестве антиадгезива укладывалась фторопластовая пленка (ТУ6-11-5751-766-1).

Исследование ползучести вязкоупругого полимерного композита проводилась на специальной установке (рисунок 3.5). Она смонтирована на плите и имеет колонки, по которым может свободно перемещаться массивная траверса. Между ней и неподвижной планкой образец-микропластик нагружается пуансоном площадью 1 см^2 ($\text{Ø}11,3\text{ мм}$). Нагружающее устройство представлено динамометром сжатия и винтом, сжимающим образец между планками [138, 139].

Величина абсолютной деформации композиционного покрытия определяется как среднее из показаний двух индикаторов часового типа. Это компенсирует возможные перекосы траверсы.

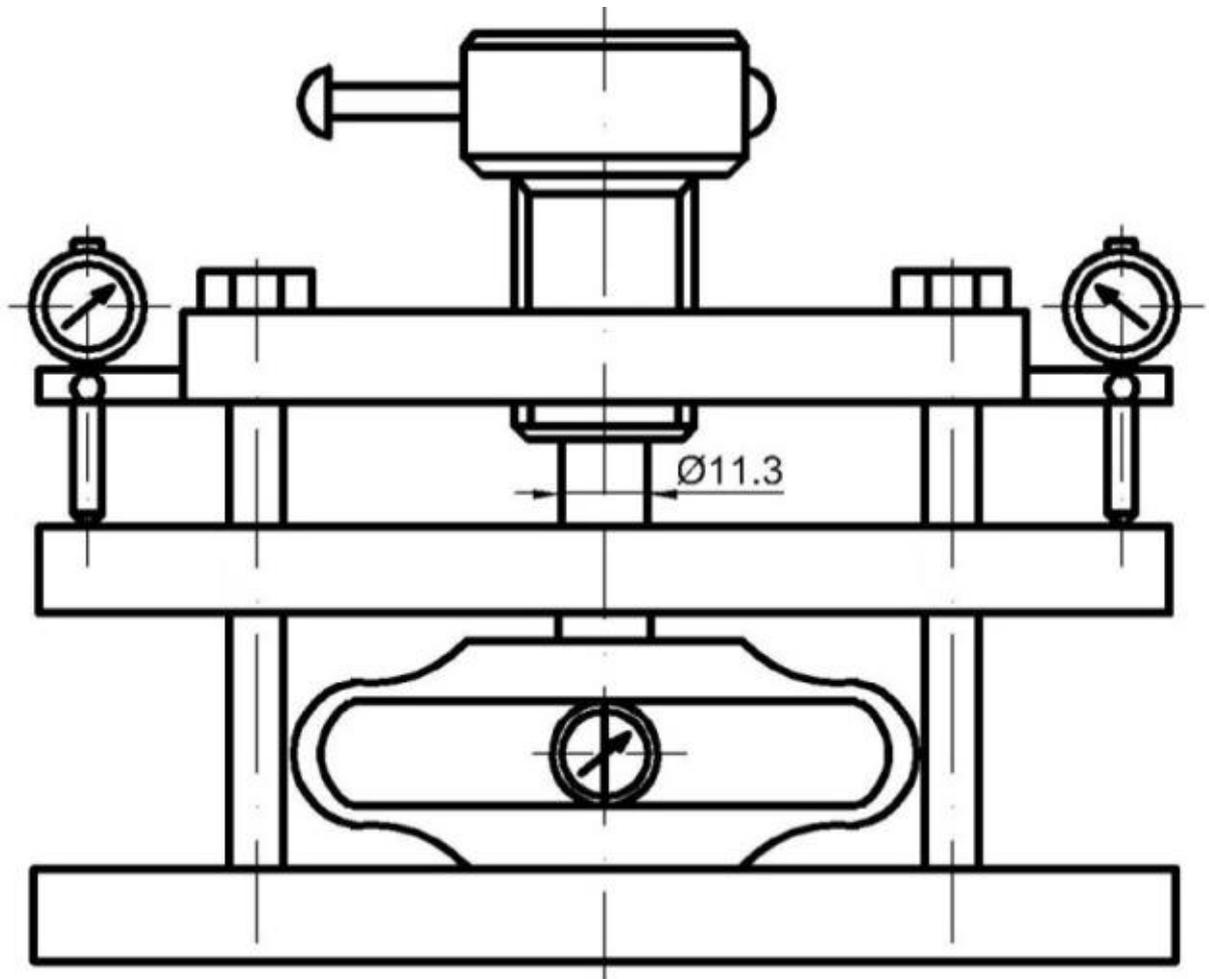


Рисунок 3.5 Схема установки для исследования вязкоупругих свойств полимерных материалов

Триботехнические исследования металлополимерных трибосистем в условиях вращательного движения при граничном режиме смазывания выполнялись на специальном стенде, собранном на базе настольно-сверлильного станка 2М112. Нагружающий механизм стенда представляет собой рычажную систему, в которой длинный рычаг нагружается динамометром растяжения ДПУ-0,5-2 (ГОСТ 13837 - 79), а короткий, передающий усилие на шпиндель,

является радиусом реечной шестерни, перемещающей пиноль станка. Соотношение длины плеч равно 1:10.

Изменение скорости вращения шпинделя станка выполняется частотным преобразователем серии Altivar 312 модели ATV312HU15N4, включенным в цепь питания электродвигателя.

Экспериментальные образцы с покрытием устанавливаются и фиксируются от проворота в специальном приспособлении, закрепленном на столе станка (рисунок 3.6). Контртела закрепляются в трехкулачковом сверлильном патроне (ГОСТ 8522-79), установленном в шпинделе станка.



Рисунок 3.6 Приспособление для фиксации образцов

На стенде имеются две измерительных цепи. Одна – для измерения температуры, состоящая из термопары ХК и милливольтметра модели МР54-02, вторая – для измерения крутящего момента, состоящая из динамометра серии ДОР-3-И, зарегистрированного в ГОСРЕЕСТРЕ РФ под № 27202-09. Динамометр состоит из тензометрического S-образного датчика и индикатора R320 (рисунок 3.7). Тензометрический датчик имеет возможность воспринимать усилия как на растяжение, так и на сжатие, в нашем случае он работает на растяжение. Измеряемое усилие отображается на индикаторе R320, который при помощи программы Rinstrum View300 позволяет передавать результаты измерений на персональный компьютер. Результаты измерений записываются в виде зависимости усилия (Ньютоны) от времени (секунды).



Рисунок 3.7 Индикатором R320 и тензометрический S-образный датчик

Тарировка системы нагружения стенда выполнялась образцовым динамометром сжатия модели ДОСМ-3-1 (ГОСТ 9500 - 84), установленным под шпindelь станка. Тарировочный график линеен во всем диапазоне нагрузок.

Общий вид лабораторного стенда представлен на рисунке 3.8, а его основные технические характеристики – в таблице 3.2.



Рисунок 3.8 Стенд для триботехнических исследований

Таблица 3.2 - Основные технические характеристики лабораторного стенда

№ п/п	Параметры	Диапазон значений
1	Нагрузка, МПа	0-100
2	Мощность, кВт	1,5
3	Частота вращения контртела, об/мин	0-1500
4	Диапазон измерения температуры, °С	0 - 400

Требуемая точность результатов измерений обеспечивалась использованием измерительных средств требуемого класса, прошедших своевременную поверку. Основные метрологические характеристики, применяемых измерительных средств, приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Метрологические характеристики средств измерений

№ п/п	Наименование	Тип	ГОСТ	Предел измерения	Цена деления	Класс точности	Погрешность
1	Штангенциркуль	ШЦ- 1	166-89	0-125мм	0,1мм	2	$\pm 0,05$ мм
2	Штанген-глубиномер	ШГ	162-90	0 -200 мм	0,01	2	$\pm 0,05$ мм
3	Индикатор часового типа	ИЧ	577-84	0-10мм	0,01мм	2	$\pm 0,005$
4	Головка измерительная	ИГ	18833-73	0-1мм	0,001мм	2	$\pm 4 \cdot 10^{-4}$ мм
5	Динамометр сжатия	ДОСМ 3 - 1	9500-84	0-30кН	0,013кН	1	$\pm 1,5\%$
6	Динамометр растяжения	ДПУ 0,5 - 2	13837-79	0-5кН	0,05кН	2	$\pm 2,0\%$
7	Весы аналитические	ВЛА-200	8520-84	0-200г	0,0001г	2	$\pm 10^{-5}$ г
8	Микрометр	МК-25	6507-90	0-25мм	0,01мм	2	$\pm 4 \cdot 10^{-3}$ мм
9	Регулирующий милливольтметр	МР 64-02	9736-91	0 – 600 ⁰ С	10 ⁰ С	1,5	$\pm 3^0$ С
10	Профилограф	NewView600S WLI		-	0,001мм	1	$\pm 3,0\%$
11	Прибор синхронного термического анализа	STA 449 F3 Jupiter		20-1650 ⁰ С	0,1 ⁰ С	1	$\pm 3^0$ С

Для измерения толщины покрытия и величины его износа использовался штангенглубиномер ШГ-250-0,05 (ГОСТ 162-90). Приспособление для измерения толщины покрытия и величины его износа в процессе эксплуатации показано на рисунке 3.9.

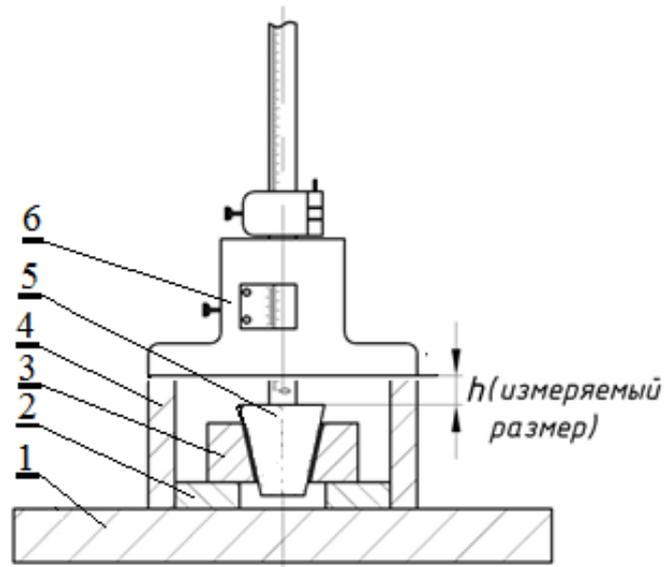


Рисунок 3.9 Схема измерения толщины покрытия и величины его износа

Приспособление смонтировано на основании 1, на котором установлено кольцо 2, являющееся опорой образца 3, имеющего коническое отверстие с измеряемым покрытием. Эти детали помещены внутрь кольца 4 – опоры пятки штангенглубиномера 6. Измерения основаны на увеличении просадки конического пуансона 5 внутрь образца в связи с износом измеряемого покрытия. Измеряемой втулкой радиально-упорного конического подшипника 4 и пуансона 5.

Тогда величина износа Δ по нормали к поверхности покрытия определяется простой формулой:

$$\Delta = (h_0 - h_i) \sin \alpha , \quad (3.1)$$

где h_0 и h_i – начальное и текущее значение просадки пуансона,

α – угол конуса.

Исследование теплофизических свойств покрытия начиналось с определения теплоёмкости разработанного покрытия [140, 141, 142, 143]. Измерение теплоёмкости проводилось на установке синхронного термического анализа STA 449 F3 Jupiter. Образцы для исследований представляли собой отверждённое антифрикционное покрытие диаметром 5 мм и толщиной 0,55 мм.

На начальном этапе осуществлялась прокалка печи и термопары вместе с тиглями и крышками до 1500°C в течении часа. После чего, производился запуск программного пакета, при помощи которого обрабатывалась полученная информация. Определение теплоёмкости покрытия начиналось со съёма базовой линии с двумя пустыми платиновыми тиглями и крышками (корректировка на весах). Затем эталонный образец (сапфир) подвергался температурному воздействию и определялась зависимость изменения его теплоёмкости от температуры. Далее, вместо эталонного образца укладывался образец антифрикционного полимерного покрытия и производился замер. На завершающем этапе, при помощи программы Proteus Analiss обрабатывались результаты.

Измерения коэффициента теплопроводности разработанного композиционного покрытия проводились при помощи установки, собранной на базе прибора для измерения теплового потока «ИПП-2» 6, источника тепла 5 и теплоизоляционного материала 2, закреплённого на штативе (рисунке 3.10).

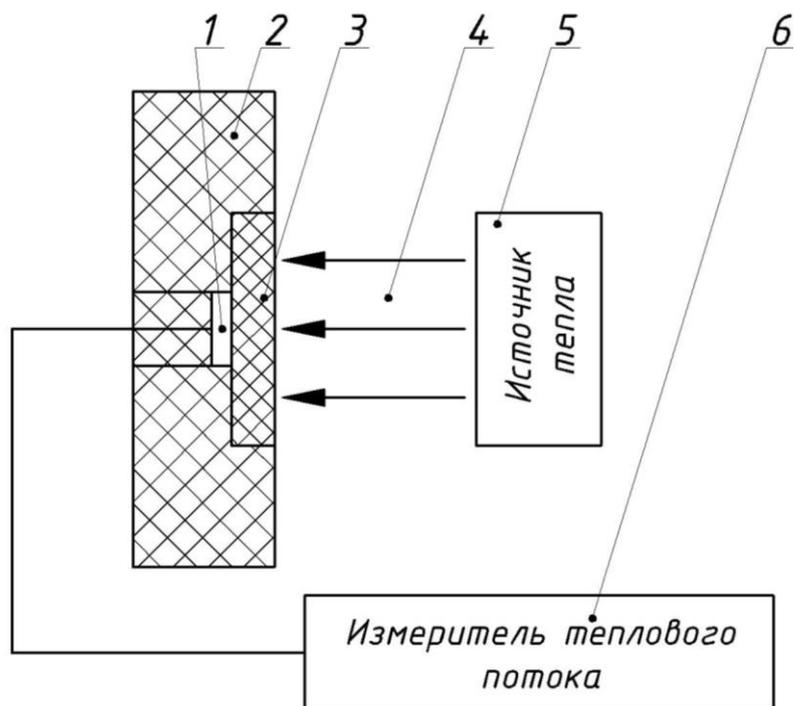


Рисунок 3.10 Схема измерения коэффициента теплопроводности покрытия:

- 1 – зонд теплового потока; 2 – теплоизоляционный материал (пеноплекс);
 3 – образец для измерения; 4 – тепловой поток; 5 – источник тепла; 6 - измеритель теплового потока «ИПП-2»

Образцы 3 для исследования представляли собой отверждённый микропластик, который закреплялся в окне теплоизоляционного материала. На рабочую сторону покрытия был направлен тепловой поток 4, к обратной стороне, наклеиваемой на субстрат, плотно прилегал датчик, измеряющий удельный тепловой поток. Время облучения было достаточным для полного прогрева покрытия до температуры 90°C. После прогрева образцов замерялась температура поверхности покрытия на лицевой и оборотной стороне при помощи пирометра FLUS IR-823, для определения разности температур. Измерение теплового потока продолжалось до стабилизации показаний прибора [140, 141].

Коэффициент теплопроводности антифрикционного покрытия λ определялся из выражения:

$$\lambda = \frac{q \cdot \delta}{t_1 - t_2}, \quad (3.2)$$

где q - тепловой поток (пропущенный через покрытие), Вт/м²;

δ - толщина покрытия, м;

t_1 - температура покрытия на лицевой стороне, °С;

t_2 - температура покрытия на оборотной стороне, °С.

Тепловой поток, пропущенный через покрытие определяется из выражения:

$$q = q_{\text{полн.}} - q_{\text{отр.}} - q_{\text{проп.}}, \quad (3.3)$$

где q - поглощённый тепловой поток, Вт/м²;

$q_{\text{полн.}}$ - полный тепловой поток, Вт/м²;

$q_{\text{отр.}}$ - отраженный тепловой поток, Вт/м²;

$q_{\text{проп.}}$ - пропущенный тепловой поток, Вт/м².

Определение плотности покрытия осуществлялось по общеизвестной зависимости:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (3.4)$$

где m - масса образца, кг;

V - объём, м³.

Отверждённые образцы антифрикционного покрытия измерялись и взвешивались на лабораторных весах ВЛА - 200.

В процессе экспериментальных исследований точность результатов обеспечивалась применением измерительных средств необходимого требуемого класса точности, своевременно подвергнутых госповерке. Достоверность результатов основывалась на обязательном наличии 3-5 параллельных опытов и последующей статистической обработке результатов измерений. Следовательно, всё экспериментальное оборудование и средства измерений обладают достаточной областью характеристик, обеспечивающих успешное решение поставленных в работе задач.

3.3 Применяемые материалы и образцы

Разрабатываемое и исследуемое антифрикционное покрытие представляет собой гибридный композиционный материал. Он состоит из тканого каркаса в виде специального плетения из фторопластовых нитей «полифен» и полиимидных нитей - «аримид Т». В качестве матричного материала и адгезива для фиксации покрытия на рабочей поверхности образцов применяется связующее холодного отверждения, на основе эпоксидно-диановой смолы марки ЭД-20 с добавлением наполнителей, предназначенных для улучшения фрикционных характеристик покрытий. Матричные связующие холодного отверждения позволяют наносить покрытия на поверхности крупногабаритных деталей, что значительно расширяет область применения рассматриваемых антифрикционных покрытий. Следует отметить, что, увеличивая технологичность применения, клеевые соединения

холодного отверждения одновременно снижают прочность и теплостойкость, в сравнении со связующими горячего отверждения. В связи с этим в их состав вводятся дополнительные вещества, подобранные на основе анализа литературы, в значительной степени компенсирующие эти недостатки. Так, для повышения прочности в связующее добавляется медь порошковая (марка МП-1 ГОСТ4960-75), а для понижения коэффициента трения, т.е. уменьшения генерации тепла при трении, жидкие смазочные материалы на основе минеральных масел разной вязкости.

В качестве тканого каркаса композитов используются полуторослойные и однослойные технические ткани (см. таблицу 3.4).

Таблица 3.4. - Тканые армирующие каркасы покрытий

№№ п/п	Тип ткацкого переплетения	Артикул	Технические условия ВНИИ ПХВ	Толщина, мм
1	Полуторослойный неправильный атлас	5387/2 – 79	268 – 80	0,534±0,004
2	Полуторослойная саржа 1/3	5384/3=80	278 - 81	0,455±0,003
3	Однослойная саржа 1/1 (полотно)	5386/1 - 80	277 – 80	0,240±0,002

Примеры рабочих поверхностей применяемых тканей представлены на рисунке 3.11.

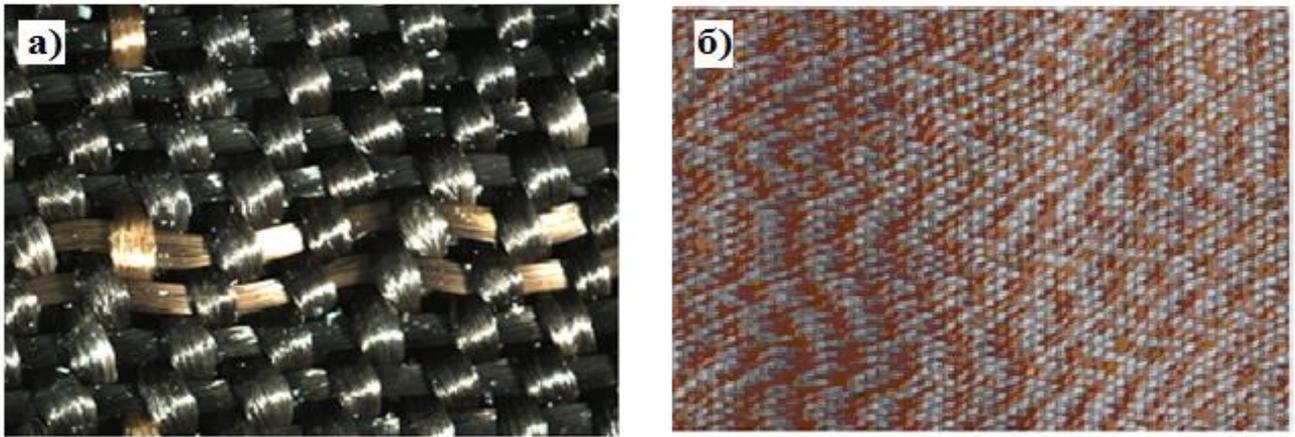


Рисунок 3.11 Тканые каркасы композита на основе саржи:

а) полуторослойный, б) однослойный

Первые два типа тканей являются полуторослойными и состоят из одной основы и двух утков. Первый тип ткани при наибольшей толщине имеет самый большой объем фторопласта и максимальную демпфирующую способность. У второго типа ткани на рабочую поверхность выведена сетка из полиимидных нитей с высокой адгезией к матричному связующему, что повышает прочность композита, равномерно перераспределяя нагрузку. Изнанка тканей, прилегающая к субстрату, содержит 95 – 97% полиимидных нитей.

У однослойной ткани на рабочую поверхность кроме фторопластовых выведено до 25% прочных нитей из аримидаТ. Фторопласт на рабочую поверхность выводится не посредством ткацких переплетений, а путем скрутки (200 круток/м) с полиимидными нитями. Однослойная саржа 1/1 представляет собой каркас наиболее жесткого покрытия [144]. У покрытий на ее основе любая сторона является рабочей.

Раскрой тканей атласного переплетения производится так, чтобы фторопластовый и полиимидный утки ткани в покрытии совпадали с вектором скорости скольжения. Это обеспечивает наибольшую износостойкость и несущую способность покрытий [144, 145, 146]. Однослойные саржи могут раскраиваться как вдоль основы, так и вдоль утка.

Для исследования адгезионной прочности покрытий, в качестве субстрата использовались образцы в виде пластин из стали 45 (ГОСТ 1050-74) и латуни Л63 (ГОСТ 15527-70) толщиной 2 мм (рисунок 3.12).



Рис.3.12 Пластины для исследования адгезионной прочности

Поверхность под нанесение покрытий обрабатывалась наждачной бумагой Ф14А-25НМ, обезжиривалась нефрасом (ТУ 38.401-67-108-92), сушилась на воздухе и протиралась ацетоном (ГОСТ 27-62). После обработки она имела шероховатость $R_a = 1,187 - 1,201$ мкм (рисунок 3.13).

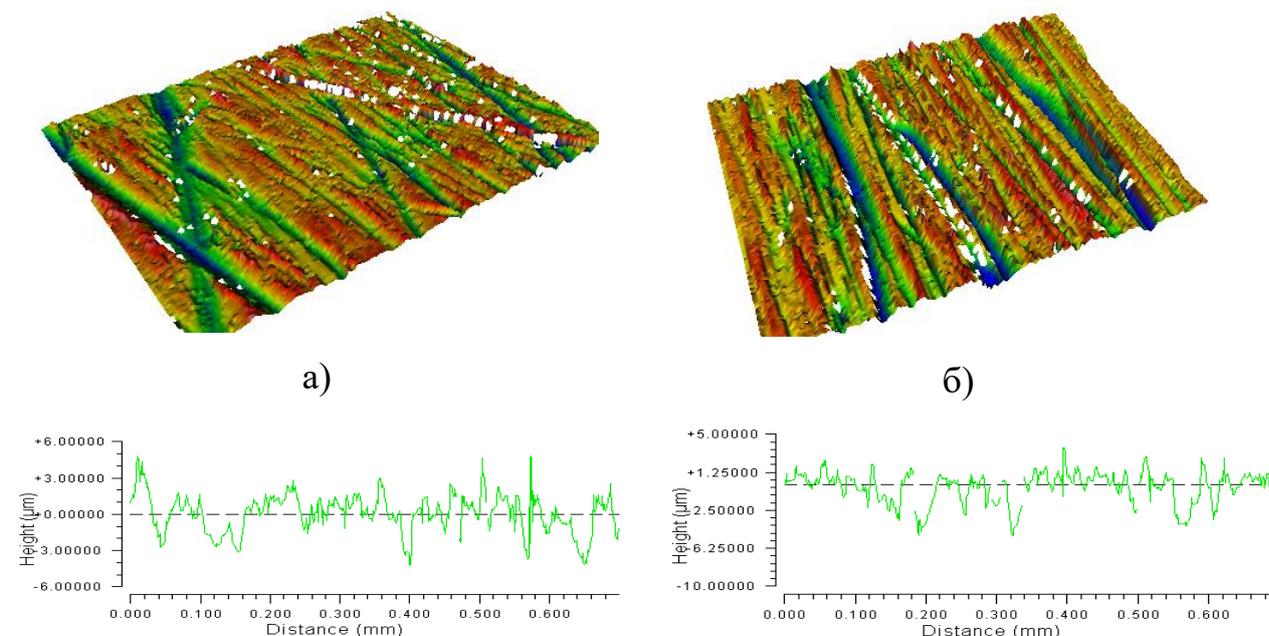


Рисунок 3.13 Поверхность образцов для адгезионных исследований после обработки: а) сталь 45; б) латунь Л62

Образцы для триботехнических испытаний представляли собой модель радиально-упорного подшипника в виде втулки с коническим внутренним отверстием (Рисунок 3.14). Материал образцов – сталь 45.

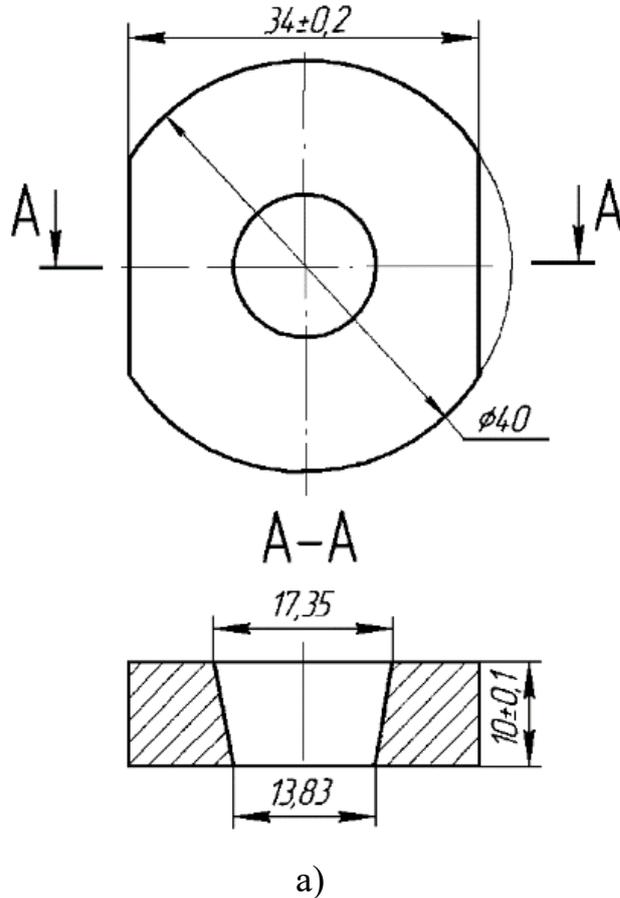


Рисунок 3.14 Экспериментальные образцы для трибоиспытаний:
а) эскиз, б) общий вид.

Полимерное антифрикционное покрытие наносилось на внутреннюю поверхность отверстия. При установке образцов в приспособление для предотвращения их проворота были выполнены на их наружной поверхности две симметричные лыски. Все образцы были шлифованы по торцам в размер $10 \pm 0,1$ мм.

Фиксация покрытия на поверхности образцов обеспечивалась пуансонами с прокладкой из фторопластовой пленки (ГОСТ 24228-80), а необходимая нагрузка отверждения для матричного связующего осуществлялась при помощи специального пружинного приспособления, представленного на рисунке 3.15.

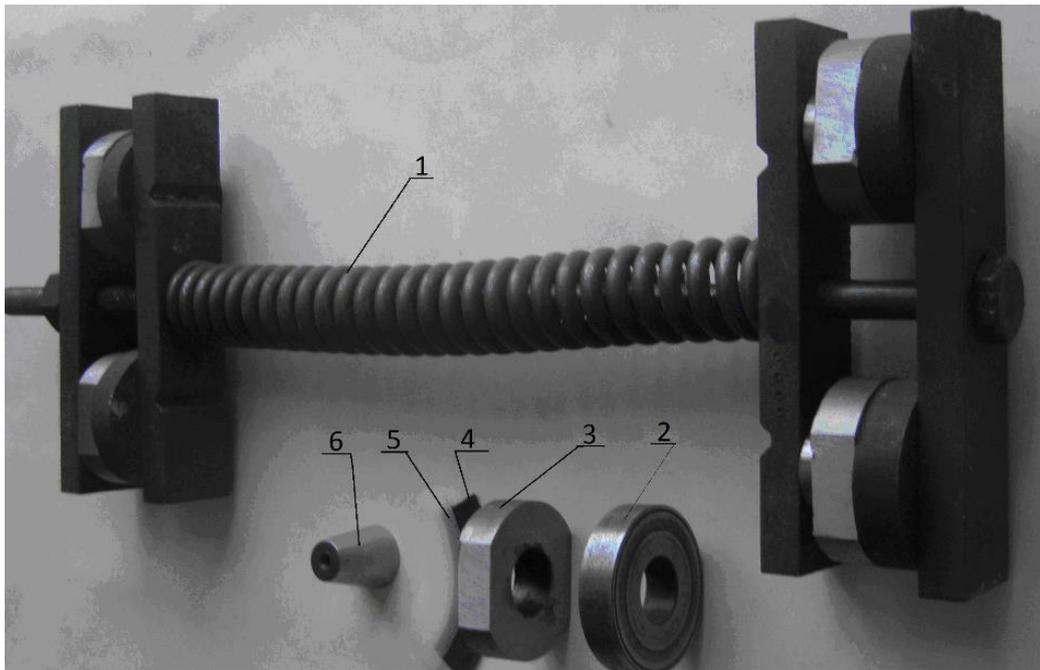
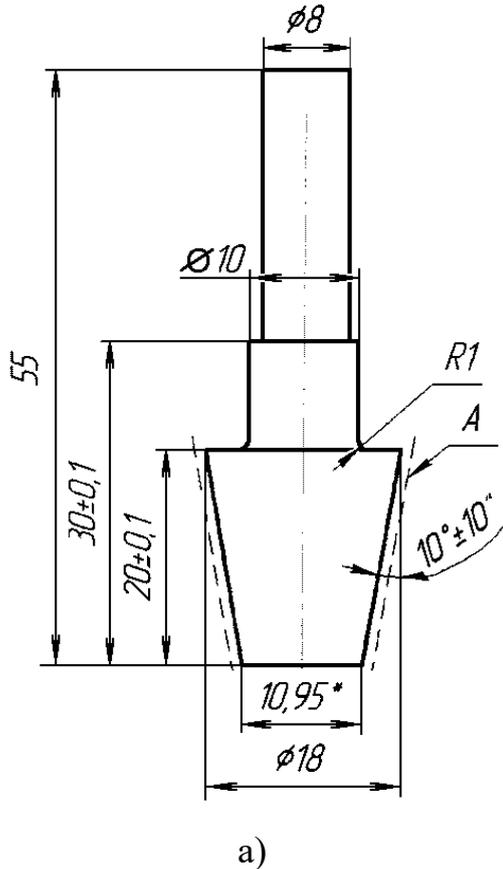


Рис. 3.15 Приспособление для нанесения покрытия на экспериментальные образцы: 1- пружина, 2- опора, 3 – образец, 4 – препрег, 5 – антиадгезив, 6 – пуансон

После зачистки внутренней поверхности образца она обезжиривалась и на нее наносился тонкий слой матричного связующего. Затем укладывалась и прижималась к поверхности пропитанная связующим выкройка тканного каркаса. Поверх ткани устанавливался конический пуансон, покрытый фторопластовой пленкой. Полученные четыре технологических пакета помещались между фиксирующими пластинами приспособления и стягивались до требуемой нагрузки отверждения. Условия и выбранные режимы нанесения покрытия полностью соответствовали технологическим условиям на связующее: 25 ± 5 °С при выдержке 24 часа под давлением 0,52 – 0,5 МПа.

Ответные детали (контртела), сопрягаемые с покрытием (рисунок 3.16) изготавливались из широко применяемых в машиностроении материалов (см. таблицу 3.5). Они представляют собой конические валики со шлифованной и полированной поверхностью ($R_a = 0,2 - 0,4$ мкм). Контртела из сталей 45 и ШХ15 были подвергнуты термообработке. Отсутствие самоторможения обеспечивает выбранный угол конуса. Следует отметить, что $\text{tg}10^\circ$ равен 0,173468, а это значительно превышает коэффициенты трения в исследуемом трибосопряжении.

С целью удобства закрепления контртел в патроне станка на цилиндрической части предусмотрен уступ, который позволяет закреплять их при одинаковом вылете.



б)

Рисунок 3.16 Контртела: а) эскиз, б) общий вид

Таблица 3.5 - Характеристики материалов контртел

№№ п/п	Марка материала	Модуль Е, МПа	Коэффициент Пуассона ν	Предел прочности σ_b , МПа	Относитель- ное удлинение δ , %
1.	Сталь 45	$2,06 \times 10^5$	0,33	598	16
2.	Сталь ШХ - 15			715	21
3.	Сталь 12Х18 Н9Т			528	38
4	Титановый сплав ВТ3-1	$1,15 \times 10^5$	0,30	1150	12

3.4 Планирование экспериментов и обработка результатов

В связи с тем, что состав матричного связующего представляет собой трехкомпонентную систему и не предусматривает независимого изменения компонентов (их сумма равна 100%), основой разработки является использование симплекс-решётчатых планов типа состав-свойство. Таким образом, поскольку свойства матричного связующего зависят от всех компонентов смеси расчетные модели должны быть получены с учётом условия нормированности.

Геометрическое место точек, удовлетворяющее этому условию представляет собой треугольный симплекс с вершинами, каждая из которых содержит 100% только одного из компонентов.

В работе использованы симплекс-решётчатые планы 3.3 для трёхкомпонентных смесей и моделей третьего порядка [147, 148]. Графическая интерпретация симплекс – решётчатых планов третьего порядка показана на рисунке 3.17, где номера точек соответствуют номерам в матрице симплекс-решетчатого плана (таблице 3.6). Каждая точка симплекса соответствует определённому набору компонентов X_i в долях от общего количества смеси и результирующему выходу Y .

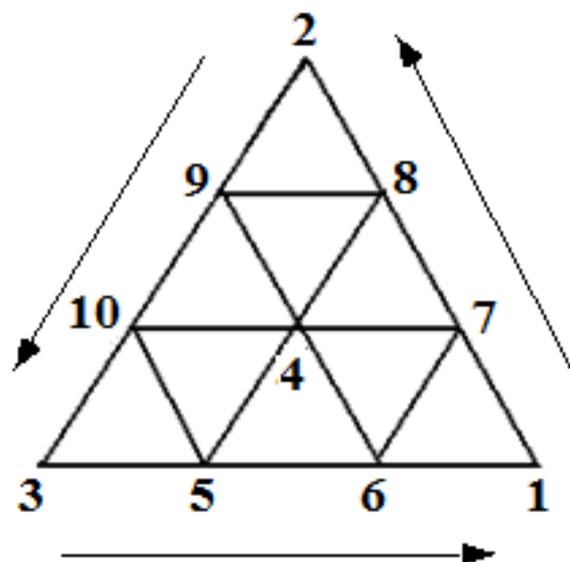


Рисунок 3.17 Геометрическая интерпретация симплекс – решётчатых планов третьего порядка

Количество цифр в индексном коде обозначения точки симплекса соответствует количеству частей, на которое разделены рёбра симплекса или порядку модели. Цифры всегда располагаются по мере увеличения в натуральном ряду чисел (1, 2, 3...n). Количество одинаковых цифр в индексе должно соответствовать количеству одинаковых долей компонента с этим номером.

Таблица 3.6. - Матрица симплекс-решётчатого плана

№ п/п	Факторы			Выход
	X ₁	X ₂	X ₃	
1	1	0	0	Y ₁
2	0	1	0	Y ₂
3	0	0	1	Y ₃
4	1/3	1/3	1/3	Y ₁₂₃
5	1/3	0	2/3	Y ₁₃₃
6	2/3	0	1/3	Y ₁₁₃
7	2/3	1/3	0	Y ₁₁₂
8	1/3	2/3	0	Y ₁₂₂
9	0	2/3	1/3	Y ₂₂₃
10	0	1/3	2/3	Y ₂₃₃

После получения экспериментальных данных в точках симплекса, переходим к формированию модели вида:

$$Y = \sum_{1 \leq i \leq q} \beta_i X_i + \sum_{1 \leq i \leq q} \beta_{ij} X_i X_j + \sum_{1 \leq i \leq q} \gamma_{ij} X_i X_j (X_i - X_j) + \sum_{1 \leq i \leq q} \beta_{ijk} X_i X_j X_k, \quad (3.2)$$

где β – параметры модели.

Графическая интерпретация моделей на симплексе выполняется специальной программой [149].

Экспериментальные исследования, эксплуатационных характеристик, исследуемых трибосистем, выполнялись по полнофакторным экспериментальным

планам (см. таблицу 3.1). Статистическая обработка результатов многофакторных исследований включает следующие этапы:

- расчет дисперсий воспроизводимости в кодовых и натуральных переменных [153];
- оценка однородности дисперсий по критерию Кохрена [153];
- определение коэффициентов уравнения регрессии;
- оценку значимости коэффициентов регрессии по критерию Стьюдента [153];
- переход к модели в натуральных переменных [153];
- оценку адекватности модели по критерию Фишера [153].

Все статистические критерии выбираются с достоверностью 95% [150,151,152].

Графическая интерпретация поверхности отклика осуществляется в виде трехмерных (объемных) графиков или методом двумерных сечений [153, 154].

Таким образом, разработанная методика полностью отвечает поставленной в работе цели и позволяет решить все частные задачи.

4 КОМПОЗИЦИОННОЕ АНТИФРИКЦИОННОЕ ПОКРЫТИЕ И ЕГО ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Срок службы машин и агрегатов напрямую зависит от выбора материалов для изготовления подшипников. Недостаточно обоснованный выбор материалов уменьшает срок их эксплуатации, возрастает количество ремонтных работ, а как следствие, снижается производительность из-за простоя оборудования. От выбора материалов также зависит конструктивное исполнение подшипников. На стадии разработки конструкции подшипников необходимо учитывать свойства материалов, из которых они будут состоять, а именно свести до минимума вредное влияние отрицательных характеристик материалов (низкую теплопроводность, нестабильность размеров, плохую адгезионную прочность и др.) и в полной мере использовать низкий коэффициент трения и высокую износостойкость. В связи со сложной технологией производства и механической обработкой некоторых материалов необходимо применять специализированное оборудование, что в свою очередь усложняет процесс изготовления. По этой причине, материал подшипника должен быть малодефицитным, а технология обработки проста. Все эти факторы необходимо учитывать при конструировании машин.

4.1 Разработка композита для антифрикционных покрытий

Одним из основных факторов, определяющих прочность изделий на основе эпоксидных смол, является режим отверждения. Условия отверждения оказывают большое влияние на надмолекулярную структуру и качество готовой продукции антифрикционных композиций. В связи с тем, что данные композиции включают эпоксидные смолы, отвердитель и наполнители, на границах раздела полимер-наполнитель-арматура возникают значительные остаточные напряжения. В свою очередь, одним из ключевых аспектов функциональности материала является его способность выдерживать нагрузки при высоких температурах. Способность

антифрикционных полимерных композитов нести нагрузку снижается с увеличением температуры.

Помимо технологических факторов, на величину напряжений значительное влияние оказывает химическая и термическая усадка смолы. Термические напряжения, которые определяются различием термических коэффициентов линейного расширения полимера и наполнителя, можно снизить введением активных разбавителей или минеральных наполнителей.

4.1.1 Технологии нанесения покрытий

Технология нанесения исследуемых композиционных антифрикционных покрытий содержит ряд особенностей. Покрытие, чаще всего, фиксируется на субстрате при помощи матричного связующего, которое в этом случае дополнительно выполняет функции адгезива. Наиболее перспективным связующим для закрепления покрытия на крупногабаритных деталях являются эпоксидные связующие холодного отверждения [10, 155]. Недостатком данного связующего является ограниченная термостойкость, что требует более глубокого изучения и доработки его состава.

Для отверждения связующего при условии обеспечения постоянства толщины покрытия, что гарантирует требуемую величину монтажного или рабочего зазора трибосопряжения, необходимо выдержать режимы отверждения. Последние включают давление, температуру и время. Эти режимные параметры могут быть обеспечены в пресс-форме или в более простом и экономичном ее варианте - технологическом пакете.

Общим требованием ко всем связующим является необходимость наличия их жидкого состояния, хотя бы временного, для пропитки армирующей компоненты композита. Отверждение связующих как в функции матрицы, так и в роли адгезива, происходит одновременно при требуемом давлении и температуре.

В рамках технологической задачи было установлено влияние нагрузки отверждения матричного связующего при нанесении покрытия на его основные

параметры. К ним относится адгезионная прочность покрытия, определяющая работоспособность трибосистемы, и толщина, обеспечивающая точность рабочего посадочного размера подшипника. Адгезионная прочность нанесенных покрытий с эпоксидной матрицей оценивалась по стандартной методике - величине усилия отслаивания покрытия при отгибе его свободного конца на 180 градусов. Результаты влияния нагрузки отверждения на параметры покрытия показаны на рисунке 4.1. Отмечено снижение адгезионной прочности покрытия, нанесенного на поверхность латунного образца, в сравнении со стальным, в среднем на 4%. Это может быть объяснено более низкой поверхностной энергией меди и медных сплавов [156-160].

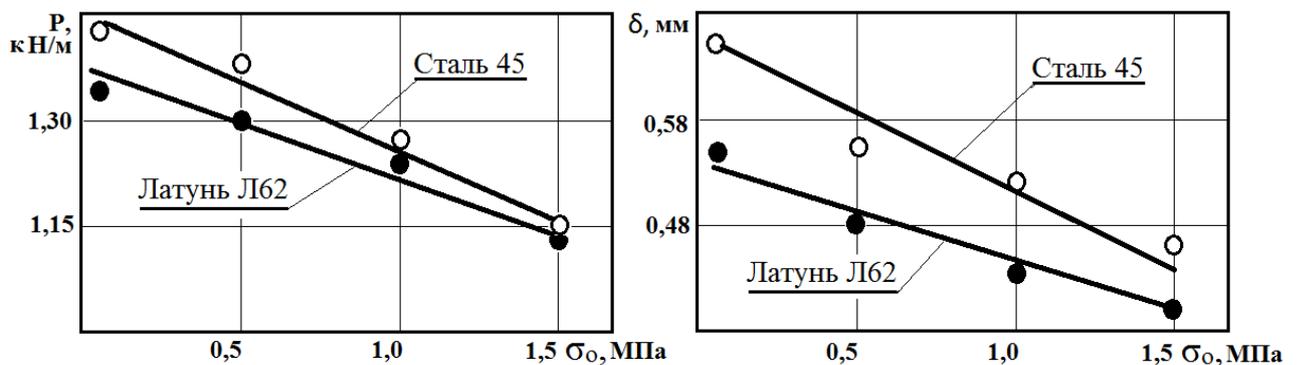


Рисунок 4.1 Влияние нагрузки отверждения на параметры покрытия

Таким образом, в результате проведенных исследований были установлены оптимальные величины технологических режимов нанесения покрытий, обеспечивающие с одной стороны требуемый монтажный зазор, с другой – необходимый эксплуатационный ресурс трибосистемы.

4.1.2 Прочность матричного материала

В связи с изложенным необходимо найти оптимальный состав эпоксидной композиции, изучив влияние соотношения компонентов на прочностные свойства матричного связующего, а также адгезионные, вязкоупругие и триботехнические характеристики антифрикционного полимерного покрытия.

Одним из путей улучшения триботехнических свойств полимеров - введение наполнителей. В качестве переменного фактора служит процентный состав компонентов матричного связующего, состоящего из:

- эпоксидная смола ЭД-20 (ГОСТ 10587-72);
- порошок меди (ГОСТ 4960-2009);
- турбинное масло марки Тп-22-С (ГОСТ 101821-2001).

При помощи введения наполнителей, представленных выше, возможно снизить величину коэффициента трения (и соответственно температуры) в результате смазочного действия масла. Кроме того, введение в матричный компаунд, в качестве наполнителя, масла значительно повышает коррозионную стойкость, контактирующих с покрытием, металлических контртел.

Следует отметить, что введение в матричное связующее медного порошка значительно повысит его прочность и теплофизические характеристики. Одновременно, металлический порошок является донором электронов, которые блокируют активные макрорадикалы, возникающие в результате термоокислительной деструкции полимеров. Применение медного порошка, в качестве наполнителя, при определённых режимах, может способствовать образованию медной плёнки фрикционного переноса на контртеле, повышающую износостойкость трибосопряжения, а также реализации в контакте режима избирательного переноса.

В связи с тем, что обычные многофакторные планы не позволяют изменять независимо друг от друга количество компонентов, входящих в систему, переходим к использованию симплекс-решётчатых планов. Для достаточно полного установления влияния отдельных компонентов на результирующие свойства композита выбираем для исследования симплекс-решётчатый план 3-го порядка [147, 148].

Номера точек на рисунке 4.2 соответствуют номерам в матрице плана. Каждая точка симплекса соответствует определённому содержанию компонентов X_i и выходу Y . Вершинам симплекса соответствует содержание 100 % только одного компонента. В нашем случае компоненты в вершинах симплекса 1,2,3 уже

являются смесями нескольких веществ (эпоксидная смола, турбинное масло, порошок меди). Подробный состав приведён в матрице планирования и схеме конкретного симплекс-решётчатого плана.

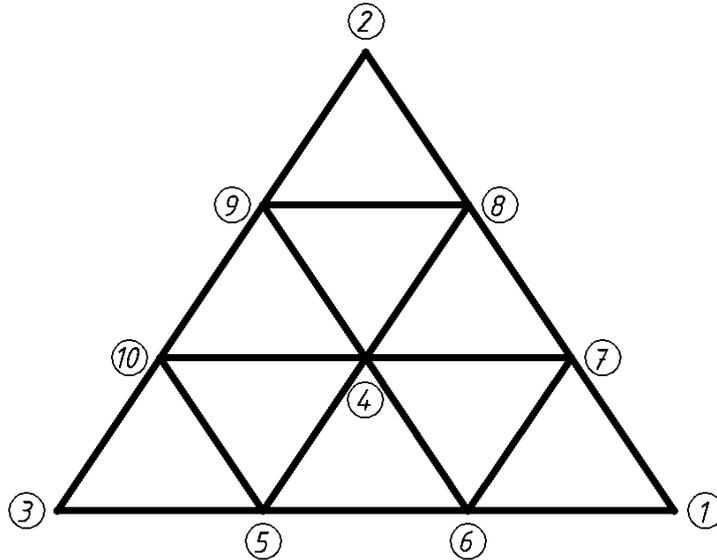


Рисунок 4.2 Симплекс – решётчатый план для трёхкомпонентной смеси третьего порядка

Направление стрелок показывает рост количества компонента, к которому они направлены. Количество одинаковых цифр в индексе соответствует количеству одинаковых долей этого компонента. Точки на рёбрах симплекса содержат только компоненты, соответствующие вершинам, соединяемым этими рёбрами. Все точки внутри симплекса содержат все компоненты смеси [147, 148].

На первом этапе выполняется симплекс-решётчатый план для установления влияния компонентов смеси, представляющей собой матричный компаунд разрабатываемого композита, на его прочностные и адгезионные свойства.

Для оценки механических свойств, связующего на эпоксидной основе, испытания проводились в несколько этапов. Эксперименты проводились на специальной испытательной установке для определения предела прочности при изгибе согласно ГОСТ 25.604-82. В каждой точке симплекса выполнялось 3 параллельных опыта. Нагружение образцов выполнялось вплоть до их разрушения.

До проведения исследований по симплекс-решётчатому плану были определены исходные прочностные характеристики эпоксидной смолы ЭД-20 с отвердителем полиэтиленполиамин (ПЭПА), без каких-либо добавок. Результаты приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Результаты испытаний

b, м	l, м	S, м ²	Показания динамометра сжатия	P, Н	σ , кН/м ²
0,0048	0,008	0,0384	1,18	269,8	7,03
0,0048	0,008	0,0384	1,2	385,3	10,03
0,0048	0,008	0,0384	1,2	355,02	9,25
Среднее					8,77

Далее переходим к разработке конкретного симплекс-решётчатого плана, позволяющего исследовать прочностные свойства полимерного матричного связующего.

Интервалы варьирования количественного содержания компонентов смеси в точках, соответствующих вершинам симплекса, представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 - Интервалы варьирования компонентов

№ п/п	Наименование	Диапазон варьирования в переменных			
		Натуральных, %		Кодовых	
		min	max	min	max
1	Эпоксидная смола	86	92	0	1
2	Масло	7	13	0	1
3	Медь	1	7	0	1

Состав связующего, соответствующий каждой точке симплекс-решётчатого плана, приведён в матрице (таблица 4.3). Для построения матрицы выбираем модель третьего порядка.

Таблица 4.3 - Матрица симплекс-решётчатого плана

№	X1	X2	X3	Эпоксидная смола	Масло Тп-22-С	Порошок меди	Выход
1	1	0	0	92	7	1	Y ₁
2	0	1	0	86	13	1	Y ₂
3	0	0	1	86	7	7	Y ₃
4	1/3	1/3	1/3	88	9	3	Y ₁₂₃
5	1/3	0	2/3	88	7	5	Y ₁₃₃
6	2/3	0	1/3	90	7	3	Y ₁₁₃
7	2/3	1/3	0	90	9	1	Y ₁₁₂
8	1/3	2/3	0	88	11	1	Y ₁₂₂
9	0	2/3	1/3	86	11	3	Y ₂₂₃
10	0	1/3	2/3	86	9	5	Y ₂₃₃

Для наглядного представления расположения на симплексе точек, соответствующих компаунду различного состава, на рисунке 4.3 приводим графический вид матрицы.

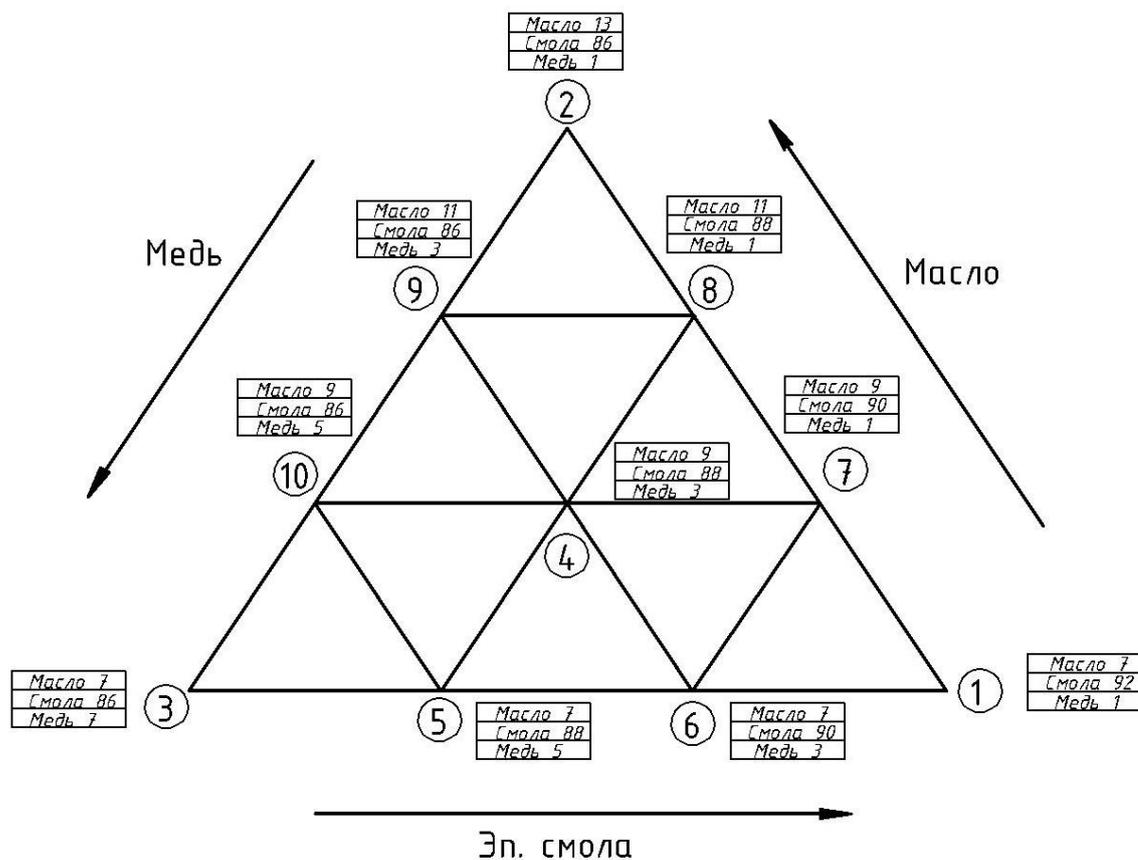


Рисунок 4.3 Графическая интерпретация симплекс-решётчатого плана

В процессе исследований прочности на изгиб у образцов с разным содержанием компонентов были получены экспериментальные данные значений максимальных напряжений, приводящих к разрушению образцов. В таблице приведены результаты отдельных опытов и их средние значения в каждой точке симплекса (таблица 4.4).

На основе полученных экспериментальных результатов в точках симплекса, можно, сформировать модель процесса изменения прочности матричного материала от его состава.

Таблица 4.4 - Экспериментальные результаты прочности образцов на изгиб

№ п/п	Прочность матричного материала на изгиб, Н/м ²									
	т. 1	т. 2	т. 3	т. 4	т. 5	т. 6	т. 7	т. 8	т. 9	т. 10
1	118,33	65,1	81,3	82,31	82,8	84,7	90,29	72,9	70,93	66,82
2	123,61	65,51	82,1	81,83	85,1	85,9	91,13	72,2	69,33	72,28
3	121,1	66,11	81,11	81,32	81,11	87,7	87,21	71,11	74,99	78,05
Ср.	121	65,6	81,5	81,8	83	86,1	89,5	72,1	71,75	72,4

Модель третьего порядка для трёхкомпонентной смеси имеет вид:

$$\begin{aligned}
 Y = & 121 \cdot X_1 + 65,6 \cdot X_2 + 81,5 \cdot X_3 - 56,25 \cdot X_1 X_2 - 75,15 \cdot X_1 X_3 - \\
 & - 6,64 \cdot X_2 X_3 - 7,2 \cdot X_1^2 X_2 + 7,2 \cdot X_1 X_2^2 - 67,95 \cdot X_1^2 X_3 + \\
 & + 67,95 \cdot X_1 X_3^2 + 31,39 \cdot X_2^2 X_3 - 31,39 \cdot X_2 X_3^2 + 209,81 \cdot X_1 X_2 X_3
 \end{aligned} \quad (4.1)$$

В приведённой модели здесь и далее выход (результат) обозначен символом Y , компоненты символами X с индексом компонента, соответствующего вершине рассматриваемого симплекса, параметры модели обозначены цифрами.

Графическое изображение модели на симплексе (рисунок 4.4) представлено комплексом изолиний прочности на изгиб, позволяющих легко определить

влияние отдельных компонентов. В ходе построения зависимости программа выполнила 10000 шагов табуляции для расчёта 28548 точек.

Анализ полученных результатов показывает, что наибольшую прочность на изгиб имеет состав матрицы [161], включающий следующие компоненты: эпоксидная смола с отвердителем – 92 %; турбинное масло – 7%; медный порошок – 1 %. Вместе с тем, следует отметить, что даже наименьшая прочность матрицы в точке 2, равная 65,6 Н/м², имеет достаточный запас прочности для применения в качестве связующего полимерного композита.

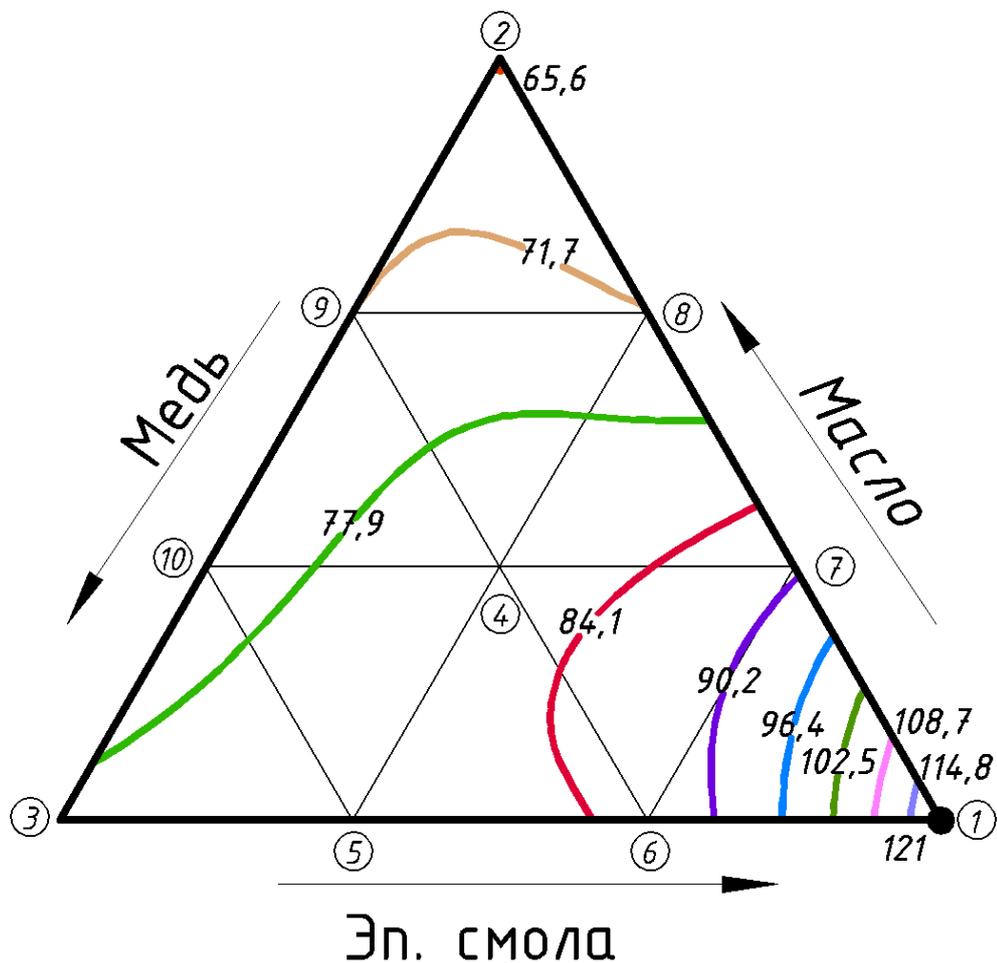


Рисунок 4.4 Зависимость прочности матричного связующего от состава

Анализ полученных результатов показывает, что весь исследуемый диапазон состава матричного связующего соответствует требуемой прочности для его работы в качестве покрытия. Оптимальной величиной состава при этом критерии считаем точку 1 симплекса.

4.1.3 Адгезионная прочность покрытий

Второй этап исследований заключался в определении адгезионной прочности клеевого шва, образованного матричным связующим композиционного покрытия с металлическим субстратом. Адгезионная прочность оценивалась по прочности клеевого соединения на отслаивание при отгибе свободного конца покрытия на 180 градусов [162, 163].

Результаты исследований адгезионной прочности покрытия на примере сталь 45 приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Экспериментальные результаты адгезионной прочности покрытия (материал субстрата сталь 45)

№ п/п	Параметры	Сила отслаивания, Н									
		т. 1	т. 2	т. 3	т. 4	т. 5	т. 6	т. 7	т. 8	т. 9	т. 10
1	Результаты опытов	28,4	18,6	41,2	22,6	34,3	31,4	23,5	18,6	19,6	23,5
2		28,4	16,7	38,3	21,6	38,3	32,4	23,5	16,7	20,6	25,5
3		27,5	15,7	40,2	21,6	35,3	34,3	24,5	19,6	20,6	24,5
Среднее		28,1	17,0	39,9	21,9	36,0	32,7	23,9	18,3	20,3	24,5
Адгезионная прочность, кН/м		2,34	1,42	2,73	1,83	2,63	2,46	1,99	1,53	1,69	2,04

Адгезионные исследования проводились на субстрате двух типов: сталь 45; латунь (Л62). Более прочный шов, при использованном матричном связующем образуется на стальном субстрате. В среднем его прочность на 15 % выше. Ниже приведены фотографии (рисунок 4.5) разрушенного клеевого шва на латуни и стали. Анализ разрушенной клеевой поверхности показывает, что вне зависимости от природы субстрата разрушения наблюдаются по самому клеевому шву.



Рисунок 4.5 Контактные поверхности после разрушения адгезионного шва

Полученные экспериментальные результаты в 10 точках симплекса позволяют сформировать модель, описывающую зависимость адгезионной прочности покрытия от состава матричного связующего композита, которая для данных покрытий одновременно является адгезивом. Модель третьего порядка для трёх компонентов матрицы композита имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 Y = & 2,34 \cdot X_1 + 1,42 \cdot X_2 + 2,73 \cdot X_3 - 0,54 \cdot X_1 X_2 + 0,045 \cdot X_1 X_3 - \\
 & - 0,936 \cdot X_2 X_3 + 1,035 \cdot X_1^2 X_2 - 1,035 \cdot X_1 X_2^2 - 0,27 \cdot X_1^2 X_3 + \\
 & + 0,27 \cdot X_1 X_3^2 + 0,558 \cdot X_2^2 X_3 - 0,558 \cdot X_2 X_3^2 - 4,707 \cdot X_1 X_2 X_3
 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Графическое изображение модели на симплексе (рисунок 4.6) представлено комплексом изолиний адгезионной прочности на отслаивание. В ходе построения зависимости программа выполнила 10000 шагов табуляции для расчёта 28548 точек.

Анализ полученных результатов позволяет установить последовательный рост адгезионной прочности по направлению к вершине симплекса 3. Во всем исследованном диапазоне адгезионная прочность полимерного покрытия колеблется в пределах 1,42-2,73 кН/м. Адгезионная прочность снижается с увеличением содержания турбинного масла и повышается с увеличением

содержания порошка меди. Оптимум адгезионной прочности соответствует точки 3 симплекса и принят, как один из критериев оптимальности связующего.

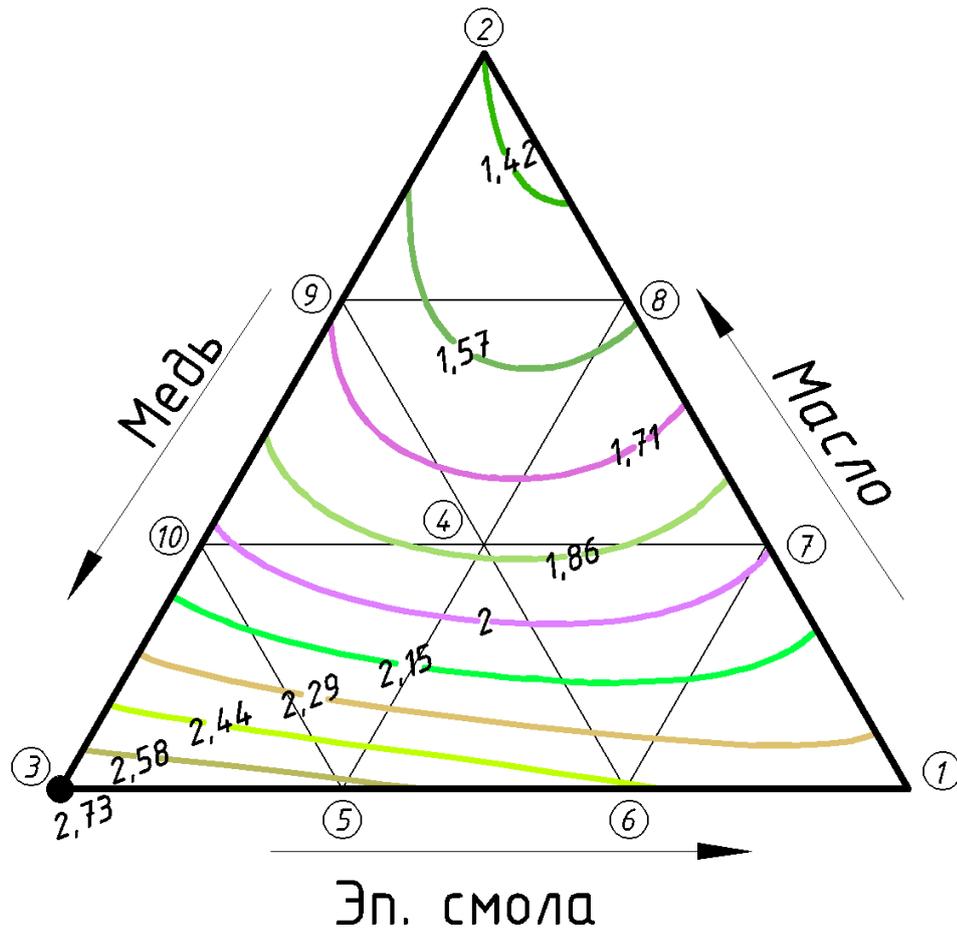


Рисунок 4.6 Зависимость адгезионной прочности композиционного покрытия от состава

Следует отметить, что в связи с низкими коэффициентами трения в исследуемой трибосистеме, даже наименьшее значение адгезионной прочности не приведёт к отслаиванию покрытия в рекомендованной области эксплуатационных режимов.

4.1.4 Вязкоупругие свойства покрытия

Известно, что формирование зазора в металлополимерных трибосистемах происходит в результате протекания двух механизмов: процесса изнашивания и процесса вязкоупругой деформации, т.е. ползучести. Составляющая ползучести для исследуемого композита может составлять 10-20 % [164].

На первом этапе исследований вязкоупругих свойств были определены параметры моделей ползучести «простого твёрдого тела» [165] для композита с матричным связующим без наполнителей. Для описания деформации ползучести используется модель типичного твёрдого тела:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_0} + \left(\frac{\sigma}{E_\infty} - \frac{\sigma}{E_0} \right) \cdot (1 - e^{-t/\tau}), \quad (4.3)$$

где σ — нагрузка, МПа;

E_0 — модуль упругости при сжатии, МПа;

E_∞ — равновесный модуль при сжатии, МПа;

τ — постоянная времени ползучести при сжатии.

Модули определяют жёсткость покрытия, а постоянная времени ползучести — время завершения вязкоупругого процесса. Следует отметить, что уменьшение толщины покрытия в результате деформации ползучести существенно не снижает его износостойкость, так как не уменьшает объём основного смазочного материала — фторопласта.

Результаты, включающие параметры выражения (4.3) и величину абсолютной деформации по нормали к покрытию, приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 - Экспериментальные результаты вязкоупругих свойств образцов без добавок

№	Модуль упругости при сжатии, E_0 (МПа)	Равновесный модуль при сжатии, E_∞ (МПа)	Постоянная времени ползучести при сжатии, τ (мин)	Деформация, δ_{\max} (мм)
1	707,1	516,1	11	0,14
2	889,4	608,7	10	0,12
3	661,6	495,5	9,99	0,15
Ср	752,7	540,1	10,33	0,137

Основной объём экспериментальных исследований относится к определению параметров вязкоупругих свойств в соответствии с симплекс-

решётчатым планом. Результаты этих экспериментальных исследований в виде параметров выражения сведены в таблицу 4.7.

Таблица 4.7 - Экспериментальные результаты вязкоупругих свойств

№ п/п	Модуль упругости при сжатии, E_0 (МПа)	Равновесный модуль при сжатии, E_∞ (МПа)	Постоянная времени ползучести при сжатии, τ (мин)	Деформация, δ_{\max} (мм)
т. 1	1700,3	834,2	6,91	0,09
т. 2	1188,2	324,9	9,8	0,22
т. 3	2248,5	1082,9	8,8	0,065
т. 4	2035,3	867,7	9,92	0,077
т. 5	2096,2	963,8	14,5	0,07
т. 6	1913,5	910,3	10,04	0,081
т. 7	1608,9	732,5	8,48	0,097
т. 8	1476,9	694,1	13,9	0,103
т. 9	1517,6	647,8	8,4	0,106
т. 10	1639,4	704,9	10,75	0,098

Полученные экспериментальные результаты в 10 точках симплекса позволяют сформировать модель, описывающую процесс ползучести во всём исследованном диапазоне в зависимости от состава матричного связующего композита. Полученная модель третьего порядка для трёх компонентов матрицы композита имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 Y = & 0,09 \cdot X_1 + 0,22 \cdot X_2 + 0,065 \cdot X_3 - 0,248 \cdot X_1 X_2 - 0,009 \cdot X_1 X_3 - \\
 & - 0,182 \cdot X_2 X_3 + 0,252 \cdot X_1^2 X_2 - 0,252 \cdot X_1 X_2^2 + 0,018 \cdot X_1^2 X_3 - \\
 & - 0,018 \cdot X_1 X_3^2 - 0,295 \cdot X_2^2 X_3 + 0,295 \cdot X_2 X_3^2 + 0,0203 \cdot X_1 X_2 X_3
 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Графическое изображение модели на симплексе (рисунок 4.7) представлено комплексом изолиний абсолютной нормальной деформации покрытия при сжатии. В ходе построения зависимости программа выполнила 10000 шагов табуляции для расчёта 28548 точек.

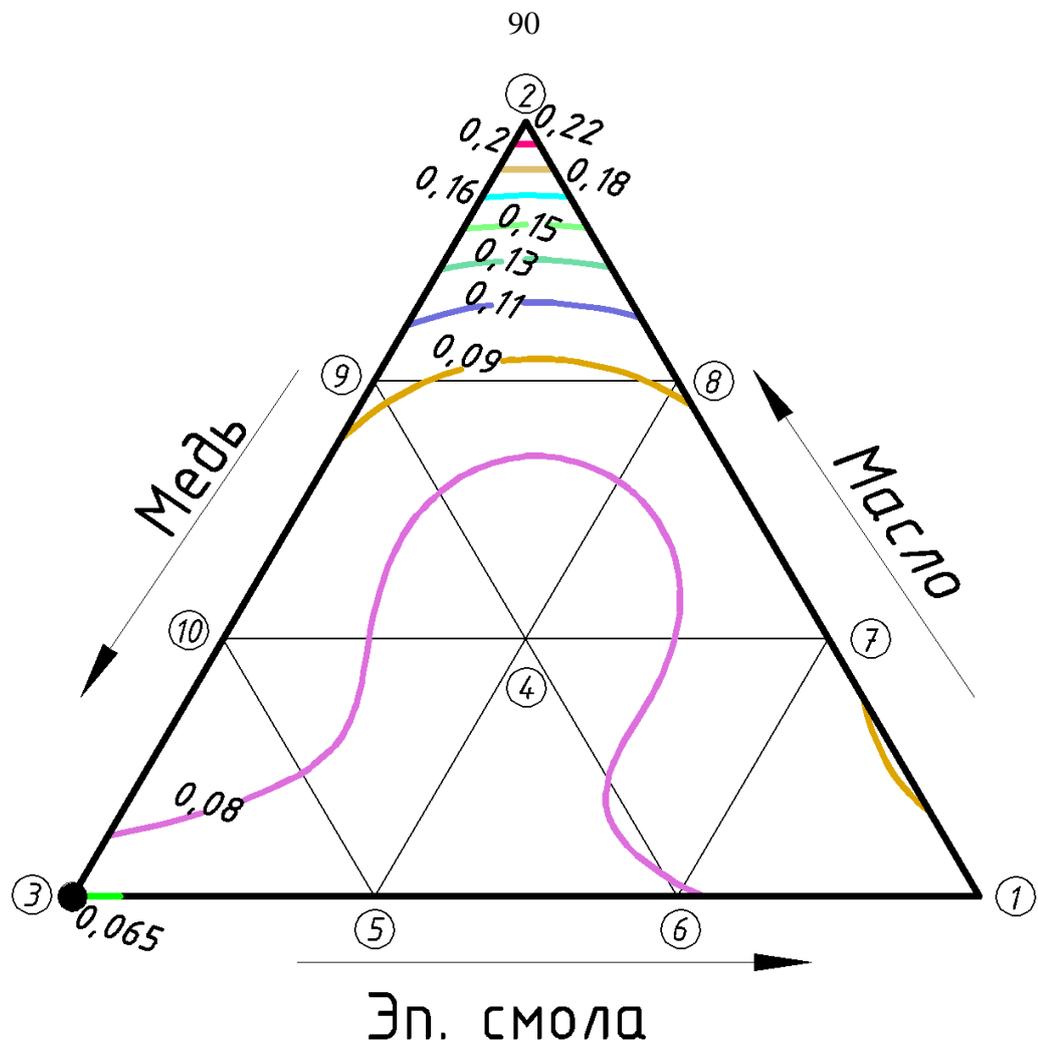


Рисунок 4.7 Зависимость деформации композиционного покрытия от состава

Изучение результатов часовой ползучести, представленных на симплексе в виде изолиний, показывает, что наименьшая вязкоупругость покрытия имеет место в центральной зоне симплекса и окрестностях точки 3. Таким образом, минимальную вязкоупругую деформацию обеспечивает наибольшее наличие в матрице композита медного порошка и наименьшее количество жидкого смазочного материала.

Сопряжения металлических контртел с полимерным антифрикционным покрытием рекомендуется выполнять по переходным посадкам [166], что требует знания упругих свойств покрытия, обеспечивающих сопряжения в любом диапазоне посадки без локальных разрушений покрытия. Величины упругой деформации в точках симплекса, определённые в результате обработки экспериментальных данных по часовой ползучести, показаны в виде изолиний на симплексе (рисунок 4.8)

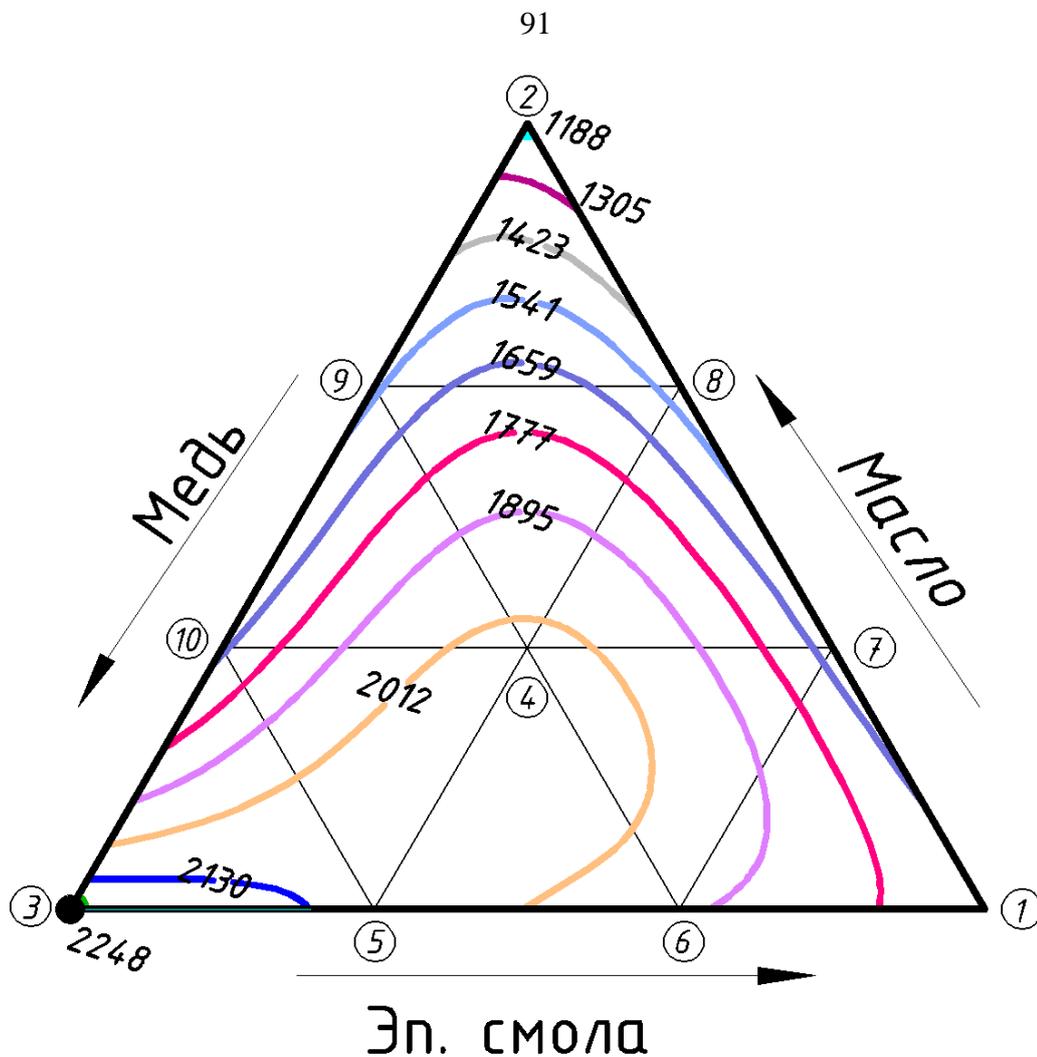


Рисунок 4.8 Зависимость модуля упругости композиционного покрытия от состава

Используя экспериментальные результаты, представленные в таблице 4.7 возможно сформировать модель, описывающую влияние состава композиционного материала покрытия на его упругие свойства. Модель имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 Y = & 1700 \cdot X_1 + 1188,2 \cdot X_2 + 2248 \cdot X_3 + 445 \cdot X_1 X_2 + 137,8 \cdot X_1 X_3 - \\
 & - 628,9 \cdot X_2 X_3 - 261 \cdot X_1^2 X_2 + 261 \cdot X_1 X_2^2 + 1,2 \cdot X_1^2 X_3 - 1,2 \cdot X_1 X_3^2 + \\
 & + 1563,9 \cdot X_2^2 X_3 - 1563,9 \cdot X_2 X_3^2 + 8862,7 \cdot X_1 X_2 X_3
 \end{aligned}
 \tag{4.5}$$

В связи с тем, что параметр E_0 из выражения типичного тела, обеспечивает жёсткость покрытия и его принятая величина локализована в окрестностях точки 3, принимаем его в качестве одного из критериев оптимальности связующего.

Таким образом, в качестве критериев оптимальности состава матричного связующего приняты его прочность, адгезия к субстрату и жёсткость. Оптимальный состав матричного связующего, исходя из принятых критериев, является следующим: эпоксидный компаунд с отвердителем – 86%; жидкий смазочный материал – 7%; порошок меди – 6%.

Такие исследуемые характеристики композиционного покрытия, как адгезионная прочность, жёсткость и деформация являются очень важными с позиции эксплуатации, но не определяющими основные триботехнические свойства покрытия. Последние, для окончательной оценки качества состава композита требуют прямых экспериментальных исследований, с учётом предыдущих данных.

4.2 Оптимизация состава композита

Особенностью многокомпонентных систем, какой является исследуемое антифрикционное композиционное полимерное покрытие, является наличие комплекса связанных положительных эксплуатационных свойств, оптимальной величине каждого из которых соответствует различный компонентный состав композита. В связи с этим встаёт вопрос о многофакторной оптимизации по целому ряду факторов. При этом, достигнуть экстремального оптимума для каждого отдельного эксплуатационного свойства не представляется возможным. Решением данного вопроса является нахождение уровня входных факторов, каждый из которых в зависимости от степени важности по-разному приближается к значению оптимума в пространстве состояний исследуемого материала.

Считаем, что наиболее важным параметром антифрикционного покрытия является его износостойкость. Поскольку, практически каждая из современных машин имеет определённый запас мощности, считаем коэффициент трения (потери на трение) вторым по важности фактором. Третьими по значимости следует считать вязкоупругие свойства, характеризующие деформацией, которая вносит определённый вклад в образование зазора трибосопряжения. Наконец,

следует отметить, что адгезионная прочность покрытия, обеспечивающая его работоспособность, судя по результатам проведённых исследований, обеспечивает необходимую адгезионную прочность и препятствует его отслоению во всём исследуемом диапазоне составов композита.

Сущность проводимой в данной работе многокритериальной оптимизации состава композита заключается в определении кратчайших расстояний от точек оптимального значения отдельных параметров до центра фигуры, вершины которой занимают эти точки. При этом пространство свойств выполнено в симплексах с одинаковой системой координат, что позволяет наложить их друг на друга для определения зоны наилучшего комплекса положительных свойств, т.е. оптимума по всем отдельно исследованным параметрам.

Далее перейдём к исследованию наиболее значимых характеристик состава покрытия. Рассмотрим влияние состава композита на его антифрикционные свойства.

Экспериментальные данные о влиянии состава антифрикционного полимерного композиционного покрытия на коэффициент трения представлены в таблице 4.8

Таблица 4.8 - Экспериментальные результаты коэффициента трения

№ п/п	Коэффициент трения									
	т. 1	т. 2	т. 3	т. 4	т. 5	т. 6	т. 7	т. 8	т. 9	т. 10
1	0,051	0,014	0,038	0,031	0,039	0,044	0,038	0,024	0,022	0,031
2	0,05	0,015	0,038	0,033	0,042	0,044	0,035	0,02	0,022	0,033
3	0,049	0,016	0,035	0, 035	0,038	0,042	0,04	0,022	0,022	0,029
Ср.	0,05	0,015	0,037	0,033	0,04	0,043	0,038	0,024	0,022	0,031

Экспериментальные результаты, представленные в таблице 4.8, дают возможность сформировать модель, описывающую влияние состава композиционного материала покрытия на коэффициент трения. Модель имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 Y = & 0,05 \cdot X_1 + 0,015 \cdot X_2 + 0,037 \cdot X_3 - 0,0068 \cdot X_1 X_2 - 0,009 \cdot X_1 X_3 + \\
 & + 0,0023 \cdot X_2 X_3 + 0,0158 \cdot X_1^2 X_2 - 0,0158 \cdot X_1 X_2^2 - 0,009 \cdot X_1^2 X_3 + \\
 & + 0,009 \cdot X_1 X_3^2 - 0,0113 \cdot X_2^2 X_3 + 0,0113 \cdot X_2 X_3^2 + 0,0135 \cdot X_1 X_2 X_3
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

Зависимости коэффициента трения композиционного покрытия от состава представлена в виде изолиний на рисунке 4.9.

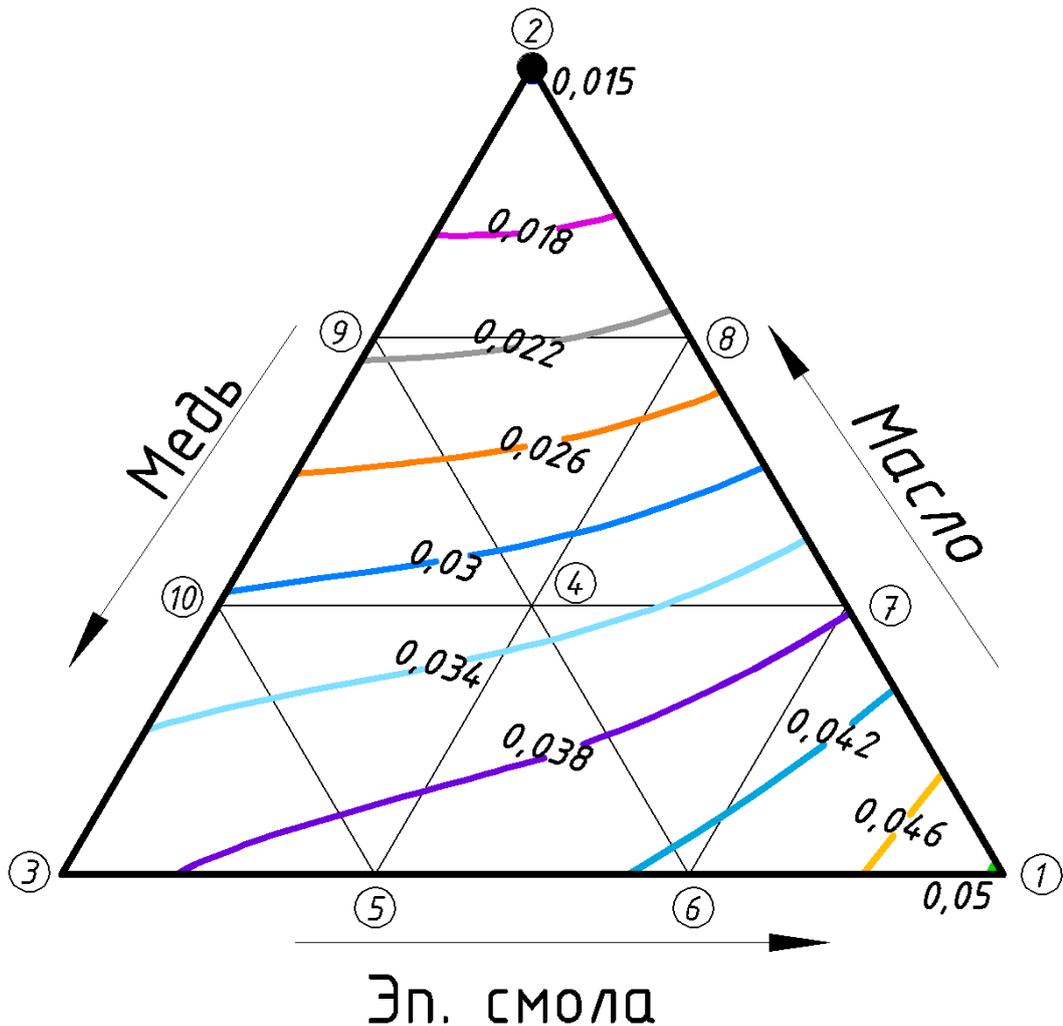


Рисунок 4.9 Зависимость коэффициента трения композиционного покрытия от состава

Анализ полученных результатов позволил установить, что минимальный коэффициент трения соответствует составу покрытия в районе точки 2. Это соответствует физическому смыслу – наличию в этой области наибольшего количества жидкого смазочного материала. Общий диапазон варьирования

коэффициентов трения в исследованной области состава композита соответствует значениям 0,015-0,050, что практически соизмеримо с коэффициентом трения при гидродинамическом режиме смазывания.

Наиболее важным параметром эксплуатационных характеристик, разработанного композиционного покрытия является величина его износа, измеренного по нормали к контактной поверхности. Это связано с тем, что износ является фактором, определяющим ресурс работы антифрикционного покрытия и всего трибоузла в целом [167]. Результаты экспериментальных исследований в десяти точках симплекс-решётчатого плана представлены в таблице 4.9. В таблице приведены результаты износа за 23 часа непрерывной работы трибосопряжения с контртелом из стали 45 в условиях следующих нагрузочно-скоростных режимов: контактные напряжения $\sigma=5$ МПа; скорость $V=0,1$ м/с.

Таблица 4.9 - Экспериментальные результаты износа покрытия

№ п/п	Износ, мм									
	т. 1	т. 2	т. 3	т. 4	т. 5	т. 6	т. 7	т. 8	т. 9	т. 10
1	0,061	0,078	0,046	0,057	0,054	0,054	0,060	0,071	0,061	0,056
2	0,060	0,078	0,045	0,059	0,050	0,053	0,060	0,069	0,061	0,054
3	0,062	0,078	0,044	0,057	0,052	0,053	0,060	0,07	0,061	0,055
Ср.	0,061	0,078	0,045	0,058	0,052	0,053	0,06	0,07	0,061	0,055

На основе экспериментальных результатов, представленных в таблице 4.9, сформируем модель, описывающую влияние состава композиционного материала покрытия на износ покрытия. Модель имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 Y = & 0,061 \cdot X_1 + 0,078 \cdot X_2 + 0,045 \cdot X_3 - 0,0214 \cdot X_1 X_2 - 0,0018 \cdot X_1 X_3 - \\
 & - 0,0162 \cdot X_2 X_3 - 0,0259 \cdot X_1^2 X_2 + 0,0259 \cdot X_1 X_2^2 - 0,0293 \cdot X_1^2 X_3 + \\
 & + 0,0293 \cdot X_1 X_3^2 - 0,0351 \cdot X_2^2 X_3 + 0,0351 \cdot X_2 X_3^2 + 0,0281 \cdot X_1 X_2 X_3
 \end{aligned} \quad (4.7)$$

Расчёты, выполненные на основе полученных результатов экспериментальных исследований, показывают, что часовой износ покрытия в зависимости от состава композита изменяется на $\approx 11\%$. Следовательно, подобным изменениям подвержен и общий ресурс покрытия. Установим зону композиционного состава покрытия, обеспечивающего минимальный износ. Она находится в районе точки 3 симплекса, представленного на рисунке 4.10.

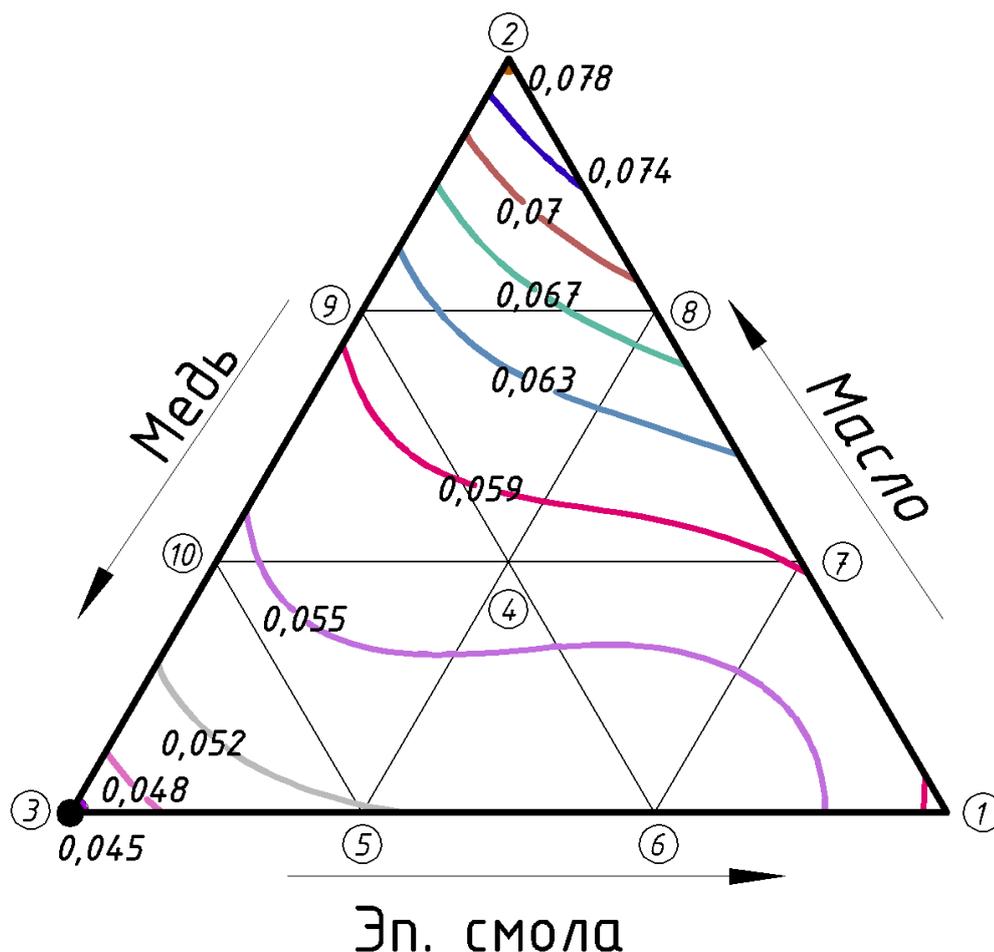


Рисунок 4.10 Зависимость износа композиционного покрытия от состава

Таким образом, установлена зона оптимальных величин основных триботехнических характеристик покрытия: коэффициента трения и величины износа. Обе они располагаются в зонах на ребре 2-3 симплекса, что значительно упрощает процесс оптимизации состава покрытия. Считаем, что величина износа является значительно более важной характеристикой трибосистемы, чем коэффициент трения. Это связано с тем, что современные машины, как правило, имеют достаточный запас мощности и незначительное увеличение коэффициента

трения (в пределах 0,015-0,037) вполне допустимо. С другой стороны, величина износа определяет ресурс покрытия. Изложенное позволяет при определении композиционного состава, характеризующего обобщённые оптимальные триботехнические свойства композита сместить оптимальную точку от центра ребра 2-3 к точке 10 симплекса. Наложение двух симплекс-решётчатых планов с выходом в виде коэффициента трения и износа представлены на рисунке 4.11.

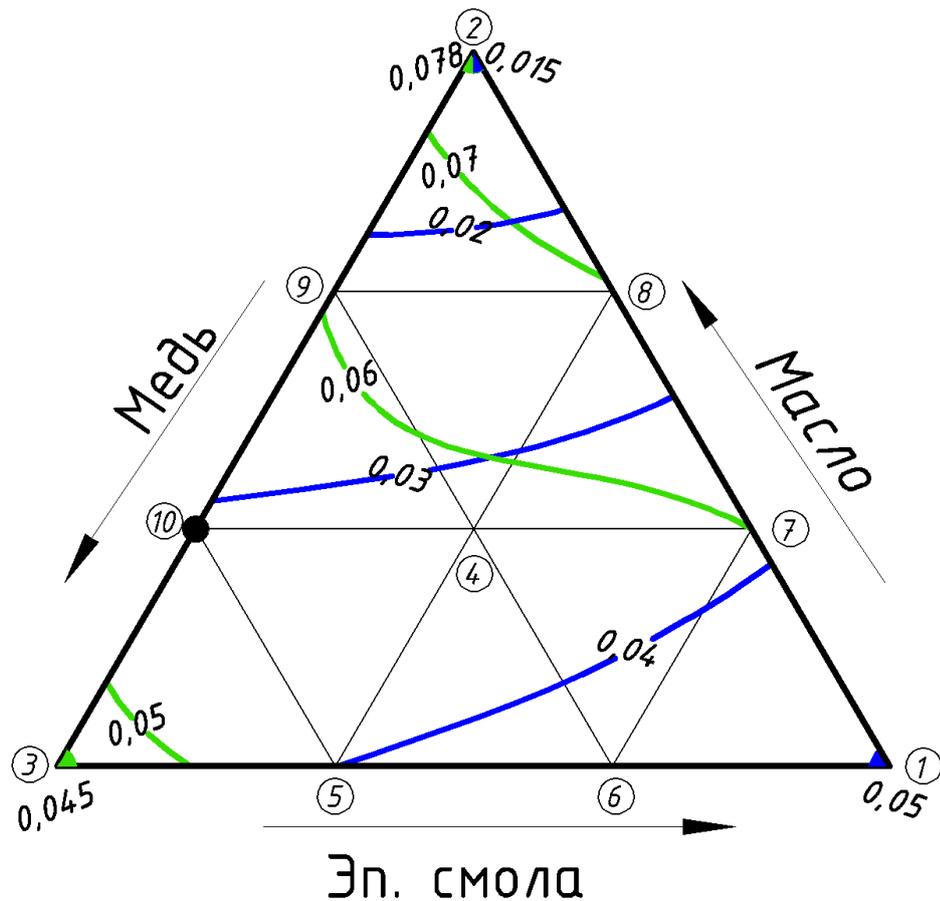


Рисунок 4.11 Наложение зависимостей износа и коэффициента трения

Композиционный состав покрытия в точке с оптимальными трибологическими свойствами должен быть уточнён в соответствии с адгезионными и вязкоупругими свойствами. Зависимость прочности на отслаивание покрытия, характеризующие его адгезионные свойства (рисунок 4.6) имеет максимум в зоне точки 3, равный 2,73 кН/м. Величина вязкоупругой деформации покрытия (ползучести) имеет минимум на ребре симплекса 1-3 в зоне точки 3. В области этой же точки наблюдается, связанная с деформацией, наибольшая величина модуля упругости композита при сжатии. Совпадения

состава композиционного покрытия с оптимумом всех перечисленных физико-механических характеристик композита позволяет считать этот состав оптимальным для данных параметров. Учитывая допустимость величины физико-механических свойств покрытия для нормальной его эксплуатации в исследованном диапазоне нагрузочно-скоростных режимов считаем, что незначительная понижение этих свойств от совмещения третьей точки симплекса с десятой, является вполне допустимым. Наличие идентичных координат у четырёх симплексов, позволяет совместить их путём наложения (рисунок 4.12).

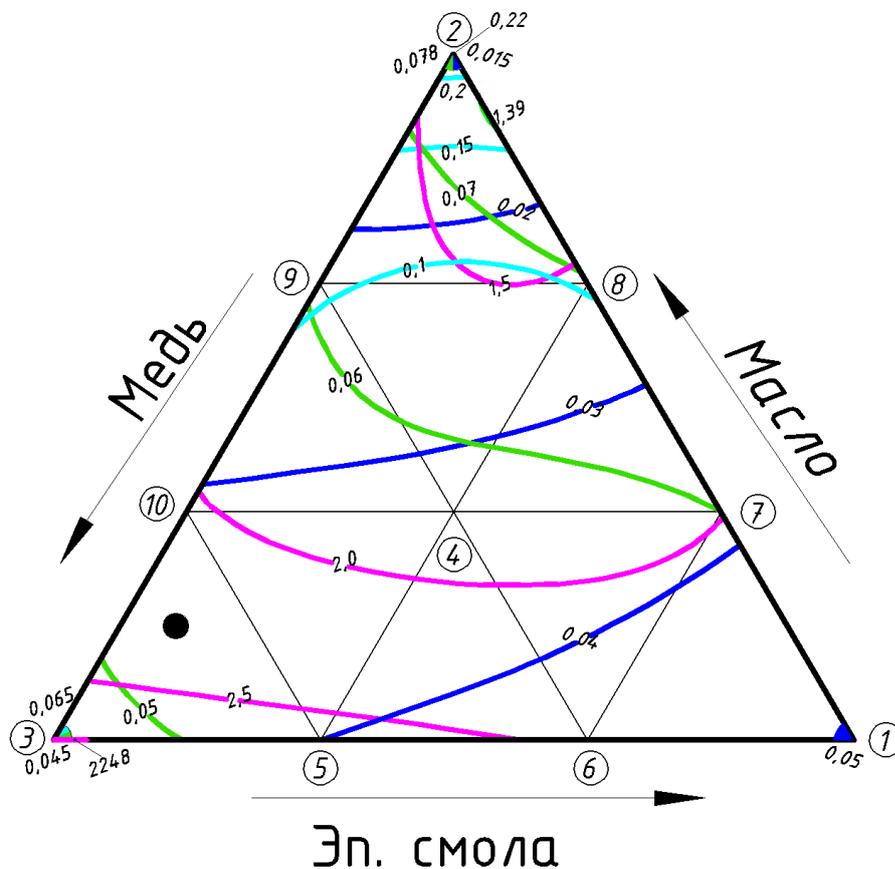


Рисунок 4.12 Наложение зависимостей износа; коэффициента трения; адгезионной прочности и вязкоупругой деформации

Окончательный выбор состава покрытия объединяет все пять принятых критериев: три по составу матричного связующего и два по триботехническим свойства. Оптимум располагается на ребре, соединяющем точки 5 и 10. Следовательно оптимальный состав антифрикционного композиционного

полимерного покрытия соответствует: эпоксидный компаунд с отвердителем – 86,4%; жидкий смазочный материал – 8%; порошок меди – 5,6%.

Таким образом, по результатам экспериментальных исследований на основе многокритериальной оптимизации установлена оптимальная область компонентного состава композита для разработанного антифрикционного самосмазывающегося покрытия. Следует отметить, что возможные отклонения состава композита в производственных условиях в пределах $\pm 5\%$ изменяют эксплуатационные свойства покрытия в допустимых пределах.

4.3 Триботехнические свойства антифрикционных покрытий

Установив оптимальный состав покрытия необходимо углублённо исследовать его триботехнические характеристики во всём диапазоне эксплуатационных режимов.

Поскольку исследованный композит является полимерным, он очень чувствителен к повышению температуры, генерируемой в процессе трения. Поэтому на первом этапе исследований определяем зависимость температуры от нагрузочно-скоростных режимов эксплуатации. В результате статистической обработки экспериментальных данных получена регрессионная модель в кодовых переменных:

$$Y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{1,2} \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (4.8)$$

где Y - выход модели;

b_i - кодовые регрессионные коэффициенты;

x_2 - кодовые переменные

Регрессионная модель в натуральных переменных:

$$Y = a_0 \cdot \sigma^{a_1} \cdot v^{a_2 + a_3 \cdot \log \sigma}, \quad (4.9)$$

где Y - выход модели;

a_i - натуральные регрессионные коэффициенты;

σ - контактные напряжения, МПа;

V - скорость, м/с.

После перехода к натуральным переменным, полученная модель зависимости температуры от режимов нагружения имеет вид:

$$T = 934,7 \cdot \sigma^{0,006} V^{1,441-0,199 \cdot \lg \sigma} \quad (4.10)$$

где σ – контактные напряжения, МПа;

V – скорость скольжения, м/с.

Модель адекватна и позволяет вести интерполяционные расчеты с максимальной погрешностью, не превышающей 4,4%.

Анализ модели показывает, что все коэффициенты уравнения регрессии значимы. Наибольшее влияние на выход модели (температуру) оказывает скорость.

Графическое представление модели приведено на рисунке 4.13.

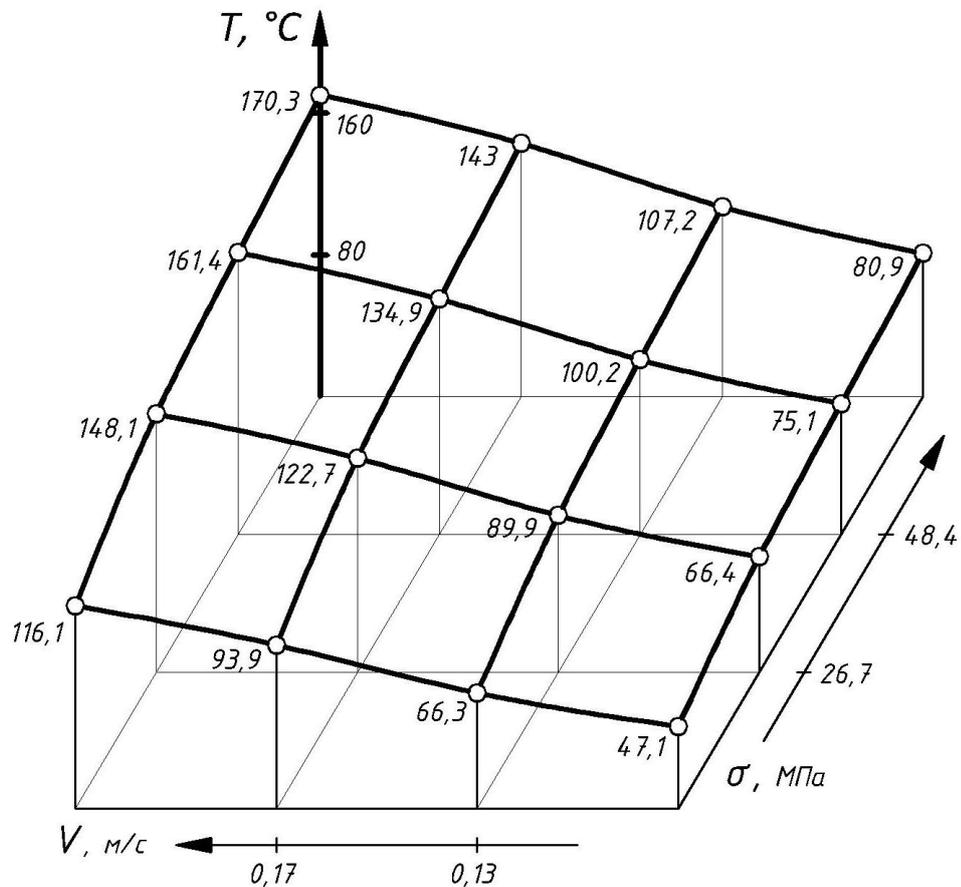


Рисунок 4.13 Зависимость температуры зоны трения от нагрузочно-скоростных режимов

График наглядно подтверждает выводы, сделанные ранее. Кроме того, влияние скорости на рост температуры, при большем значении контактных напряжений составляет 147%, а при меньших – 110,7%. Таким образом, вклад нагрузки при генерации тепла в результате трения увеличивается со снижением скорости.

Одной из основных характеристик работы исследуемой трибосистемы является коэффициент трения. На следующем этапе, в том же диапазоне изменений входных режимных параметров, устанавливалось их влияние на коэффициент трения.

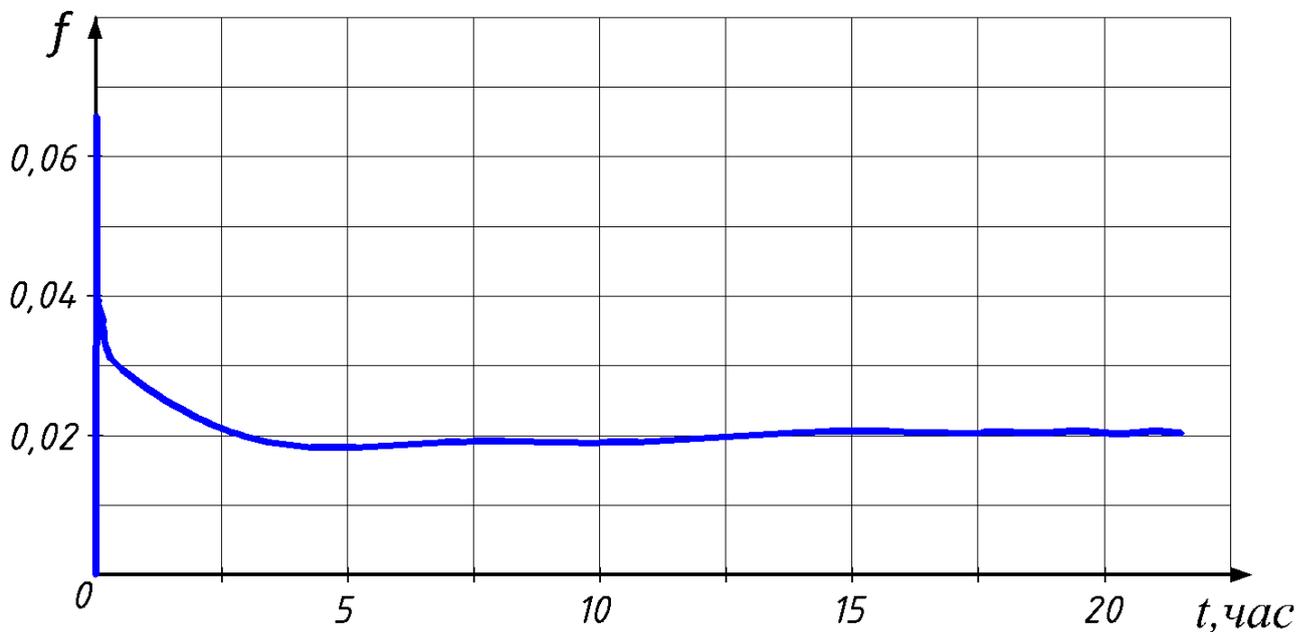


Рисунок 4.14 Зависимость коэффициента трения от времени

Модель зависимости коэффициента трения от нагрузочно-скоростных режимов имеет следующий вид:

$$f = 0,031 \sigma^{0,227} V^{0,146+0,0698 \cdot \lg \sigma} \quad (4.11)$$

Полученная для коэффициента трения регрессионная модель имеет вид аналогичный (4.10). Модель адекватна и обеспечивает погрешность не более 5%. Для повышения точности использовались входные параметры в виде десятичных

логарифмов. Как и в первом случае, в эту модель входят значимый коэффициент при смешанных взаимодействиях, что показывает суммарное влияние на коэффициент трения режимов нагружения. Графическая интерпретация модели представлена на рисунке 4.15.

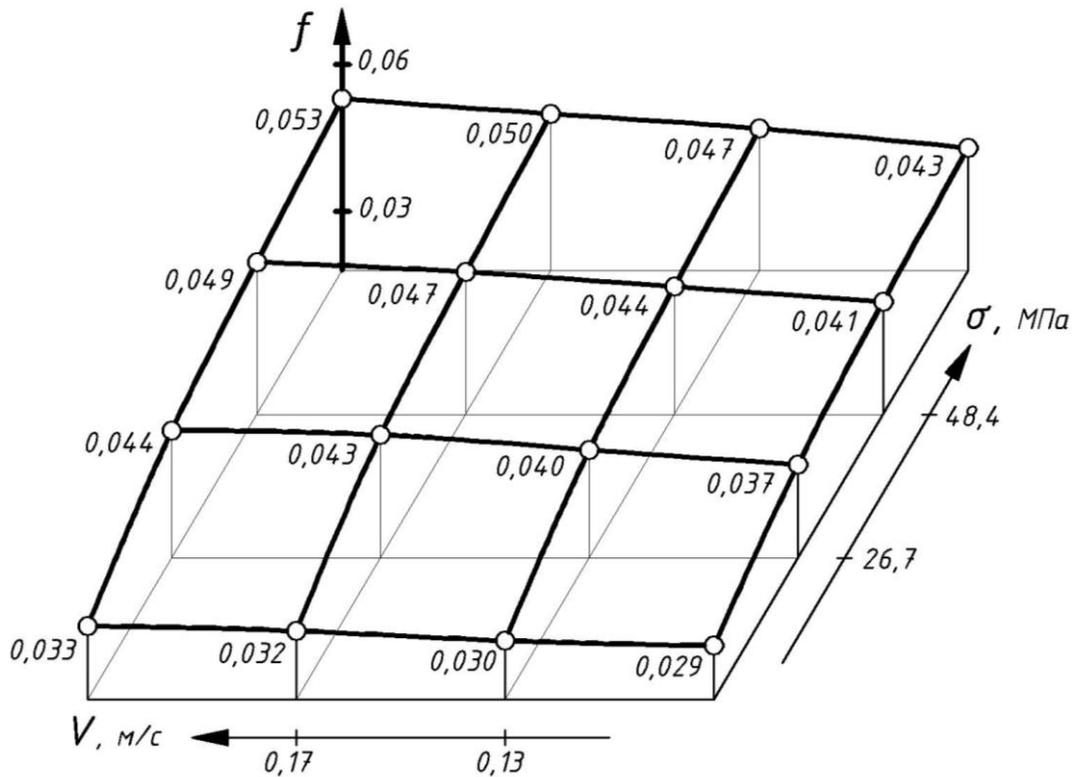


Рисунок 4.15 Влияние нагрузочно-скоростных режимов на коэффициент трения трибосистемы

Изменение коэффициента трения от контактных напряжений и скорости во всём исследованном диапазоне, составляет 82,7%. Наибольшее влияние на результаты оказывает одновременный рост скорости и контактных напряжений. Наибольшее влияние на коэффициент трения оказывает изменение скорости при значении контактных напряжений равном 70 МПа.

Заключительным и самым важным результатом является исследование влияния нагрузочных режимов на величину изнашивания покрытия за фиксированное время работы трибосистемы в стационарном периоде трения.

В качестве величины износа используется разность размеров среднего диаметра образца в исходном состоянии и после трибоиспытаний, включая приработку, равную в среднем двум часам. Полученная модель величины износа

антифрикционного покрытия в зависимости от режимов нагружения имеют следующий вид:

$$h_{\text{изн.}} = 0,118 \cdot \sigma^{0,161} V^{0,033 + 0,08 \lg \sigma} \quad (4.12)$$

Графическое представление модели выполнено по двум координатам нагрузки и скорости (рисунок 4.16).

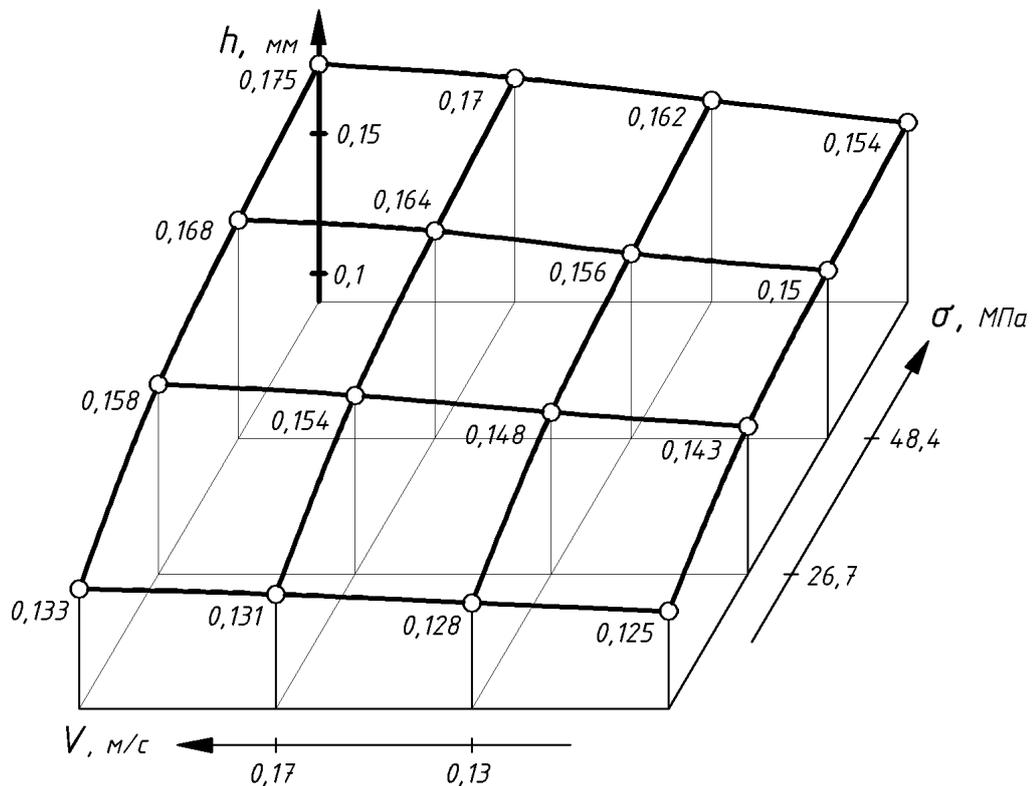


Рисунок 4.16 Влияние нагрузочно-скоростных режимов на износ антифрикционного покрытия

Данные, по которым построена приведённая модель износа является результатом ускоренных испытаний покрытий на износостойкость. Полученные величины износа являются основой служебной, промежуточной модели, позволяющей рассчитать и построить более важную зависимость - модель зависимости скорости изнашивания от режимов нагружения при работе покрытия в стационарном периоде трения.

Одним из ведущих параметров, характеризующих работу трибосистемы, является скорость стационарного изнашивания. Эта величина позволяет определить такие основные стандартные параметры трибосопряжения, как ресурс и интенсивность изнашивания. Эти величины будут установлены ниже.

По результатам экспериментальных исследований в работе определялась скорость изнашивания в стационарный период. При расчётах учитывался линейный характер процесса изнашивания, связанный с тем, что фторопласт изнашивается по адгезионному механизму (перенос на контртело и вынос из зоны трения).

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

$$V_{\text{изн.}} = 3,65 \cdot 10^{-5} \cdot \sigma^{0,118} V^{-0,026 + 0,069 \lg \sigma}, \quad (4.14)$$

Графическая интерпретация модели представлена на рисунке 4.17.

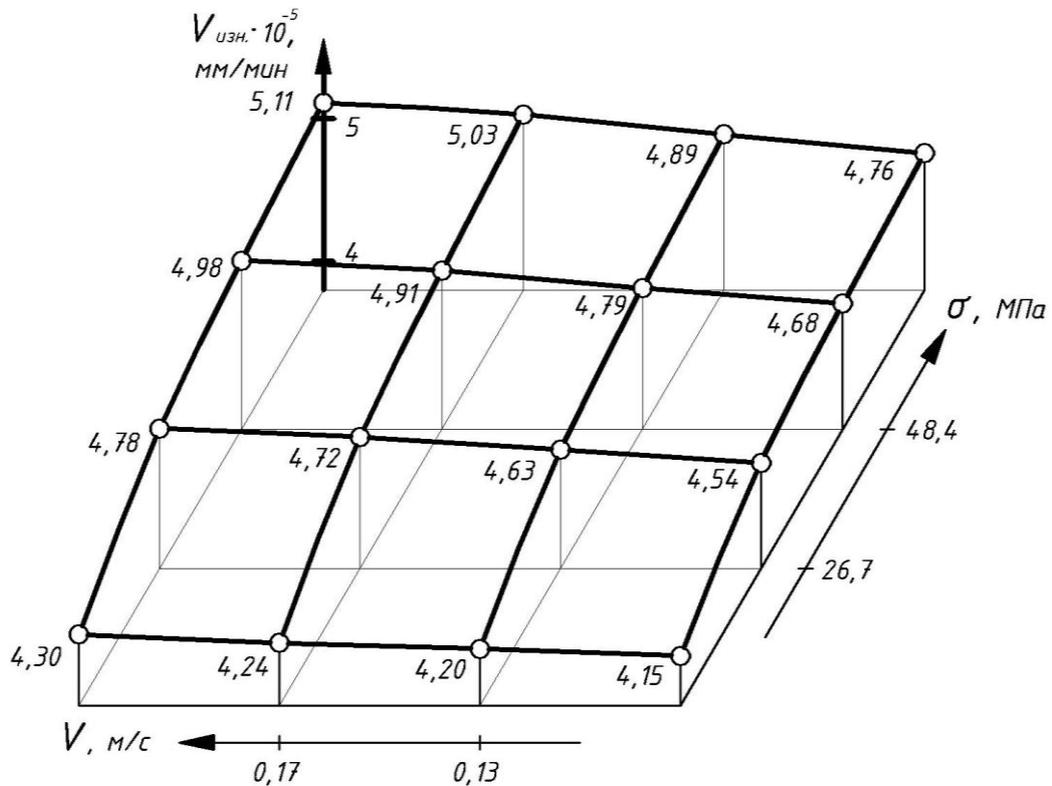


Рисунок 4.17 Влияние нагрузочно-скоростных режимов на скорость изнашивания антифрикционного полимерного покрытия

В исследованном, относительно низком скоростном диапазоне режимов, характерном для исследуемых покрытий, скорость изнашивания варьируется в пределах 25%. Причём, величина контактных напряжений влияет на процесс изнашивания интенсивнее скорости. Контактные напряжения влияют, более чем в 2 раза, интенсивнее скорости (в среднем $0,71 \cdot 10^{-5}$ мм/мин в сравнении с $0,25 \cdot 10^{-5}$ мм/мин). Физический смысл этого явления связан с относительно узким диапазоном варьирования скорости.

Итоговым обобщённым показателем эффективности работы любой трибосистемы является её ресурс.

Зависимость величины ресурса от нагрузочно-скоростных режимов представлена в виде регрессионной модели следующего вида:

$$R = 204,17 \cdot \sigma^{-0,117} V^{-0,06 - 0,06 \lg \sigma} \quad (4.16)$$

Здесь размерность ресурса приводится в часах. Полученная модель адекватна и обеспечивает погрешность интерполяционных расчётов в среднем не более 5%. Графическая зависимость модели представлена на рисунке 4.18

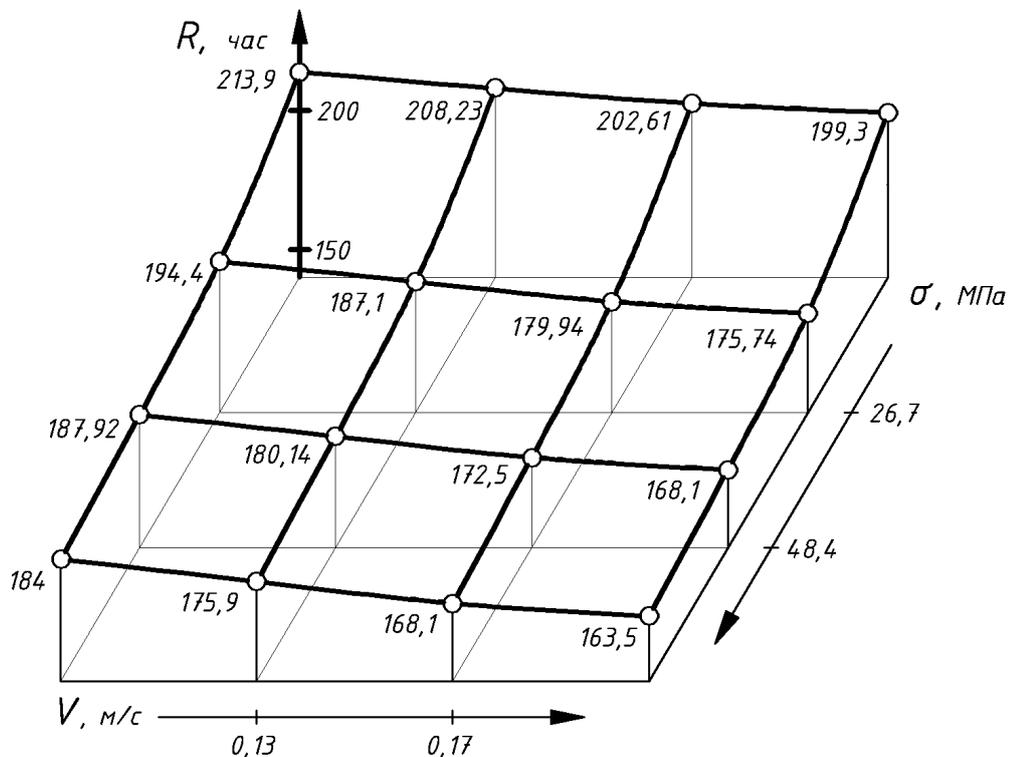


Рисунок 4.18 Влияние нагрузочно-скоростных режимов металлополимерных трибосистем с полимерным композиционным покрытием на ресурс (в часах)

Анализ модели зависимости ресурса, выраженного в часах, от нагрузочно-скоростных режимов, и графика этой зависимости показывает, что рост скорости и нагрузки снижают ресурс покрытия. Причём, при наибольшем значении скорости, влияние контактных напряжений достигает 21,9%, а при наименьшем – 16,3%. Таким образом, среднее влияние нагрузки в исследованном диапазоне скоростей составляет 19,1%.

При наибольшем значении нагрузки, влияние скорости на ресурс составляет 12,5 %, а при наименьшем – 7,3%. Следовательно, в исследованном нагрузочно-скоростном диапазоне наибольшее влияние на ресурс оказывают контактные напряжения.

Физический смысл установленного явления объясняется тем, что при относительно низких скоростях генерация тепла, через которое скорость влияет на ресурс в трибосистеме, незначительна и слабо изменяется в исследованном диапазоне температур.

Одной из важных стандартных характеристик трибосистем, включая и металлополимерные, является интенсивность изнашивания. Этот параметр удобен для сравнения исследуемой трибосистемы с другими аналогами.

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

$$I = 2,63 \cdot 10^{-8} \cdot \sigma^{0,11} V^{0,033 + 0,061g\sigma}. \quad (4.19)$$

Модель адекватна и обеспечивает погрешность не более 3 %. Графическая интерпретация модели представлена на рисунке 4.19.

Анализ полученных результатов показывает более значимое влияние на интенсивность изнашивания оказывает изменение нагрузки в сравнении со скоростью, как и в предыдущем случае.

В металлополимерных парах трения большую роль играет контактная температура, которая зависит от интенсивности отбора тепла и теплоёмкости контртел, выполненных из разных исследованных материалов. Контртела были

выполнены из материалов следующих марок: стали 45, стали ШХ15, стали 12Х18Н9Т и титанового сплав ВТ3-1.

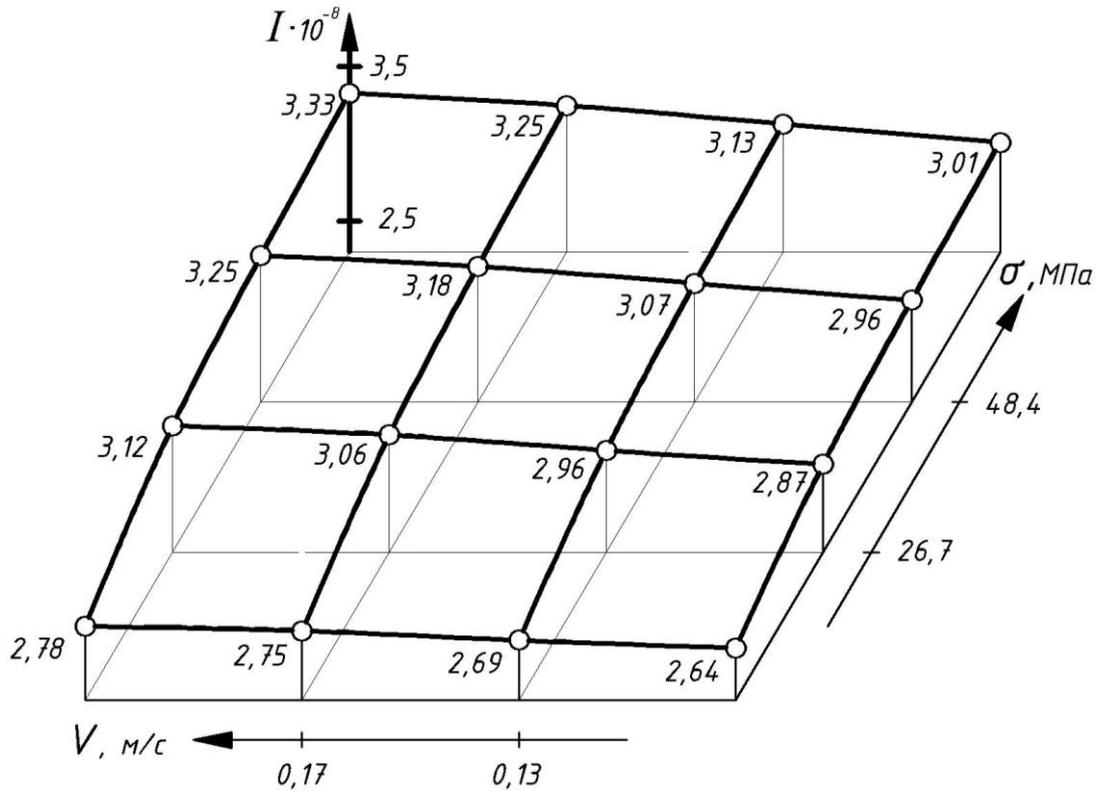


Рисунок 4.19 Графическая зависимость влияния нагрузочно-скоростных режимов на интенсивность изнашивания антифрикционного покрытия

Результаты экспериментальных исследований температур в зоне контакта приведены на рисунках 4.20, 4.21 для минимальных и максимальных значений нагрузочно-скоростных режимов.

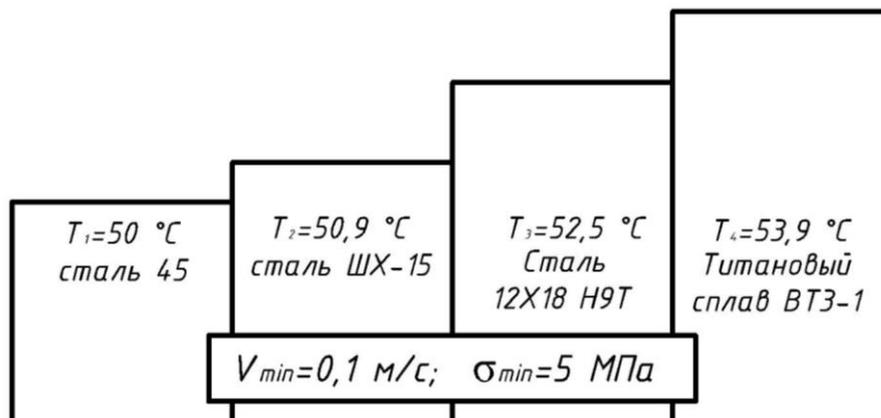


Рисунок 4.20 Влияние режимов нагружения на температуру в зоне контакта:
1 - сталь 45; 2 - сталь ШХ-15; 3 - сталь 12Х18 Н9Т; 4 - титановый сплав ВТ3-1.

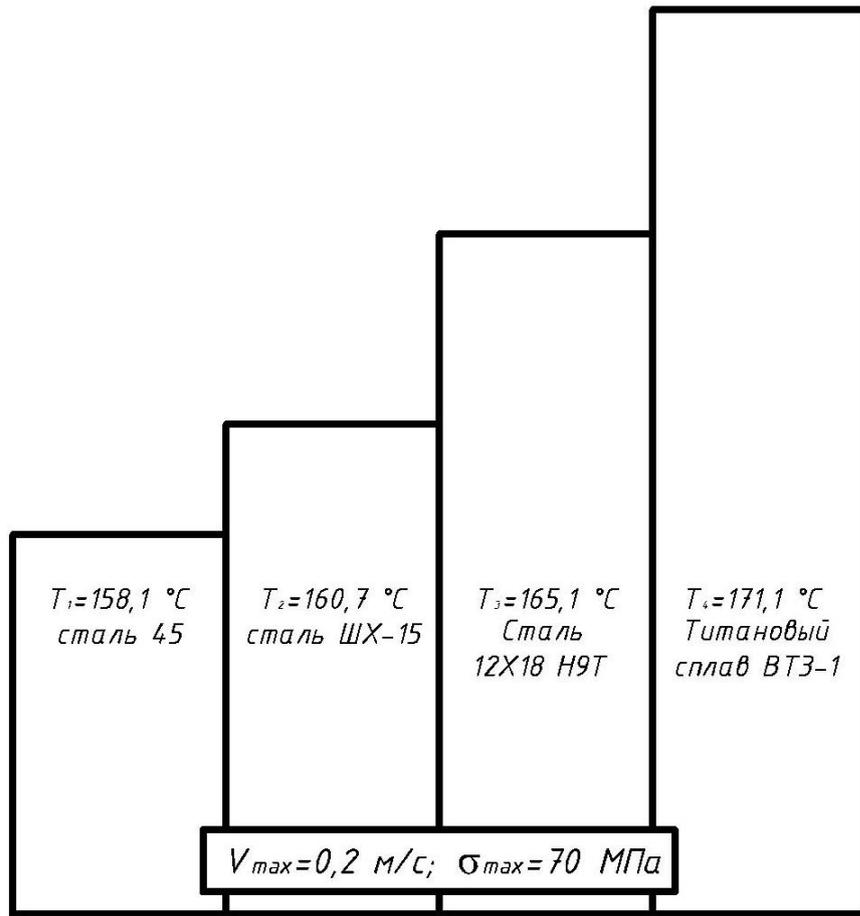


Рисунок 4.21 Влияние режимов нагружения на температуру в зоне контакта:
1 - сталь 45; 2 - сталь ШХ-15; 3 - сталь 12X18 Н9Т; 4 - титановый сплав BT3-1.

Согласно проведенным экспериментальным исследованиям наилучшие результаты с самой низкой температурой в зоне контакта, при наибольших и наименьших значениях нагрузочно-скоростных режимов получены при использовании в качестве материала контртел стали 45, а наихудшая у титанового сплава BT3 – 1. Физический смысл полученных результатов заключается в разном уровне теплофизических свойств. Наибольший уровень значений этих свойств: теплоёмкости и теплопроводности для стали 45, обеспечивает наилучший температурный режим трибосопряжения.

4.4 Определение теплофизических свойств покрытия

Общеизвестно, что одним из основных эксплуатационных недостатков полимерных материалов является их низкие теплофизические свойства. Это

потребовало специальных исследований по определению их теплопроводности, теплоёмкости. В связи с этим, вышеупомянутые параметры были экспериментально определены при помощи метода дискретной калориметрии для широкого температурного диапазона: теплоёмкость от 20 до 230°C и среднюю теплопроводность при $120 \pm 5^\circ\text{C}$.

На первом этапе определялась удельная теплоёмкость. Её зависимость от температуры приведена на рисунке 4.22.

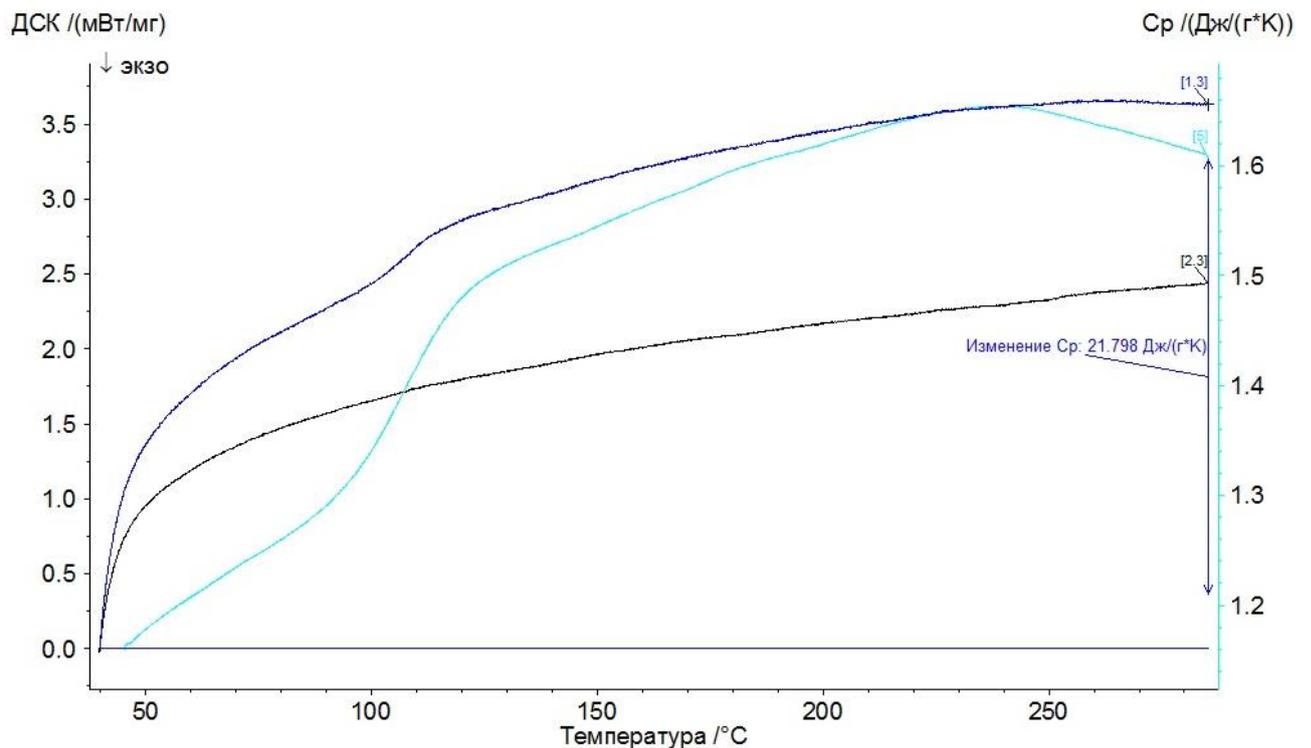


Рисунок 4.22 Зависимость теплоёмкости покрытия от температуры нагревания

На рисунке, показанном выше, синим цветом изображена зависимость теплоёмкости покрытия от температуры трибоконтакта, чёрным цветом показана зависимость теплоёмкости эталона (сапфира). Анализ полученных графиков позволяет с погрешность не более 10% оперировать при расчётах средней величиной теплоёмкости, равной в исследованном диапазоне $1,53 \text{ Дж/г}\cdot\text{К}$.

На следующем этапе исследований теплофизических параметров композита определялся коэффициент теплопроводности. Поскольку изменения этого коэффициента в исследованном температурном диапазоне незначительны,

измерения ограничились узкой зоной $100\pm 5^\circ\text{C}$. Результаты проведённых исследований приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 - Теплофизические параметры покрытия

№ п/п	Параметры	Значения
1	Теплопроводность, Вт/м·К	0,47
2	Теплоёмкость, Дж/кг·К	1530
3	Плотность, кг/м ³	1200

Поскольку теплопроводность полимерного композита на порядки меньше металлического контртела, при расчётах считаем, что основным теплоотводящим элементом является материал контртела, что доказано по результатам исследований. Таким образом, найденные экспериментально теплофизические характеристики трибосистемы позволяют с достаточной для инженерных требований точностью определять величину температуры, ограничивающую область рационального применения покрытий.

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

Полученные результаты параметров металлополимерных пар трения для средней величины исследованного диапазона нагрузочно-скоростных режимов представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 - Влияние материала контртел на триботехнические параметры металлополимерных пар трения

Материал контртела	Нагрузочно- скоростные режимы		Коэффициент трения, f	Температура $T, ^\circ\text{C}$	Скорость изнашивания. $V_{\text{изн.}} \times 10^{-5}$ мм/мин	Интенсивность изнашивания, $I \times 10^{-8}$	Ресурс $R,$ час
	$\sigma,$ МПа	$V,$ м/с					
Сталь 45	40	0,15	0,044	113,7	4,71	3,07	175,9
Сталь ШХ15			0,045	115,7	4,77	3,15	170,5
Сталь 1Х18Н9Т			0,047	120,7	4,91	3,35	163,7
Титановый сплав ВТ3-1			0,049	125,2	5,09	3,57	150,3

4.5 Выводы

1. На основе реализации симплекс-решётчатых планов получены значения оптимальных локальных характеристик: физико-механических свойств прочности матричного связующего; адгезионной прочности и вязкоупругих свойств антифрикционного полимерного композиционного покрытия, что дало возможность сформировать количественный состав компаунда для матричного материала композита.

2. Используя принципы многокритериальной оптимизации для симплекс-решётчатых планов с идентичными координатами состава композита установлена область оптимума комплекса эксплуатационных свойств, как точки с кратчайшим расстоянием до отдельных точек с наилучшими свойствами.

3 Завершающим этапом оптимизации состава композита являются триботехнические испытания полимерных покрытий в исследованном диапазоне эксплуатационных режимов, выполненные для определения таких характеристик, как износ, коэффициент трения, контактная температура.

4. Для возможности выполнения априорных тепловых расчётов контактной температуры в зоне покрытие-контртело были экспериментально определены теплофизические характеристики исследуемых композиционных покрытий.

5. ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

В данном разделе приводятся результаты, подтверждающие работу рассматриваемой трибосистемы в условиях самосмазывания, а также итоги промышленных испытаний разработанных подшипников. Основной задачей данного раздела является верификация теоретических результатов, полученных в виде конечных формул и результатов компьютерного моделирования методом конечных элементов. Кроме того, приводятся результаты промышленных испытаний на технологическом оборудовании Ростовского-на-Дону электровозоремонтного завода (РЭРЗ).

5.1 Сравнение теоретических и экспериментальных результатов

Основным фактором, определяющим предел эксплуатационных нагрузок, влияющих на работу рассматриваемых металлополимерных трибосистем для полимерных материалов, является температура. Нами был выполнен теоретический расчёт температуры в контактной зоне, полимерного композиционного покрытия с металлическим контртелом, при использовании стандартных упрощающих допущений с результатом в виде конечных формул, а также расчёты на основе компьютерного моделирования трибосопряжения методом конечных элементов. Сравнительные результаты этих расчётов с экспериментальными данными сведены в таблицу 5.1. Здесь же представлены величины нагрузочно-скоростных режимов, доверительные интервалы экспериментальных расчётов и наибольшая погрешность теоретических расчётов. Более точным представляется расчёт контактной температуры, выполненный методом конечных элементов на основе компьютерного моделирования. В среднем точность метода конечных элементов на 15 % выше. Однако, учитывая сложность и некоторую неопределённость реальных условий контактного взаимодействия для оценочных инженерных расчётов могут быть рекомендованы все использованные в данной работе методы определения контактной температуры.

Таблица 5.1 - Результаты экспериментальных исследований (материал покрытий композит с армирующим каркасом из саржи 1/3)

№ п/п	Материал контртел	Режимы нагружения		Температура, T, °C			Ср. погрешность, %
		Контактные напряжения σ , МПа	Скорость скольжения V, м/с	Эксперимент (T _э , ±Δ) °C	Расчёт T _{р1} , °C	Комп. модел. T, °C	
1	сталь 45	5	0,1	50	51,3	48,6	8,2
		70	0,1	82,5	90,4	79,9	
		5	0,2	125,7	137,9	122,4	
		70	0,2	158,1	161,6	157,1	
2	сталь ШХ-15	5	0,1	50,9	50,7	49,5	
		70	0,1	83,9	93,3	80,5	
		5	0,2	127,9	140,7	125,5	
		70	0,2	160,7	164,7	159,7	
3	сталь 12X18 Н9Т	5	0,1	52,5	57,7	49,8	
		70	0,1	87,5	97,4	81,4	
		5	0,2	133,1	143,7	126,9	
		70	0,2	165,1	170,3	162,2	
4	Тит. сплав ВТЗ-1	5	0,1	53,9	65,7	51,9	
		70	0,1	91,6	107,2	83,5	
		5	0,2	138,3	152,2	131,7	
		70	0,2	171,1	180	169,4	

Анализ табличных данных показывает, что в рассматриваемой трибосистеме при исследованных режимах нагружения и составе контактирующих материалов наблюдается устойчивый режим самосмазывания фторопластом (ПТФЭ). По результатам экспериментальных данных, теоретических расчётов и компьютерного моделирования видно, что сталь 45 и сталь ШХ-15 показали наилучшие результаты. Это объясняется тем, что они обладают лучшими теплофизическими характеристиками, чем сталь 12X18 Н9Т и титановый сплав ВТЗ-1. Температура в зоне контакта исследуемого диапазона нагрузок, скоростей и всех контактирующих материалов не достигает температуры, при которой происходит деструкция полимерного композиционного покрытия. Отклонение расчётных данных от экспериментальных не превышает 10%, что подтверждает устойчивый режим работы покрытия при самосмазывании фторопластом.

5.2 Промышленные испытания

Промышленные испытания универсальных (радиально-упорных) подшипников скольжения с полимерными композиционными покрытиями проводились в условиях Ростовского-на-Дону электровозремонтного завода (РЭРЗ).

Технологическим объектом, на котором устанавливались подшипники, являлся специальный бандажировочный станок для нанесения изоляционной ленты на якорь тягового электродвигателя. Общий вид бандажировочного станка А591 представлен на рисунке 5.1.



Рисунок 5.1 Общий вид бандажировочного станка А591

Нанесение изоляционной ленты происходит путём её намотки на вал якоря тягового электродвигателя при помощи подающего механизма, который находится на подвижной части станка. В момент намотки, создаётся усилие

натяжки ленты, при помощи роликового механизма, что в свою очередь создает поперечную силу. Вал якоря вращается в роликовых подшипниках с частотой вращения 15-30 об\мин. В процессе промышленных испытаний штатные подшипники были заменены на радиально-упорные подшипники скольжения с разработанным антифрикционным покрытием. Установка подшипников осуществлялась на двух опорах намоточного вала бандажировочного станка, которые показаны на рисунке 5.2.



а)



б)

Рисунок 5.2. Передняя (а) и задняя (б) бабки бандажировочного станка

Потребность в обеспечении постоянства выполнения технологического процесса обязывает иметь не менее 3-х бандажировочных станков. По этой причине вывод их из технологического процесса, с целью выполнения работ по обслуживанию станка или ремонту, является крайне нежелательным. В связи с этим, для увеличения срока эксплуатации и минимизации времени простоя бандажировочных станков, необходимости повышать износостойкость и эффективность описываемых трибосистем.

Установленные подшипники скольжения с антифрикционным композиционным покрытием, выполнялись с наружным кольцом, полностью соответствующим размерам штатных подшипников.

В качестве материала для изготовления контртел приняты сталь 45 и сталь ШХ-15, в связи с тем, что на этапе экспериментальных исследований они показали наилучшие результаты.

В ходе проведения промышленных испытаний контрольная разборка подшипниковых узлов после месячной эксплуатации показала, что рабочая поверхность полимерного покрытия имеет сглаженную композиционную структуру без каких-либо следов нарушения целостности или отслоения. Расчет ресурса экспериментальных подшипников, выполненный после разборки, по величине износа показал, что их ресурс превышает штатные подшипники на 22 – 23,5%. В настоящее время испытания продолжаются.

Таким образом, результаты промышленных испытаний разработанной трибосистемы с антифрикционным полимерным композиционным покрытием оцениваются удовлетворительно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации полностью решена поставленная научно-техническая задача. Она состоит в разработке фторопластсодержащих антифрикционных покрытий повышенной технологичности, обеспечивающих возможность их нанесения на крупногабаритные детали трибосистем без термообработки. Это достигается использованием в качестве матричного связующего и адгезива, для фиксации покрытия, материала холодного отверждения на основе эпоксидной смолы. Разработанный композит обеспечивает требуемый уровень нагрузочно-скоростных режимов.

По результатам исследований могут быть сформулированы следующие выводы.

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

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

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

4. Полученные частные критерии оптимальности полимерного композиционного покрытия (коэффициент трения, величина нормального износа, адгезионная прочность и ползучесть), в результате совмещения

отдельных симплексов и ранжирования выхода, позволили установить оптимальный состав антифрикционного композита.

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

6. В результате статистической обработки итогов экспериментальных исследований, проведённых по полнофакторным планам типа ПФЭ², были получены интерполяционные регрессионные модели, позволяющие рассчитать величину триботехнических характеристик антифрикционных покрытий в диапазоне нагрузок 5-70 МПа, и скоростей 0,1-0,2 м/с.

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

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

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дроздов Ю.Н. Трение и износ в экстремальных условиях : справочник / Ю. Н. Дроздов, В. Г. Павлов, В. Н. Пучков ; ред. Т. Н. Лебедева. - Машиностроение, 1986. - 224 с. : рис., табл. - (Основы проектирования машин).
2. Крагельский И.В. Трение и износ / И.В. Крагельский. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Машиностроение, 1968. - 480 с. : ил.
3. Трение, изнашивание и смазка : справочник в 2-х кн. Кн. 1 / Ред. И.В. Крагельский, Ред. В.В. Алисин. - М. : Машиностроение, 1978. - 399 с.
4. Arkles B., Geracaris S., Goudhue R. Wear Characteristics of Fluoro-polymer Composites // Adv. Polym. Frict. and Wear. Part 2.-N.Y. - Lond., 1974. - P. 663-688.
5. Трение и износ материалов на основе полимеров / В.А. Белый, А.И. Свириденко, Н.И. Петраковец и др. - Минск: Наука и техника, 1976. - 431 с.
6. Кохановский В.А. Антифрикционные полимерные композиты для тяжело нагруженных пар трения : дис. докт. техн. наук / В.А. Кохановский. - Ростов н/Д: ДГТУ, 1995. - 352 с.
7. Кохановский В.А. Несущая способность покрытий из антифрикционных самосмазывающихся волоконитов при статических нагрузках / В.А. Кохановский // Известия СКНЦ ВШ: Сер. Техн. науки. - 1987. - № 2. - С. 69-72.
8. 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.
9. Истомин Н.П. Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе фторполимеров / Н.П. Истомин, А.П. Семенов. - М.: Наука, 1984. - 147 с.
10. Колесников В.И. Транспортная триботехника (трение и износ материалов) : учеб. пособие. Т. I / В.И. Колесников, В.В. Шаповалов, В.А. Кохановский ; РГУПС. - Ростов н/Д : [б. и.], 2006. - 476 с. : ил., прил., табл.

11. Металлополимерные материалы и изделия / В.А. Белый, М.И. Егренков, Л.С. Корецкий и др. ; под ред. В.А. Белого. - М.: Химия, 1979. - 312 с.
12. Применение антифрикционных органолокнитов в направляющих / Г.П. Барчан, В.А. Кохановский, К.В. Осипов и др. // Трение и износ в машинах : тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Челябинск: УДНТП, 1979. - С. 67-68.
13. Триботехнические возможности крупногабаритных подшипников с покрытием на основе волокон ПТФЭ / А.С. Кужаров, В.Г. Рядченко, В.О. Гречко и др. // Трение и износ. - 1986. - Т. 7. - № 1. - С. 123-128.
14. Полимерные композиционные материалы в триботехнике / Ю.К. Машков, З.Н. Овчаров, М.Ю. Байбарацкая, О.А. Мамаев. - М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. - 262 с.
15. Композиционные материалы на основе плитетрафторэтилена. Структурная модификация / Ю.К. Машков, З.Н. Овчаров, В.И. Суриков, Л.Ф. Калистратова. - М.: Машиностроение, 2005. - 240 с.
16. Мышкин Н.К. Трибология. Принципы и приложения / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. - Гомель: ИММС НАНБ, 2002. - 310 с.
17. Мэтью Ф. Композитные материалы. Механика и технология : пер с англ. / Ф. Мэтью, Р. Роулингс. - М.: Техносфера, 2003. - 408 с.
18. Шаповалов В.В. Триботехника / В.В. Шаповалов, В.А. Кохановский, А.Ч. Эркенов ; под ред. В.В. Шаповалова. - Ростов н/Д: Феникс, 2017. - 348, [3] с.: ил. - (Высшее образование).
19. Гаркунов Д.Н. Триботехника / Д.Н. Гаркунов. - М.: Машиностроение, 1985. - 424 с.
20. Горюнов Ю.В. Эффект Ребиндера / Ю.В. Горюнов, И.И. Агулов, Н.В. Перцев и др. - М.: Наука, 1966. - 128 с.
21. Зимон А.Д. Адгезия жидкости и смачивание / А.Д. Зимон. - М.: Химия, 1974. - 413 с.
22. Кохановский В.А. Антифрикционные полимерные композиты для тяжело нагруженных пар трения : автореф. дис. докт. техн. наук 05.02.04 / В.А. Кохановский. - Ростов н/Д: ДГТУ, 1995. - 30 с.

23. Gleitlager aus Fasermaterial // Production. - 1971. - Bd. 10. - № 5. - S. 65-68.
24. Pat. 4.108.381 USA. Rocket nozzle bearing seal / P.C. Sottosanti, W.H. Baker, W.T. Dolling (USA) ; Thiokol Corporation (USA). - № 803487 ; filed. 06.06.77 ; publ. 22.08.78 ; HKU 308-238. - 5 p.
25. The plain bearing: Handbook / Lear-Siegler Inc. - Santa Ana, California, 1976. - 39 p.
26. Кохановский В.А. Соотношение зазоров в шарнирных подшипниках / В.А. Кохановский, Л.В. Красниченко // Безызносность : межвуз. сб. науч. тр. - Ростов н/Д: РИСХМ. - 1990. - С. 95-101.
27. Ina Elges. Gelenklager, Gelenkkopfe. Makatalog K227D // Ausgabe Juli, 1980. - 103 s.
28. Aeronautical catalogue. Les applications du roulement / Aeronautical Division, ADR. - Ivry-sur-Seine, 1976. - 133 p.
29. Die wartungsfrein Gelenklager mit den zwei roten Schutzringen / Katalog HUNGER DFE. - Sciten, 1981. - November. - 46 s.
30. The plain bearing: Handbook / Lear-Siegler Inc. - Santa Ana, California, 1976. - 39 p.
31. Gleitlager aus Fasermaterial // Production. - 1971. - Bd.10. - № 5. - S. 65-68.
32. Variable speed drives // Electronical Designe. - 1962. - Vol. 6. - № 7. - P. 33.
33. Старостипецкий Ю.А. Самосмазывающиеся покрытия опор скольжения / Ю.А. Старостипецкий, С.В. Степанович // Станки и инструменты. - 1986. - № 8. - С. 16-17.
34. Pat. 3.950.599 USA, MK F16C 27/00, B32b 27/02. Bearing with low-friction laminate liner / D.A. Board (USA) ; Ball bearings Inc. (USA). - 1444340 ; filed 21.02.74 ; publ .13.04.76 ; HKU 428-236. - 6 p.
35. Evans D.C. Self-lubricating bearing // Industrial Lubrication and Tribology. - 1981. - № 33. - P. 132-138.

36. *Plastics // Machin Designe.* - 1976.- № 3. - P. 118.
37. *Die wartungsfreie Gelenklager mit den zwei roten Schutzringen // Katalog HUNGER DFE.* - Sciten, 1981. - November. - 46 s.
38. *The plain bearing: Handbook / Lear-Siegler Inc.* - Santa Ana, California, 1976. - 39 p.
39. *Evans D.C. Senior G.S. Self-Lubricating materials for plain bearings // Tribology International.* - 1982. - V. 15.-15. - P. 243-248.
40. *Gleitlager aus Fasermaterial // Production.* - 1971. - Bd. 10.-15.-S.65-68.
41. *Harris B. More for less from teflon fabric bearings // Machine Design.* - 1977. - V. 49. -16. - P. 88-91.
42. *Ina Elges. Gelenklager, Gelenkköpfe. Makatalog K227D // Ausgabe Juli, 1980.* - 103 s.
43. *Aeronautical catalogue. Les applications du roulement / Aeronautical Division, ADR.* - Ivry-sur-Seine, 1976. - 133 p.
44. *Reinert H. Das Auslegen von Lagerschalen mit Gewebe aus selbstschmierenden kunststoff-Fasern // Industriemeister.* - 1965. - Bd. 14. - 15. - S.114-115.
45. *Teflon lubricates bearings // Iron age Metalwerkung International.* - 1964. - V. 3. - 17. - P.21.
46. *Neale M.J. Selection of bearing // The Inst. of Mech. Engineers Proceeding.* - 1967-68. - V. 182. - Part. 3A; Lubrication and wear: Fundamentals and application to design. - P. 547-556.
47. *Tschacher M., Gubitz F. PTFE in Maschinenbau // Werkstatt und Betrieb.* - 1968. - Bd. 101. - 112. - S.717-725.
48. *Welz H.U. Eigenschaften von PTFE-kompositionen und deren Anwendungsmöglichkeiten beim verschleißschutz // Schmierungstechnik.* - 1982. - Bd. 13. - 16. - S. 179-182.
49. *Gleitlager aus Teflongewebe // Ingenieur Digest.* - 1973. - Bd.12.-16. - S. 94.
50. *Pat. 3.000.076 USA. Loom picker and bearing / L.A. Runton, H.C. Morton*

(USA) ; The Russell Manufacturing Company (USA). - 1700,797 ; filed 05.12.57 ; publ. 19.09.61 ; HKU 308-238. - 5 p.

51. Композиционные материалы для узлов трения подвижного состава на основе технических тканей и их триботехнические характеристики / В.И. Колесников, А.П. Сычев, В.Н. Кравченко, Б.М. Флек // Труды Южного научного центра Российской академии наук / ред. Г.Г. Матишов. - Ростов н/Д : Изд-во ЮНЦ РАН, 2007. - Т. 2: Физика. Механика. Техника. - С. 9-20. - Библиогр.

52. 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. Edited by Klaus Friedrich. - P. 363-396.

53. Кноп А. Фенольные смолы и материалы на их основе / А. Кноп, В. Шейб ; под ред. Ф.А. Шутова ; пер. с англ. - М.: Химия, 1983. - 280 с., ил.

54. Кочнова З.А. Эпоксидные смолы и отвердители: промышленные продукты / З.А. Кочнова, Е.С. Жаворонок, А.Е. Чалых. - Москва, 2006. - 200 с.

55. Крагельский И.В. Основы расчётов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добрынин, В.С. Комбалов. - М., Машиностроение, 1977. - 526 с.

56. Основы трибологии (трение, износ, смазка) : учеб. для втузов / ред. А.В. Чичинадзе. - 2-е изд. перераб. и доп. - М. : Машиностроение, 2001. - 663 с.

57. Виноградов В.Н. Абразивное изнашивание / В.Н. Виноградов, Г.М. Сорокин, М.Г. Колокольников. - М.: Машиностроение, 1990. - 224 с.: ил.

58. Демкин Н.В. Контактное шероховатых поверхностей / Н.В. Демкин. - М.: Наука, 1970. - 228 с.

59. Демкин Н.В. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.В. Демкин, Э.В. Рыжов. - М.: Машиностроение, 1981. - 244 с.

60. Комбалов В.С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ / В.С. Комбалов. - М.: Наука, 1974. - 111 с

61. Контртела в трибосистемах с фторопластсодержащим покрытием /

В.А. Кохановский, Ю.А. Петров, М.А. Мукутадзе, М.Х. Сергеева / Вестник ДГТУ. - 2007. - Т. 7, № 2(33). - С. 177-181.

62. Кохановский В.А. Структура и свойства антифрикционных волокнитов / В.А. Кохановский // Безыносность : сб. науч. тр. - Ростов н/Д: РИСХМ, 1992. - Вып. 2. - С. 132-137.

63. Кохановский В.А. Физико-механические параметры покрытий из антифрикционных самосмазывающихся волокнитов / В.А. Кохановский // Прогрессивные полимерные материалы, технология их переработки и применение : тез. докл. науч.-техн. конф., 13-15 сентября 1988 г., г. Таганрог / ДНТП. - [Таганрог], 1988. - С. 32-33.

64. Гуняев Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов / Г.М. Гуняев. - М.: Химия, 1981. - 320 с.

65. Фторопласты : каталог. - Черкассы: НИИТЭХИМ, 1983. - 210 с.

66. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям / Э. Камке. - М.: Наука, 1974. - 575 с.

67. Фторполимеры / под ред. П.А. Уоло. - М.: Мир, 1975. - 448 с.

68. Цалагава З.С. Свойства и применение фторуглеродных пластиков / З.С. Цалагава. - Л.: Химия, 1967. - 94 с.

69. Исследование триботехнических свойств различных текстильных структур на основе волокнистого политетрафторэтилена / А.С. Кужаров, В.Г. Рядченко, В.О. Гречко и др. // Трение и износ. - 1986. - Т. 7, № 5. - С. 945-950.

70. Производство и применение термо- и жаростойких волокон в СССР и за рубежом : Сер. Обзоры по отдельным производствам химической промышленности. - М.: НИИТЭХИМ, 1972. - Вып. 19. - 83с.

71. Современные композиционные материалы / под ред. Д. Браутмана, Р. Крока. - М.: Мир, 1970. - 672 с.

72. Кутьков А.А. Исследование механизма трения меднофторопластового композита / А.А. Кутьков, В.О. Гречко, А.С. Кужаров // Трение и износ. - - 1980. - Т. 1, № 6. - С. 993-999.

73. Артамонов В.Н. Ю.Н. Исследование трибологических характеристик

сферических шарнирных подшипников / В.Н. Артамонов, Ю.Н. Дроздов // *Машиноведение*. - 1987. - № 2. - С. 31-36.

74. Кужаров А.С. Композиционные антифрикционные покрытия на основе волокон политетрафторэтилена / А.С. Кужаров, В.Г. Рядченко // *Безызносность : межвуз. сб. науч. тр.* - Ростов н/Д: РИСХМ, 1992. - Вып. 2. - С. 149-147.

75. Рядченко В.Г. Структура и свойства износостойких покрытий тяжело-нагруженных подшипников на основе волокон политетрафторэтилена и комплексных соединений меди : дис. канд. техн. наук / В.Г. Рядченко. - Новочеркасск, 1988. - 167 с.

76. Pat. 2.531.158 Deuts., МК F16C 33/20. Werkstoff zur Herstellung einer Trock-en-gleitlagerflache / SKF Compagnie d applications Mecaniques (Frank). - ¹P2531158.4; Anmeld. 11.07.75 ; Veroff. 22.01.76. - 9 s.

77. Pat. 2.983.562 USA. Oilless non-Corrosive bearing / L.A. Runton, H.C. Morton (USA) ; The Russell Manufacturing Company (USA). - ¹732,302 ; filed 01.05.58 ; publ. 09.05.61 ; HKU 308-238. - 3 p.

78. Pat. 3.053.592 USA. Antifriction bearing / L.A. Runton, H.C. Morton, L.J. Ras-ero (USA) ; The Russell Manufacturing Company (USA). - ¹10,687 ; filed.24.02.60 ; publ.11.09.62 ; HKU 308-238. - 3 p.

79. Pat. 3.110.530 USA. Self-lubricating bearing / L.A. Runton, L.J. Rasero (USA). - ¹166,649 ; filed.16.01.62 ; publ.12.11.63 ; HKU 308-238. - 4 p.

80. Pat. 3.250.556 USA. Ball joint and sleeve means / H.J. Couch, R.E. Geller (USA). - ¹164,098 ; filed.03.06.62 ; publ. 10.05.66 ; HKU 237-90. - 8 p.

81. Pat. 3.458.223 USA. МК F16C 11/06, 33/00. Low friction bearing assembly / C.S. White (USA). - ¹343677 ; filed.10.02.64 ; publ.29.07.69 ; HKU 287-87. - 5 p.

82 . Кардашов Д.А. Конструкционные клеи / Д.А. Кардашов. - М.: Химия, 1980. - 288 с.

83. Кардашов Д.А. Применение клеев в самолетостроении / Д.А. Кардашов // *Вестник машиностроения*. - 1978. - № 5. - С. 50-53.

84. Arkles B., Geracaris S., Goudhue R. Wear Characteristics of Fluoropolymer Composites // Adv. Polym. Frict. and Wear. Part 2.-N.Y.-Lond., 1974. - P. 663-688.

85. Die wartungsfreie Gelenklager mit den zwei roten Schutzringen // Katalog HUNGER DFE. - Sciten, 1981. - November. - 46 s.

86. Озябкин А.Л. Выбор рациональной клеевой композиции для предотвращения развития фреттинг-коррозии в подшипниковых узлах / А.Л. Озябкин, Б.Н. Корниенко // Транспорт-2006 : тр. Всерос. науч.-практ. конф., май 2006 г. : в 3-х ч. / РГУПС. - Ростов н/Д, 2006. - Ч. 2. - С. 38-40.

87. Погосян А.К. Трение и износ наполненных полимерных материалов / А.К. Погосян. - М.: Наука, 1977. - 138 с.

88. Cemal Basaran. Experimental Damage Mechanics of Microelectronics Solder Joints under Concurrent Vibration and Thermal Loading / Cemal Basaran, A. Cartwright, Ying Zhao // International Journal of Damage Mechanics. - 2001. - Vol. 10. - P. 153-170.

89. Арутюнян Н.Х. Контактная задача теории ползучести / Н.Х. Арутюнян, А.В. Манжиров. - Ереван: НАН, 1999. - 318 с.

90. Бартнев Г.М. Трение и износ полимеров / Г.М. Бартнев, В.В. Лаврентьев. - Л.: Химия, 1972. - 237 с.

91. Танака К. Износ композиционных полимерных материалов / К. Танака // Сэньи гаккайси. - 1975. - Т. 31, № 8. - С. 10-17. (Перевод Ц-80457).

92. Степанов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний / М.Н. Степанов. - М.: Машиностроение, 1985. - 232 с.

93. Исследование кинетики образования пленки фрикционного переноса антифрикционного самосмазывающегося композита на основе волокон политетрафторэтилена (ПТФЭ) методом радиоэлектронной спектроскопии / В.И. Колесников, В.Н. Кравченко, А.Т. Козаков и др. // Динамика и прочность подвижного состава : межвуз. темат. сб. тр. / ред. Г.С. Фроянц ; РИИЖТ. - Ростов н/Д, 1986. - Вып. 185. - С. 75-80.

94. Ghorieshi J. Temperature Measurement at the Polymer-Metal Contact / J.

Ghorieshi // Proceedings of the ASEE Annual Conference, New England, USA. - 6 p.

95. Pat. 2.027.559 USA Bushing / O.S. Bearing Company (USA). - № 513,483 ; filed. 05.02.31 ; publ. 14.01.36 ; HKU 308-238. - 3 p.

96. Pat. 2.128.087 USA. Self-lubricating bearing / T.L. Gatke (USA). - № 84, 423 ; filed. 10.06.36 ; publ. 23.08.38 ; HKU 308-238. - 5 p.

97. Pat. 1.311.847 Brit., MK F16C 33/18. Fibre bearings / R. Oliver, B.E. Lloyd, B.J. Marsh, M. Abrahams, D.R. Slater. - № 18185/69 ; filed. 08.04.64 ; publ. 28.03.73. - 5 p.

98. Pat. 3.932.008 USA, MK F16C 17/00. Bearing having a self-lubricating liner and method of making / A.R. McCloskey, G.T. Williams (USA) ; Rockwell International corporation (USA). - № 531524 ; filed. 11.12.74 ; publ. 13.01.76 ; HKU 308-238, 308-240. - 6 p.

99. Pat. 3.964.807 USA, MK F16C 27/00. Low friction bushing and method / C.S. White (USA). - № 574397 ; filed. 05.05.75 ; publ. 22.06.76 ; HKU 308-238 ; 156-174. - 6 p.

100. Pat. 1.295.258 Brit., MK F16C 33/04. Improvements in or relating to low friction bearing materials / M.B. Harrison, R. Benion. - № 58640/69 ; filed 19.04.69 ; publ. 08.11.72. - 4 p.

101. Pat. 1.309.556 Brit., MK D03D 15/10. Improvements in or relating to low friction bearing materials / M.B. Harrison, R. Benion. - № 62690/69 ; filed 19.12.69 ; publ. 14.03.73.

102. Pat. 1.487.507 Franc., MK F16C. Procédé pour fabriquer des paliers du type à autoalignement et auto-lubrifiant / The Heim universal corporation (USA). - № 63.419 ; demand. 27.05.66 ; publ. 07.07.67. - 6 p.

103. Pat. 2.140.755 Franc., MK F16C 33/00, B32b, 5/00. Material antifriction et son procédé de production / Ampep Industrial Products Limited (Gr. Bret.) - № 7120477 ; demand. 07.06.72 ; publ. 19.01.73. - 8 p.

104. Pat. 3.507.527 USA, MK F16C 11/06. Bearing and method of making / C.S. White (USA). - № 344, 430 ; filed. 12.02.64 ; publ. 21.04.70 ; HKU 287-87.- 4p.

105. Pat. 1.352.754 Brit., MK F16C 33/14. Composite plastic bearing, and

method and apparatus for making the same / Textron Inc. USA. - № 31697/71 ; filed. 01.12.70 ; publ. 08.05.74. - 8 p.

106. Pat. 1.359.228 Brit., MK F16C 33/04. Winding method of producing a low friction surface / C.S. White. - № 42144/71 ; filed. 09.09.71 ; publ. 10.07.74.- 7p.

107. Pat. 1.439.030 Brit., MK F16C 33/18. Improved plastics bearings / S.M. Shobert. - № 36969/73 ; filed. 03.08.73 ; publ. 09.06.76. - 9 p.

108. Pat. 2.953.418 USA. Molded resin bearings / L.A. Runton, H.C. Morton (USA) ; The Russell Manufacturing Company (USA). - № 732,272 ; filed. 01.05.58 ; publ. 20.09.60 ; HKU 308-238. - 3 p.

109. Pat. 3.131.979 USA. Plastic bearing / S.M. Shobert (USA). - № 133064 ; filed. 02.01.62 ; publ. 05.05.64 ; HKU 308-238. - 7 p.

110. Pat. 3.560.065 USA, MK F16C 33/18. Reinforced plastic bearing / S.M. Shobert, J.K. Tunis (USA). - № 703067 ; filed. 05.02.68 ; publ. 02.02.71 ; HKU 308-238. - 5 p.

111. Pat. 3.692.375 USA, MK F16C 33/14. Composite plastic bearing and method for making same / R.J. Matt, T.P. Rollend (USA) ; Textron Inc. (USA). - № 94091 ; filed. 01.12.70 ; publ. 19.09.72 ; HKU 308-238. - 8 p.

112. Pat. 3.697.346 USA, MK B21C 13/00, B65h 81/08, B21d 53/10. Method of making a composite plastic bearing / H.B. VanDorn, R.J. Matt, T.P. Rolland (USA) ; Textron Inc. (USA). - № 93945 ; filed. 01.12.70 ; publ. 10.10.72 ; HKU 156-161. - 11 p.

113. Pat. 3.802.756 USA, MK F16C 33/20. Filament wound bearing / P.H. Turner (USA) ; Sargent Industries Inc. (USA). - № 274605 ; filed. 24.07.72 ; publ. 09.04.74 ; HKU 308-238. - 9 p.

114. Pat. 3.864.197 USA, MK F16C 13/00, 13/02, 33/00. Plastic bearing / S.M. Shobert (USA). - № 306295 ; filed. 14.11.72 ; publ. 04.02.75 ; HKU 161-96 ; 308-173 ; 308-238. - 8 p.

115. Pat. 2.129.256 C2 Deuts., MK F16C 33/20, 33/14. Verfahren zur Herstellung von Gleitlagern / E. Hodes, L. Heinschel. - № P2129256.8-12 ; Anmeld. 12.06.71. ; Veroff. 29.04.82. - 7 s.

116. Pat. 2372.991 Franc., МК F16C 33/04, B32b 15/14, 31/12. Material stratified for the fabrication of elements of a smooth bearing and for its fabrication / Glyco-Metall-Werke Daelen (Allem). - № 7736412 ; demand. 02.12.77 ; publ. 30.06.78. - 15 p.

117. Pat. 3.594.049 USA, МК F16C 9/06. Bearing liner / P.H. Turner (USA). - № 834851 ; filed. 19.06.69 ; publ. 20.07.71 ; HKU 308-72 ; 308-173 ; 287-87 ; 308-238. - 8 p.

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

119. Кужаров А.С. Координационная трибохимия избирательного переноса : автореф. дис. докт. техн. наук / А.С. Кужаров. - Ростов н/Д: РИСХМ, 1991. - 42 с.

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

121. Евдокимов Ю.А. Тепловая задача металлополимерных трибосопряжений / Ю.А. Евдокимов, В.И. Колесников, С.А. Подрезов. - Ростов н/Д: РГУ, 187. - 166 с.

122. Подрезов С.А. Методика полуэкспериментального определения контактной температуры двухслойных металлополимерных подшипников скольжения / С.А. Подрезов // Трение и изнашивание композиционных материалов : тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. - Гомель, 1982. - С. 72-73.

123. Полимеры в узлах трения машин и приборов : справочник / Е.В. Зиновьев, А.Л. Левин, М.М. Бородулин; Ред. А.В. Чичинадзе. - М. : Машиностроение, 1980. - 208 с.

124. Справочник по триботехнике : в 3-х т. / ред. М. Хебда, А.В. Чичинадзе. - М. ; Варшава : Машиностроение, 1989, 1990, 1992.

125. ГОСТ 3635-78 / СТ СЭВ 1478-78 / Подшипники шарнирные. Технические условия // Подшипники качения. - М.: Изд-во стандартов, 1989. - Ч. 2. - 432 с.

126. Платонов В.Э. Подшипники из полиамидов / В.Э. Платонов. - М.: Машгиз, 1961. - 112 с.

127. Пехович А.И. Расчёты теплового режима твёрдых тел / А.И. Пехович, В.М. Жидких. - Л.: Энергия, 1968. - 304 с.

128. Шорин С.Н. Теплопередача / С.Н. Шорин. - М.: Высш. шк., 1964. - 490 с.

129. Попов Э.Н. Исследование долговечности фторопластсодержащих полиамидных подшипников скольжения при трении по стали : дис. канд. техн. наук / Э.Н. Попов. - Новочеркасск, 1968. - 178 с.

130. Бронштейн И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн. - М.: Наука, 1986. - 544 с.

131. Кожевников И.Г. Теплофизические свойства материалов при низких температурах : справочник / И.Г. Кожевников, Л.А. Новицкий. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1982. - 328 с.

132. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов : справочник / В.С. Чиркин. - М.: [б. изд.], 1959. - 356 с.

133. Пружанский Л.Ю. Исследование методов испытаний на изнашивание / Л.Ю. Пружанский. - М.: Наука, 1978. - 112 с.

134. Малкин А.Я. Методы измерения механических свойств полимеров / А.Я. Малкин, А.А. Аскадский, В.В. Коврига. - М.: Химия, 1978. - 336 с.

135. Ясь Д.С. Испытания на трение и износ / Д.С. Ясь, В.Б. Подмоков, Н.С. Дяденко. - Киев: Техника, 1971. - 138 с.

136. Пола Д.Р. Полимерные смеси. Т. 2: Функциональные свойства / под ред. Д.Р. Пола, К.Б. Бакнелла ; пер. с англ. под ред. В.Н. Кулезнева. - СПб.: Научные основы и технологии, 2009. - 606 с.

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

138. Кохановский В.А. Влияние окружающей среды на покрытия из самосмазывающихся волокнитов. / В.А. Кохановский, Ю.Н. Пономарёв //

Применение новых материалов в машиностроении : сб. науч. тр. / ДГТУ. - Ростов н/Д, 1997. - С. 78-89.

139. Кохановский, В.А. Идентификация металлополимерных трибосистем / В.А. Кохановский // Пластические массы. - 1997. - № 6. - С. 28-32.

140. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы / Ю.А. Михайлин. - СПб.: Профессия, 2006. - 624 с.

141. Исаченко В.П. Теплопередача : учебник для вузов / В.П. Исаченко. - 3-е изд, перераб. и доп. - М., Энергия, 1975. - 488 с.

142. Колесников, В.И. Теплофизические процессы в металлополимерных трибосистемах / В.И. Колесников. - М.: Наука, 2003. - 279 с.

143. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы : учеб. для вузов / В.П. Преображенский. - 3-е изд., перераб. - М. : Энергия, 1978. - 704 с.

144. Кохановский В.А. Армирующая компонента для антифрикционных композиционных покрытий / В.А. Кохановский // Управление. Конкуренентоспособность. Автоматизация. - 2002. - Вып. 1. - С. 73-79.

145. Кужаров, А.С. Композиционные антифрикционные покрытия на основе волокон политетрафторэтилена / А.С. Кужаров // Безызносность : межвуз. сб. науч. тр. - Ростов н/Д: РИСХМ, 1992. - Вып. 2. - С. 149-147.

146. Композиционные материалы для узлов трения подвижного состава на основе технических тканей и их триботехнические характеристики / В.И. Колесников, А.П. Сычев, В.Н. Кравченко, Б.М. Флек // Труды Южного научного центра Российской академии наук / ред. Г.Г. Матишов. - Ростов н/Д : Изд-во ЮНЦ РАН, 2007. - Т. 2: Физика. Механика. Техника. - С. 9-20.

147. Кохановский В.А. Планирование экспериментальных исследований / В.А. Кохановский, М.Х. Сергеева. - Ростов н/Д: ДГТУ, 2014. - 256 с.

148. Зедгинидзе И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И.Г. Зедгинидзе. - М., Наука, 1976. - 390 с.

149. Свидетельство РФ № 2011611211 Компьютерное моделирование многокомпонентных систем с помощью псевдосимплексных диаграмм на базе

многоугольников / П.В. Александров, В.А. Кохановский, Б.Б. Жмайлов [и др.]. - Заявка № 2010617853 2010. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 2011.

150. Большев Л.Н. Таблицы математической статистики / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. - М., 1983. - 416 с.

151. Мюллер П. Таблицы математической статистики / П. Мюллер, П. Нойман, Р. Шторм. - М.: Финансы и статистика, 1982. - 272 с.

152. РТМ 44–62. Методика статистической обработки эмпирических данных. - М.: Изд-во стандартов, 1966. - 100 с.

153. Кохановский В.А. Организация и планирование эксперимента / В.А. Кохановский, М.Х. Сергеева. - Ростов н/Д: ДГТУ, 2003. - 168 с.

154. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента / А.А. Спиридонов, Н.Г. Васильев. - Свердловск: УПИ, 1985. - 149 с.

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

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

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

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

159. Кохановский В.А. Антифрикционные композиты с эпоксидной матрицей / В.А. Кохановский, И.В. Больших, Е.С. Новиков // Труды

международной научно-практической конференции «Транспорт-2015». Часть 4 . ФГБОУ ВО «РГУПС» - 2015, с. 35 - 37.

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

161. Больших И.В. Матричный материал для антифрикционного полимерного композита / И.В. Больших, В.А. Кохановский // Труды РГУПС. - 2014. - № 5, спецвыпуск. - С. 33-37.

162. Кохановский В.А. Адгезия антифрикционных полимерных покрытий на основе фенилона / В.А. Кохановский, И.В. Больших, Д.С. Мантуров // Вестник РГУПС. - 2017. - № 4. - С. 16-20.

163. Больших И.В. Адгезионная прочность полимерных покрытий на основе фенилона / И.В. Больших, А.В. Донченко / Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России : сб. науч. тр. / РГУПС. - Ростов н/Д, 2018. - Т. 1 : Технические науки. - С. 188-190.

164. Больших И.В. Ползучесть антифрикционных полимерных покрытий / И.В. Больших, Э.А. Камерова // Труды РГУПС. - 2014. - № 4(29). - С. 33-34.

165. Больших И.В. Вязкоупругие свойства фторопластосодержащих композитов / И. В. Больших, Д. В. Глазунов // Транспорт-2015 : тр. междунар. науч.-практ. конф., апрель 2015 г. : в 4 ч. / ФГБОУ ВПО РГУПС. - Ростов н/Д, 2015. - Ч. 4: Гуманитарные, юридические и технические науки. - С. 23-25.

166. Орлов П.И. Основы конструирования : справ.-метод. пособие : в 2-х книгах / П.И. Орлов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М. : Машиностроение, 1988. - 544 с.

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