

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

На правах рукописи

Азоян Анаид Иосиповна

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА
ПУТЕМ ЕГО МОДИФИКАЦИИ

2.5.3. Трение и износ в машинах

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
П. Г. Иваночкин

Ростов-на-Дону

2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Глава 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА	11
1.1 Современные исследования по механике контактного взаимодействия и физике трения. Основные направления исследований в мировой науке ..	16
1.2 Анализ исследований различных способов модифицирования полимерных материалов	19
1.3 Условия образования и формирования вторичных структур	25
1.4 Выводы по главе 1	35
1.5 Цели и задачи исследования	37
Глава 2. ПЛОСКАЯ КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ДВУХСЛОЙНОЙ ПОЛОСЫ ПРИ УЧЕТЕ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ В ЗОНЕ КОНТАКТА	39
2.1 Математическая постановка контактной задачи при движении жесткого штампа по упругому основанию	40
2.2 Асимптотическое решение плоской контактной задачи для двухслойной упругой полосы при учете тепловыделения в зоне контакта	45
2.3 Аналитическое представление вырожденного решения плоской контактной задачи для двухслойной полосы при учете тепловыделения в зоне контакта	48
2.4 Конечно-элементное моделирование контактного взаимодействия двухслойного покрытия при учете тепловыделения в зоне контакта	50
2.5 Выводы по главе 2	52
Глава 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	53
3.1 Структура исследований	53
3.2 Синтез композиционных материалов на основе эпоксидной смолы	56
3.3 Оборудование и инструменты. Методика испытаний	64
3.4 Выводы по главе 3	72

Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ	73
4.1 Определение концентрации армирующих компонентов	74
4.2 Определение концентрации антифрикционных компонентов	76
4.3 Трибологические исследования композиционных материалов	80
4.4 Физико-механические исследования композиционных материалов	82
4.5 Исследование кинетики образования вторичных структур	90
4.6 Исследование вторичных структур на поверхности трения	95
4.7 Определение тепловых процессов	99
4.7.1 Влияние наполнителей на температуру композиционного материала	99
4.7.2 Влияние температуры на физико-механические свойства композиционного материала	103
4.8 Выводы по главе 4	107
Глава 5. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ УЗЛА ТРЕНИЯ «НАКЛАДКА НАПРАВЛЯЮЩЕЙ ПОВОРОТНОГО СТОЛА – СТАНИНА СТАНКА» ...	109
5.1 Анализ теоретических исследований рассматриваемого узла трения	109
5.2 Промышленные испытания	114
5.3 Выводы по главе 5	119
Заключение	120
Список литературы	122
Приложение. Акты об использовании результатов диссертационного исследования	147

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. При современном уровне развития производства и высоких требованиях к надежности и функциональности машиностроительного оборудования на первый план выходит эффективность работы тяжело нагруженных узлов трения. Особое внимание при этом уделяется способам снижения износа и улучшению эксплуатационных характеристик полимерных композиционных материалов, широко применяемых в узлах трения благодаря их способности работать в широком диапазоне механических и тепловых воздействий.

Стоимость ремонта и обслуживания машин, работающих в особо тяжелых условиях, может составлять до 25 % от их себестоимости. Причиной значительного снижения ресурса эксплуатации техники является интенсивный износ деталей машин. Умение применять знания физико-механических и трибологических свойств различных материалов позволяет сократить расходы на ремонт и реставрацию поверхностей трения. В ремонтном производстве повсеместное распространение получают технологии восстановления поврежденных или изношенных поверхностей тяжело нагруженных узлов трения.

В последние годы в станкостроении все большее применение находят полимерные композиты. Их использование позволяет решить несколько задач. Во-первых, появляется возможность сформировать идеальную контактную пару, поскольку плоскость полимерного покрытия создается до полимеризации ответной шлифованной поверхностью направляющих. Во-вторых, учитывая особенности полимерного слоя, интенсивность износа направляющих существенно снижается, что увеличивает межремонтный период эксплуатации этого оборудования. Однако отдельные аспекты применения подобных композитов в станках остаются неизученными и требуют новых теоретических и экспериментальных исследований.

Происходящее в результате трения повышение температуры приводит к необратимым изменениям свойств материалов, влияющим на их физико-механические и трибологические характеристики, и активизирует физико-

химические процессы, происходящие в контакте. Тепловой режим трения устанавливает фазовые превращения в полимере и характеризуется возникновением надмолекулярных структур, которые характеризуют процессы трения. Поэтому учет тепловыделения при трении является важным фактором, определяющим износостойкость полимерных композиционных материалов.

Управлять фрикционными свойствами и снизить износ полимерного композита можно путем его модификации, заключающейся во введении в полимерную матрицу механоактивированных мелкодисперсных частиц, влияющих на процессы химических превращений в зоне трибоконтакта. Применение модификаторов улучшает прочностные характеристики и уменьшает ползучесть материала, а также способствует формированию вторичных структур на поверхности контртела.

Модификация матрицы композита существенно скажется на закономерностях образования вторичных структур в зоне трения, что, в свою очередь, отразится на трибологических свойствах композита.

В связи с этим работа, посвященная повышению эксплуатационных свойств функционального полимерного материала путем его модификации, представляется актуальной и перспективной.

Результаты диссертации были получены в рамках реализации ряда научно-исследовательских работ:

1. Грант РФФИ № 20-08-00614 А «Разработка способов получения модифицированных полимерных композиционных материалов и методов прогнозирования упруго-прочностных и трибологических свойств создаваемых композитов».

2. Грант РФФИ № 18-58-00026 Бел_а «Исследование механизмов повышения несущей способности трибосистем при реализации в зоне трения граничных смазочных слоев, модифицированных жидкокристаллическими и наноразмерными наполнителями».

3. Грант РФФИ № 14-29-00116 П «Исследование механизма формирования и функционирования поверхностных структур на трибоконтакте для создания антифрикционного слоя с заданными трибофизическими характеристиками».

Степень разработанности проблемы. Вопросами повышения эксплуатационных свойств металлополимерных трибосистем занимаются российские трибологические школы под руководством академиков РАН В. И. Колесникова, И. Г. Горячевой, профессоров Ю. К. Машкова, Г. А. Гороховского, В. И. Бутенко, В. А. Кохановского, Г. В. Козлова, А. А. Охлопковой, С. В. Панина, С. В. Шилько, а также научная школа В. А. Белого и Н. К. Мышкина в Республике Беларусь.

Зарубежные ученые В. J. Briscoe, W. D. Craig, J. K. Lancaster, D. C. Evans, В. Klamecki, A. Sugibuchi, M. Nosonovsky, K. Krawczyk, G. Fuks-Rabinovich особое внимание уделяли способам снижения износа и улучшению эксплуатационных характеристик материалов, применяемых в узлах трения. Результаты их исследований повлияли на дальнейшее развитие трибологии и позволили расширить область применения композиционных материалов.

Значительный вклад в изучение процессов формирования вторичных структур при трении в результате самоорганизации внесли Д. Н. Гаркунов, И. В. Крагельский, Л. И. Бершадский, Б. И. Костецкий, Н. А. Буше, В. Klamecki, M. Nosonovsky и др. Бельгийский ученый И. Р. Пригожин теоретически обосновал теорию самоорганизации, опираясь на основные термодинамические аспекты.

Благодаря активным научным исследованиям в Китае, США, Японии, России и Белоруссии трибология вышла на микро- и наноразмерный уровень. Заложенные И. В. Крагельским основы изучения процессов на микроуровне впоследствии получили развитие в работах А. С. Кужарова, С. А. Полякова. Влиянию наноразмерных частиц на триботехнические и физико-химические свойства смазочных материалов посвящены исследования В. Э. Бурлаковой.

Ученые во главе с Н. А. Буше провели оценку совместимости материалов при усталостном виде изнашивания с учетом неравновесной термодинамики. Однако результаты экспериментов не дают полную информацию о кинетике образования

вторичных структур на поверхности металлополимерных трибосистем и требуют дальнейших исследований.

Целью исследования является расширение области применения модифицированных функциональных полимерных материалов, используемых при восстановлении поверхности тяжело нагруженных узлов трения, путем установления основных закономерностей физико-химических процессов, происходящих в их зоне трения.

Поставленная цель требует решения следующих **задач**:

1. Разработать конечно-элементную модель узла трения «накладка направляющей поворотного стола – станина станка».

2. Подобрать качественный и количественный состав мелкодисперсных модификаторов и исследовать их влияние на эксплуатационные характеристики трибосистемы.

3. Установить кинетику образования вторичных структур и их влияние на трибологические свойства композита.

4. Провести верификацию теоретических разработок на основе результатов экспериментальных исследований.

5. Определить основные рекомендации по применению полученного композиционного материала по результатам промышленных испытаний.

Объектом исследования является металлополимерный узел трения с модифицированным композиционным покрытием.

Предмет исследования – установление основных закономерностей физико-химических процессов, происходящих в зоне трения узла с модифицированным композиционным покрытием, и механизма образования вторичных структур.

Научная новизна исследования представлена следующими наиболее значимыми результатами:

1. Установлен состав полимерного композиционного материала, повышающий эксплуатационные свойства узла трения «накладка направляющей поворотного стола – станина станка».

2. Предложена конечно-элементная модель, позволяющая определить напряженно-деформированное и тепловое состояние узла трения.

3. Выполнена оценка влияния наполнителей на трибологические свойства модифицированного полимерного материала.

4. Показан механизм формирования вторичных структур на поверхности контртела в металлополимерном узле.

Теоретическая значимость работы:

1. Выполнен расчет напряженно-деформированного и теплового состояния взаимодействующих поверхностей узла трения.

2. Исследовано влияние наполнителей на термическую устойчивость композита.

3. Проведен анализ процесса формирования вторичных структур методом РФЭС.

Практическая значимость работы:

1. Предложен полимерный композиционный материал для применения в направляющих горизонтально-расточного станка.

2. В результате выполненных экспериментальных исследований установлены закономерности образования вторичных структур и их влияние на трибологические свойства модифицированного полимерного покрытия.

3. Исследования завершены промышленными испытаниями, которые подтвердили эффективность предложенного материала. Проверка рабочей поверхности накладок после контрольной разборки узла трения «накладка направляющей поворотного стола – станина станка» горизонтально-расточного станка 2А622 в ООО «РостИнТех» не выявила нарушения целостности или отслоения композиционного материала, что подтверждает высокое качество нанесенного покрытия и его адгезию к основанию. Величина износостойкости экспериментальных накладок превышает показатели штатных накладок на 14–16 %.

Методы исследования. Результаты теоретических исследований основаны на решении термоупругих уравнений Дюгамеля – Неймана и стационарного

уравнения теплопроводности с использованием программы аналитических преобразований MAPLE.

Конечно-элементная модель поставленной контактной задачи теории упругости о действии жесткого штампа на изотропный упругий двойной слой построена при помощи программного комплекса ANSYS.

Для выполнения экспериментальных исследований применялись следующие приборы и оборудование: модульный комплекс NanoTest 600 для исследования физико-механических свойств материалов в нано- и микромасштабах с использованием программы NanoTest Platform 3 для обработки кривых индентирования; растровый электронный микроскоп Zeiss EVO MA 18, оснащенный энергодисперсионным спектрометром X-Max 50N; установка SPECS для проведения рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии; анализатор термических превращений STA 449 F3 Jupiter; ИК Фурье-спектрометр Bruker ALPHA II, оборудованный приставкой нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО); трибометр TRB с использованием методики DIN 50324; планетарная мономельница PULVERISETTE 6 для тонкого и сверхтонкого измельчения частиц; дисковая центрифуга CPS Model DC24000 с применением дифференциальной высокоскоростной седиментации для определения размера измельченных материалов.

Степень достоверности результатов исследований обеспечивается обоснованным установлением цели и полным выполнением поставленных задач. Результаты теоретических исследований получены на основе классических законов физики (уравнений Дюгамеля – Неймана, теплопроводности), а также численно-аналитических расчетов при помощи программ MAPLE и ANSYS. Сходимость теоретических результатов подтверждена экспериментальными исследованиями, проведенными с применением современных высокоточных методов – ИК Фурье-спектроскопии, наноиндентирования, электронной микроскопии и рентгеноэлектронной спектроскопии, термического анализа и др.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы обсуждались на ряде тематических научных конференций: Международной

научной конференции «Современные проблемы механики сплошной среды» (Ростов-на-Дону, 2016 г., 2018 г.); Международной научной-технической конференции «Трибология – машиностроению» (Москва, 2016 г.); Международной научно-практической конференции «Транспорт» (Ростов-на-Дону, 2016 г., 2018 г., 2019 г., 2020 г.); Международной научной конференции «Механика и трибология транспортных систем» (Ростов-на-Дону, 2021 г.), Международной научно-практической конференции «Современные тенденции в науке и образовании: новый взгляд» (Нефтекамск, 2024 г.).

Публикации. По итогам диссертационных исследований опубликовано 18 научных работ (общий объем 6,03 п. л., лично автору принадлежат 3,05 п. л.), в том числе 3 работы в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства науки и высшего образования РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 218 наименований. Общий объем работы составляет 146 страниц, включает 40 рисунков и 12 таблиц.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность и признательность за поддержку и помощь в проведении исследований к.т.н. Мантурову Дмитрию Сергеевичу. Соискатель также благодарит коллектив научно-исследовательской части кафедры «Теоретическая механика» ФГБОУ ВО РГУПС.

Глава 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

На сегодняшний день в условиях устойчивого роста термических и механических нагрузок машин, работающих в особо тяжелых условиях, на первый план выходит поиск материала, способного повысить ресурс эксплуатации техники.

При современном развитии производства особое внимание уделяется способам снижения износа и эксплуатационным свойствам полимерных композиционных материалов, так как они могут работать в широком диапазоне механических и тепловых воздействий. Дальнейшее расширение функционального потенциала, к которому можно отнести и устойчивость к агрессивной среде, позволило полимерным композитам занять высокое место в иерархии конструкционного материаловедения.

Было установлено, что полимеры проявляют хорошую структурно-термическую адаптивность путем вариативного преобразования физических и химических свойств материалов и создают в процессе трения герметичные заслоны для изоляции металлических деталей от влияния внешней среды, способствующие снижению силы трения.

Определяющим фактором при трении и износе контактных поверхностей является процесс диффузии (перенос вещества и энергии), который происходит при переходе атомов из одного положения равновесия в другое. Изменение конфигурации атомов неразрывно связано с температурой, концентрацией напряженного состояния или неоднородностью распределения напряжений [1].

Одной из основных проблем для всех трибосистем является повышение их ресурса. При контактном взаимодействии пары трения наблюдаются повышение температуры, термодеструкция и износ материала, что создает термодинамические потоки энергии. В результате увеличения молекулярной подвижности происходят структурные изменения материала (например, уменьшение степени кристалличности), увеличивающие конфигурационную энтропию.

Если температура при трении контактных поверхностей близка температуре плавления, то материал становится пластичным и площадь зоны контакта значительно увеличивается. В зависимости от конструктивных особенностей трибосопряжения скорость скольжения может достигать больших значений, что преобразует сухое трение в гидродинамическое. Соответственно данный процесс приводит к изменению интенсивности изнашивания и коэффициента трения [2]. Например, при повышении температуры полимерных композиционных материалов до 200 °С при увеличении интенсивности изнашивания в 4–6 раз коэффициент трения уменьшается в 2,5–3 раза. Решение данного вопроса для металлополимерных сопряжений в первую очередь основывается на изучении влияния температурных факторов: температуры и температурного градиента (рисунок 1.1).

Температура воздействует на твердость, прочностные характеристики материала, распределение напряженно-деформированного состояния материала, а также ползучесть. Итогом влияния температуры и температурного градиента является изменение параметров трения и изнашивания, что увеличивает при этом интенсивность протекания хемосорбционных, диффузионных, термоокислительных и других физико-химических процессов.

В результате воздействия температуры на всю трибосистему наблюдаются следующие процессы:

- повышение несущей способности узла вследствие роста фактической поверхности контакта;
- снижение интенсивности износа посредством уменьшения контактных напряжений;
- снижение коэффициента трения в результате адсорбции, хемосорбции, формирования вторичных структур;
- уменьшение потерь на трение по причине изменения условий рассеяния энергии.



Рисунок 1.1 – Влияние температурных параметров на технические свойства трибосистем

Следует отметить, что влияние температурных факторов на трибосистему дает положительный эффект в достаточно ограниченной зоне значений. Вне данного диапазона температурное воздействие на трибосистему будет носить отрицательный характер. Таким образом, ключевым моментом управления параметрами металлополимерных трибосистем является изучение теплофизических характеристик.

Применение антифрикционных покрытий становится очевидным в результате сосредоточения внешнего трения в приповерхностных слоях контактирующих тел. Структура полимерного композиционного материала представляет собой непрерывную матрицу и наполнитель. Волокнистый наполнитель включает армирующую основу, способную воспринимать действующие нагрузки, и матричное связующее, которое объединяет все компоненты воедино и перераспределяет действующие напряжения между отдельными зонами армирующего каркаса. Использование различных модификаторов с применением органических или неорганических дисперсных наполнителей способствует повышению физико-механических свойств полимеров (рисунок 1.2), а также улучшению технологии производства и снижению стоимости полимерных изделий.



Рисунок 1.2 – Наполнители композиционных материалов

Следует также отметить, что химический состав композиционных покрытий и технология их нанесения оказывают огромное влияние друг на друга. На рисунке 1.3 приведены различные типы исходных материалов антифрикционных композитов, а также технология нанесения покрытий на их основе.



Рисунок 1.3 – Исходные материалы и технология нанесения композиционных полимерных покрытий

С целью улучшения прочностных качеств тяжело нагруженных узлов трения особое внимание уделяется исследованиям композиционных покрытий, выполненных на основе полимерной матрицы и полимерных волокон. В качестве антифрикционной основы могут выступать материалы с низким коэффициентом трения, например полиамид, фторопласт или углерод.

В настоящее время широкое распространение получили модификаторы наноразмерного уровня. Применение наномодификаторов ведет к существенному увеличению прочности полимеров при растяжении, а также повышению их твердости и улучшению адгезионных характеристик.

Композиционные материалы на основе эпоксидных смол широко используются в различных сферах машиностроения благодаря своей универсальности и высокоэффективным механическим характеристикам. Введение в матрицу модифицированных наполнителей улучшает эксплуатационные свойства полимера за счет формирования «третьего тела», которое способствует минимизации износа и снижению адгезионного воздействия. Более того, использование таких композитов позволяет оптимизировать производственные процессы, снижая затраты на поддержание оборудования и продлевая срок его службы.

1.1 Современные исследования по механике контактного взаимодействия и физике трения. Основные направления исследований в мировой науке

С течением времени трение претерпело существенную трансформацию и является многофакторным процессом изменения поверхностной структуры покрытий в результате контактного взаимодействия. Развитие научных исследований в данной области достигло молекулярных представлений, обусловленных взаимодействием контактируемых тел на атомарном уровне. В своих трудах Б. И. Костецкий [3] для металлов, Г. А. Гороховский [4] для полимеров и В. А. Белый [5] при действии полимера о металл рассматривают трение как процесс формирования вторичных структур в зоне контакта с последующим разрушением. Изменение структуры и температуры контактируемых поверхностей и дальнейшее их пассивирование являются основными факторами для образования вторичных структур. С другой стороны, процесс трения в своих работах Б. И. Костецкий [6] описал как локализацию в тонком поверхностном слое вторичных образований с точки зрения структурной адаптивности трибосопряжений. Его идеи одобрены академиком П. А. Ребиндером [7] и поддержаны в работах Л. И. Бершадского [8].

В результате экспериментальных исследований Е. М. Швецова и И. В. Крагельский предложили разделить процесс изнашивания на три этапа:

1. Взаимодействие поверхностей трения. За счет микронеровностей поверхностей механическое взаимодействие контактируемых тел заключается во взаимном внедрении объектов друг в друга. Дальнейшее взаимодействие характеризуется схватыванием и адгезионным процессом в зоне контакта.

2. Изменения в поверхностном слое. В процессе трения в зоне контакта отмечается повышение температуры и происходит упругая деформация поверхности, что приводит к усталостному разрушению.

3. Пластическое деформирование. Данное явление сопровождается изменением структуры поверхности материала, а за счет повышения температуры приводит к диффузионным процессам.

По мнению Г. А. Гороховского, при фрикционном нагружении полимерного материала тяжело нагруженных узлов трения наблюдается механическое разрушение макромолекул, которое определяется износостойкостью металлического контртела, оказывая при этом на него диспергирующее и адсорбирующее действие. По утверждению В. А. Белого [5], поверхностное измельчение на поверхности трения в результате частой пластической деформации приводит к усталостному разрушению и усугубляется за счет изменения физико-химических свойств материала.

На сегодняшний день тема, посвященная процессам фрикционного переноса поверхностей «металл – полимер» и «полимер – полимер», особенно для полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) и для фторопласта (ПТФЭ) [9–10], подробно изучается. В работах Штейна и Бауэрса [11–13] установлено, что формирование вторичной структуры в результате фрикционного взаимодействия зависит главным образом от режимов трения (температуры и скорости скольжения). При этом У. Ланкастер и Д. Бакли в [14–15] утверждают, что за счет хорошей силы сцепления (химические и физические связи) сформированная пленка удерживается на металлическом контртеле.

Научные сотрудники Национальной академии наук Беларуси в области спектральных исследований под руководством В. А. Белого установили, что важную роль в образовании вторичных структур играют свободные радикалы на поверхности трения для сильнополярных полимеров [16–17], а процесс переноса разнополярных материалов, согласно С. Бахадур и В. Джейн [18–19], происходит от менее полярного к более полярному полимеру.

Образование «третьего тела» в результате трения пары «полимер – полимер» менее понятно вследствие поверхностного течения и переноса частиц пористого материала через зону контакта. Неоднозначные результаты показали исследования наполненных композитов формальдегидной смолы с добавками

ПТФЭ, проведенные У. Ланкастером: разрушение наполнителя в зоне фрикционного переноса, а также значительное изменение химического состава и структуры поверхности [20–22]. Было установлено, что помимо поверхностного слоя продукты износа на 20–25 % подвержены физико-химическим превращениям [23–25].

Благодаря активным научным исследованиям в Китае, США, Японии, Южной Корее, России, Сингапуре и Белоруссии трибология выходит на микро- и наноуровень. Это возможно, во-первых, благодаря достижениям в области квантовой химии, которые стали непосредственно применимы для изучения трения на самых малых масштабах. Во-вторых, новое представление об электронном строении материи позволяет более точно понимать процессы трения и износа на атомарном уровне. И, наконец, в связи с растущими требованиями к тяжело нагруженным узлам трения возникает необходимость применения новых подходов и технологий на наноуровне. Все это вместе стимулирует развитие трибологии и открывает новые горизонты и возможности в изучении и управлении трением на малых масштабах. Однако на сегодняшний день изучение трибосопряжения металлополимерных поверхностей на микроуровне не достигло желаемых результатов и до сих пор требует конкретных решений. В Белоруссии над этой проблемой работает научный коллектив школы академика В. А. Белого [26–27]. В России, в свою очередь, – ученые из Института проблем механики РАН [28], Института физики, прочности и материаловедения СО РАН [29], Ростовского государственного университета путей сообщения [30].

Повсеместное применение в машиностроении тяжело нагруженных трибосистем «металл – металл» привело к существенному прогрессу современной техники, однако последний себя не всегда оправдывает. В ходе анализа методов модифицирования с выделением более перспективных из них возникла необходимость исследовать элементы модифицированных поверхностей по отдельности. Поэтому дальнейший анализ материалов тяжело нагруженных трибосистем будет основываться на поиске высокоэффективных гибридных

наполнителей, способных к образованию вторичных структур на поверхности контртела в зоне контакта.

1.2 Анализ исследований различных способов модифицирования полимерных материалов

Имея достаточно большой выбор инструментов исследования свойств и структуры контактируемых слоев, современная наука на данном этапе развития, учитывая высокие требования к надежности и функциональности оборудования тяжело нагруженных узлов трения, продолжает искать новые методы формирования композиционных материалов, отличающихся высокой износостойкостью. Последние, в свою очередь, различаются своими структурными свойствами, но при этом должны сохранять устойчивое состояние при функционировании в критических условиях. Эмпирический подход реальных методов показал возможность к самоорганизации вторичной структуры, удовлетворяющей высоким требованиям к производительности трибосистемы. В технике данный метод именуется как «эффект безызносности».

Металлополимерные трибосистемы с антифрикционными композиционными покрытиями получили широкое использование в тяжело нагруженных узлах трения за счет антифрикционных и конструктивных свойств трибосистем, а также экономичности материала [31–34]. К преимуществам данного вида покрытий можно также отнести низкие потери на трение, увеличенный ресурс эксплуатации, способность работать в различных смазочных средах.

Полимерные материалы по своей реакции на теплоту классифицируются на:

- 1) термопластичные – виды полимеров, у которых линейная и разветвленная структура подвержена обратимым изменениям при циклическом воздействии нагревания и охлаждения;
- 2) терморезистивные – полимеры, молекулы которых в результате химических реакций связываются в сетчатую структуру.

Полимеры обладают гибкостью молекулярной цепи, вследствие которой отличаются высокой эластичностью и отсутствием хрупкости. Данное свойство полимерных материалов при растяжении может привести к низкомодульным деформациям и обратимым изменениям [35–36].

Эпоксидные смолы и полимерные материалы на их основе были открыты в начале 1940-х годов С. Гринли в США и П. Кастаном в Швейцарии. Первыми доступными на рынке олигомерами являлись продукты реакции бисфенола А и эпихлоргидрина (рисунок 1.4).

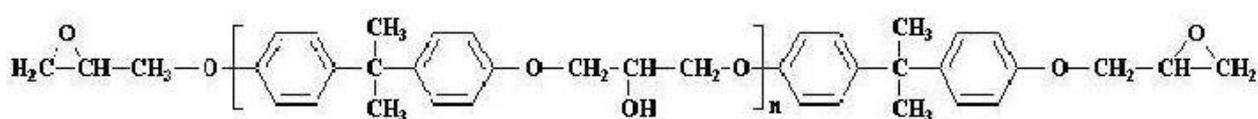


Рисунок 1.4 – Структурная схема бисфенола А

Эпоксидные смолы обладают высокими физико-механическими и антикоррозионными свойствами, обеспечивая долговечность и надежность конечной продукции. Эпоксидные смолы являются доступным материалом, область применения которого многообразна: они могут выступать в качестве связующей основы для композиционного материала, как компоненты лакокрасочных веществ, использоваться для изготовления и ремонта различных деталей машин. В настоящее время благодаря преимуществам данного материала в России начали активно развивать его производство и распространение в промышленных масштабах [37–38].

Эпоксидные олигомеры значительно повышают свои механические и трибологические свойства за счет отверждения, в процессе которого формируется сетчатая структура с высокой стойкостью к агрессивной среде [39]. Для корректировки свойств модифицированного полимерного материала в матрицу могут быть также включены растворители, пластификаторы, разбавители и ускорители.

На сегодняшний день эпоксидные диановые (ЭД) смолы занимают лидирующую позицию на рынке эпоксидных соединений. В машиностроении чаще всего используют смолы ЭД-20 и ЭД-22 по ГОСТ 10587-84, характеристики которых представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Характеристики эпоксидно-диановых смол

Показатель	Значение показателя	
	ЭД-20	ЭД-22
Внешний вид	Вязкая прозрачная жидкость	Низковязкая прозрачная жидкость
Массовая доля эпоксидных групп, %	20,0–22,5	22,1–23,6
Массовая доля иона хлора, %	не более 0,005	0,003
Массовая доля омыляемого хлора, %	не более 0,8	0,5
Массовая доля летучих веществ, %	не более 0,2	0,3
Массовая доля гидроксильных групп, %	не более 1,7	1,0
Динамическая вязкость при 25 °С	12–25	8–12
Время желатинизации, ч	не более 8	не более 18

Модифицированная эпоксидно-диановая смола обладает нечувствительностью к изменению температуры (исключение резонансных явлений), а также значительно повышает эксплуатационные характеристики покрытий. Следует отметить, что при добавлении наполнителя (присадки или добавки) меняются механические и теплофизические свойства не только матричного связующего, но и полимерного композита в целом, повышая при этом уровень необходимых эксплуатационных свойств материала.

В последнее время метод микро- и наномодификации с использованием небольшого количества наполнителя (от 0,1 до 5 %) стал наиболее популярным и востребованным способом улучшения связующего вещества [40]. Исследования показали, что модификация ведет к формированию на границе раздела фаз высокоориентированного пограничного слоя, изменяя надмолекулярную структуру матрицы полимера. Данный процесс может как упрочнить композит,

так и повысить его вязкие свойства, которые могут привести к ползучести и дальнейшему разрушению материала [41–45].

Наполнители являются важным связующим компонентом эпоксидных материалов и могут изменять целый набор конструкционных и технологических функций.

Конструкционные функции:

- минимизация усадки при отверждении;
- способность связующего компонента менять свою вязкость при механическом воздействии;
- повышение прочности и вязкости при разрушении;
- сближение коэффициентов линейного термического расширения клея и субстрата.

Технологические функции:

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

В последнее время наряду с различными порошкообразными наполнителями применяются ультрадисперсные нанопорошки, состоящие из нитридов бора и алюминия, диалкоксидов, кремнезёма и каолина, а также рубленые асбестовые и стеклянные волокна.

При работе тяжело нагруженных трибосистем с модифицированными полимерными покрытиями главным достоинством ряда наполнителей является высокая термостойкость. Например, кремнезём как наполнитель, введенный в полимерную матрицу, снижает уровень линейной усадки с 0,4 до 0,2 %.

Следует также отметить, что добавление наполнителей в эпоксидную основу может дать обратный эффект. Ухудшение физико-химических свойств наблюдается при использовании частично отвержденного полимера с порошкообразным гибридным наполнителем крупного помола.

Важным классом наполнителей, добавляемых в эпоксидную основу композита, являются отвердители. Их применение обусловлено высокой прочностью при длительном воздействии повышенных температур (~200 °C) в

ходе эксплуатации. Выбор отвердителя непосредственно связан с основным назначением насыщенного эпоксидного полимера и зависит от свойств всех его компонентов. Определяющими факторами являются температурный режим и время отверждения, длительность жизнеспособности смеси, а также наличие токсических веществ при отверждении материала [46].

В зависимости от способа отверждения в широком температурном диапазоне эпоксидные смолы делятся на:

1) эпоксидные смолы холодного отверждения. В этом случае в качестве отвердителя могут быть применены метафенилендиамин, гексаметилендиамин, полиэтиленполиамин;

2) эпоксидные смолы горячего отверждения. Отвердители – малеиновый, фталевый и янтарный ангидриды, фенолоформальдегидные смолы, триэтаноламин, дициандиамид.

Существует несколько основных требований к отвердителям, применяемым в композиционных материалах, независимо от того, какими свойствами обладают полимерные олигомеры:

- отсутствие токсичности;
- хорошая сшиваемость в поперечном сечении;
- хорошая растворимость в полимере;
- способность длительно сохранять свойства в широком температурном диапазоне;
- реализация процесса при заданной скорости.

На данный момент отверждающие системы для эпоксидных смол по механизму действия делятся на две группы (рисунок 1.5):

1. Сшивающие отвердители. Их работа основана на быстрой реакционной способности полимерных соединений, которые делятся на гидроксильные (применяются для образования реактопластов, например, гексаметилентетрамин) и карбоксильные (поли- и диизоцианат, алкоксисиланы, предназначенные для отверждения кремнийорганических олигомеров) части. Для получения желаемого результата необходимо определить оптимальное значение сшивающего агента.

В большинстве случаев из расчета на массу полимерного соединения сшивающий отвердитель вводят в объеме порядка 0,1–5,0 %.

2. Катализаторы. Они не участвуют в образовании трехмерной сетчатой структуры, но их действие основано на ускорении процесса сшивания.

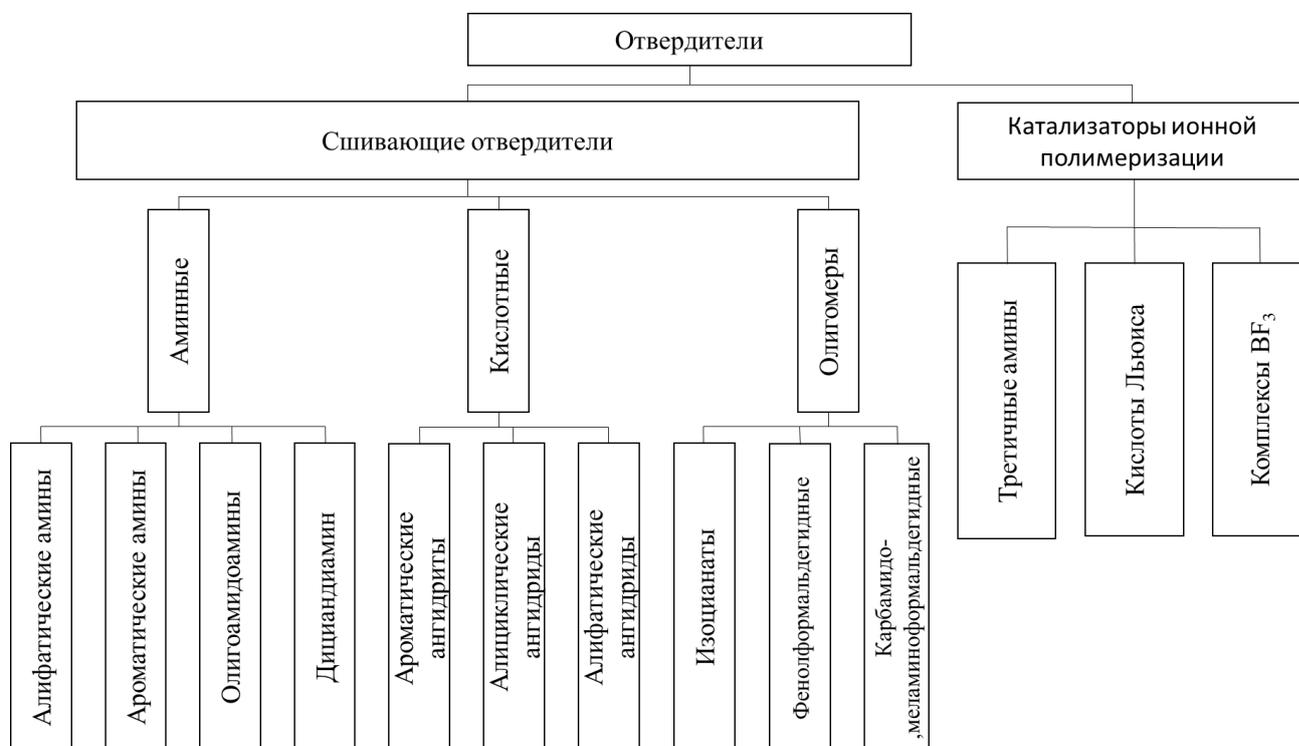


Рисунок 1.5 – Классификация отвердителей эпоксидных олигомеров в зависимости от механизма их действия

Катализаторы оказывают существенное воздействие на композиционный материал, так как после отверждения остаются в полимерном соединении. Важным фактором является то, что химическая структура зависит от характера протекания процесса. При этом независимо от функциональности катализатор вводится в количестве 5 масс. ч. на 100 масс. ч. полимерного материала.

Для улучшения сшивающего фактора применяют третичные амины, кислоты Льюиса или комплексы BF_3 . Увеличение скорости сшивания, мягкий процесс отверждения и стойкость к агрессивной среде характерны для микрокапсулирования отвердителей [47–48].

Применение дигидразина на основе изопрена в качестве отвердителя полимера описано в работе [49]. Отвердитель при комнатной температуре увеличивает жизнеспособность на 3 часа и существенно улучшает физико-механические свойства композиционного материала. Процесс происходит в три этапа: 1) 24 часа при 25 °С; 2) 2 часа при 80 °С; 3) 2 часа при 120 °С.

В работе [50] применяется отвердитель 2-метил-1,5-диаминопентан (МПМДА), который при низких температурах (+5 °С и выше) способен формировать сетчатую структуру и вводится в соотношении 18 масс. % на 100 масс. % полимерного материала.

При каталитическом отверждении эпоксидной смолы марки ЭД-20 чаще всего используются кислоты Льюиса [51], основными преимуществами которых являются долговечность и невысокая стоимость. Сам процесс протекает при температуре до 170 °С. Использование в качестве отвердителя диэфиродисульфоимида для ЭД-20 дает значительный рост температуры, что ведет, в свою очередь, к увеличению внутренних напряжений. Практическими исследованиями было установлено количественное соотношение отвердителя в составе эпоксидного компаунда: до 5 масс. ч. на 100 масс. ч. смолы.

Анализируя научную литературу, можно прийти к выводу, что свойства полимерных композиционных материалов напрямую зависят от соотношения всех составляющих и температуры отверждения.

1.3 Условия образования и формирования вторичных структур

В связи с огромной востребованностью полимерных композиционных материалов в машиностроении одной из главных задач науки становится полное исследование их физико-механических и трибологических свойств, а также условий формирования вторичных структур. В работах [52–53] механизм образования пленок переноса представлен как процесс самосмазывания: распределение пластичной фазы идет по всей площади контакта. Поэтому для создания новых материалов было предложено строить корреляцию между

начальным значением мягких включений и итоговым количеством сформированной структуры.

При контактном взаимодействии окислительные процессы смазочного материала узлов трения могут менять структуру и химический состав на поверхности глубиной до 1 мкм [54]. Для снижения износа авторы работ [55–56] предлагают растворять присадки в масле на основе цинка.

Важные результаты исследований вторичных структур, посвященных влиянию углерода на трибологические свойства композитов, подробно описаны в работах [57–59]. Улучшение антифрикционных свойств можно получить при введении наночастиц графита и графена в смазку на основе животного жира [58] или при использовании шунгита в качестве смазочной присадки [57]. Уменьшения износа можно добиться образованием вторичной структуры в процессе трения при использовании полиорганосилоксана в качестве наполнителя [59]. Процесс трибополимеризации можно описать следующим образом: при контактном взаимодействии узлов трения на поверхности образуются полимерные пленки, в которых находятся адсорбированные компоненты смазочного материала. Разрыв С-С и С-Н связей при повышении температуры металла (например, хрома или молибдена) и каталитическом эффекте ведет к формированию на поверхности активных радикалов и осаждению их в молекулы.

В работе [60] описано испытание пары трения стали и сплава с высоким содержанием олова Al-40Sn, который обладает наилучшими антифрикционными характеристиками. Чаще всего из большого количества трибологических параметров для выбора наиболее эффективного материала для конкретного узла трения принимают во внимание только износ поверхности, уменьшить который можно с увеличением концентрации наполнителей, например нитридов или карбидов [61–62]. Главным недостатком их применения является влияние на усталостную прочность материала и стальное контртело.

Разработка новых сплавов возможна при получении конкретных экспериментальных данных. В работах [63–64] отмечается, что механизм образования вторичных структур является более сложным процессом, чем

окисление контактной поверхности и массовый перенос на контртело. Таким образом, пленки переноса становятся частью поверхности трения, влияя на общие трибологические свойства композиционного полимера.

Профессор Ю. К. Машков в учебном пособии [65] указывает на новое направление в физике – трибофизику, которая изучает процессы при особых условиях внешнего воздействия: теплового, химического, деформационного, электрического и т. д. Смежным направлением автор [65] выделяет триботехнологию, разрабатывающую методы получения требуемых характеристик при контактном взаимодействии деталей узлов.

И. В. Крагельский в [66] выдвигает молекулярно-механическую теорию трения: присутствующее в зоне контакта механическое сопротивление приводит к деформированию материала, помимо этого химические и физические изменения происходят в результате взаимодействия с окружающей средой. Молекулярная составляющая ориентирована на преодоление межмолекулярных связей.

В исследованиях И. В. Крагельского особое внимание уделяется межмолекулярному взаимодействию и природе пленок, согласно которой выделяются окисные пленки, пленки смазок или адсорбированные пленки газов. Межмолекулярные силы возникают в результате диффузии, увеличивая прочностные связи. В итоге И. В. Крагельский сформулировал представление о третьем теле, которое представляет собой продукты разрушения межмолекулярных связей, обеспечивающие градиент сдвигового сопротивления, что приводит к снижению коэффициента трения.

При исследовании формирования вторичных структур трибосопряжения был открыт эффект П. А. Ребиндера, закономерности которого существенно влияют на полимерные материалы. Адсорбируемые молекулы в процессе трения под давлением F (не более 10 ГПа) проникают в микроскопические трещины, и за счет сил Q те расширяются в своих размерах, что ведет к понижению прочности материала. Чаще всего используют полимерные материалы с наполнителями, которые снижают силы трения, что ведет к уменьшению влияния эффекта П. А. Ребиндера на материал.

Результаты исследований подтверждают, что в процессе трения микронеровности поверхности на воздухе мгновенно покрываются слоями окисных пленок и адсорбированных молекул газов, жирных веществ и воды. Чаще всего над этой поверхностью образуется оксидная пленка, влияющая на деформационные процессы в результате трения. Окислительная реакция железа ведет к формированию трех видов оксидов: 1) вюстита $Fe_{1-x}O$ – монооксида, представляющего собой нестехиометрическое соединение с недостатком атомов железа, устойчивого к деструкции при температуре выше $590\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2) гематита Fe_2O_3 – минерала железа, который при большом температурном диапазоне устойчив к разложению; 3) магнетита Fe_3O_4 (или $FeO \cdot Fe_2O_3$) – одного из самых распространенных оксидных минералов, имеющего высокую температуру плавления ($\sim 1957\text{ }^{\circ}\text{C}$). Оксиды играют ключевую роль в коррозии металлов и формировании ржавчины. Тяжелые условия эксплуатации оказывают существенное влияние на изменение структуры поверхности материалов.

Процесс убывания кислорода в оксидной пленке к поверхности железа можно описать следующей последовательностью: $Fe_2O_3 \rightarrow Fe_3O_4 \rightarrow Fe_3O_4 + Fe \rightarrow FeO \rightarrow Fe$. Различные адсорбированные слои, сформированные в результате трибосопряжения, имеют разную толщину в зависимости от характеристик окружающей среды. Например, конденсируемый на поверхности слой воды имеет толщину порядка $\sim 50\text{--}100$ молекулярных слоев. Смазочные материалы, такие как масла и гели, могут формировать более плотные слои на поверхности, обладающие толщиной от 1 до 7 мкм. Одной из наиболее тонких структур является адсорбированный слой паров и газов толщиной $\sim 0,2\text{--}2,5$ нм. При этом в зависимости от корреляции образовавшегося слоя к объему основного металла оксидная пленка испытывает напряжения сжатия или растяжения.

Таким образом, выделяемая тепловая энергия при фрикционном взаимодействии способствует образованию оксидных слоев, ускоряя окислительные процессы. Образование дополнительных контактных напряжений и микротрещин в поверхностном слое зависит от плотности оксидной пленки, обусловленной химическими свойствами материала с наполнителями.

В 1956 году Д. Н. Гаркунов и И. В. Крагельский открыли эффект безызносности: при смазывании спиртоглицериновым раствором на поверхностях узлов трения «сталь – бронза» образовывалась пленка меди толщиной 1–2 мкм, снижая износ и коэффициент трения [67–68]. Полученная медная пленка – пористая по своей структуре, частицы которой подвержены массовому переносу, не вызывая при этом сильных повреждений.

Исследования А. А. Кужарова и А. С. Кужарова основаны на оптимизации смазочных материалов, содержащих наноразмерные частицы меди [69–70] и являются главным примером самоорганизации при трении контактных поверхностей. С. А. Поляков в своей работе [71] считает, что самоорганизация не является достаточным условием для безыносного процесса, так как необходимо учитывать составы поверхностей узлов трения и смазочных материалов, а также скорость скольжения и нагрузочные режимы.

Известный бельгийским физик-теоретик, нобелевский лауреат в области химии И. Пригожин доказал неравновесность термодинамических систем, которые становятся «диссипативными структурами» при обмене энергией с окружающей средой. В [72] описал теорему о действии в стационарном режиме термодинамических сил на образование энтропии. Системы, имеющие противоположное состояние, описываются теоремой о минимуме производства энтропии. К примерам самоорганизации системы можно отнести реакцию Белоусова – Жаботинского, а также ячейки Рэля и ячейки Бенара.

Изучая теорию самоорганизации, Л. И. Бершадский пришел к выводу, что образование вторичных структур, которые будут обладать усталостной прочностью и прирабатываемостью, а также хорошей адгезией, возможно только при непосредственном трении [73–74].

В своих работах Б. И. Костецкий рассматривает структурную приспособляемость материалов как молекулярную перестройку в тонких слоях вторичных структур. Обобщенный принцип Ле Шателье – Брауна заключается в том, что самоорганизация значительно уменьшает влияние внешних факторов на систему, а также уменьшает интенсивность изнашивания при трении.

Н. А. Буше в своих исследованиях считает важным критерием устойчивую работу материалов в зоне контакта, то есть совместимость поверхностей при трении. При хорошей межмолекулярной связи меняется энтропия, и тем самым возникает диссипативная самоорганизация [75–76]. Дальнейшее развитие данного метода описано в работах [77–79]: снижение энтропии находится в прямой зависимости от интенсивности изнашивания.

В. Клатескі изучал процессы неравновесной термодинамики, из которых следует, что постоянно сообщаемая энергия при трении рассеивается, а также образование вторичных структур влияет на процесс приработки, увеличивая диссипативную самоорганизацию [80–82]. Если запаса энергии становится недостаточно для диссипации, тогда материал разрушается.

М. Nosonovsky самоорганизацию при трении рассматривает с термодинамической точки зрения: самоорганизация на макроуровне происходит за счет продуктов износа на микроуровне [83–85], что приводит к снижению коэффициента трения и износа.

Можно сделать вывод, что формирование вторичных структур при самоорганизации является завершающим этапом в процессе приработки материалов узлов трения. На сегодняшний день нет достаточной информации по выбору антифрикционных материалов, которые обладали бы оптимальными физико-химическими свойствами для конкретных узлов трения.

Процессами формирования фрикционного поверхностного слоя активно занимаются зарубежные [86–87] и российские [88–89] трибологические школы. Ученые из Белоруссии [90–91] исследуют свойства поверхностных слоев в зоне контакта толщиной 10–50 нм, а также образование вторичных структур как твердого, так и вязкотекучего состояния в зависимости от режимов [92–93]. Знание кинетики фрикционного переноса делает возможным создание информационной базы для композиционных материалов с различными наполнителями в зависимости от конструкционного назначения узлов трения. Главная цель научного поиска заключается в том, чтобы пленка переноса

обладала способностью к самоорганизации и самоуправлению, а также к деструкции при контакте полимера с металлом.

Изучение оптимальных методов модифицирования поверхности с помощью современных способов исследований дает максимально возможную информацию о формировании вторичных структур трибосопряжений «металл – полимер». Такие структуры способствуют улучшению адгезии при контактном взаимодействии. Использование диспергированных до наноразмерного состояния природных минералов является наиболее перспективным подходом для образования пленки переноса при металлополимерном контакте. Ранее уже отмечалось, что применение наполнителей для полимерных материалов меняет трибологические свойства поверхностного трибосопряжения за счет изменения молекулярной структуры слоев. Однако важную роль в исследовании вторичных структур играет сочетание результатов трибологических исследований с элементным составом. Ученые из школы Н. А. Буше впервые попытались связать результаты исследований с химической структурой контактных поверхностей, а с помощью теории самоорганизации и неравновесной термодинамики доказали снижение износа при наличии вторичных структур [94]. В настоящее время исследуются вторичные структуры с целью разработки новых износостойких композиционных материалов для различных областей применения. Некоторые из них включают создание токоъемных материалов [95], разработку покрытий для режущих инструментов [96] и оптимизацию материалов для подшипников скольжения [97]. Однако необходимо подробно изучить процесс разрыва молекулярных связей полимерного материала при контактном взаимодействии, а также хорошо взаимодействующих с металлом контртела атомных групп.

Анализ механизма формирования вторичных структур и их влияния на физико-механические свойства трибосопряжений позволил создать модель процесса фрикционного взаимодействия композиционного полимерного материала с металлом (рисунок 1.6).

При трении металлического штампа и модифицированного полимерного материала механические параметры, такие как частота вращательного или

возвратно-поступательного движения n , а также давление рабочей среды p , играют ключевую роль в определении скорости скольжения v и нагрузки P .

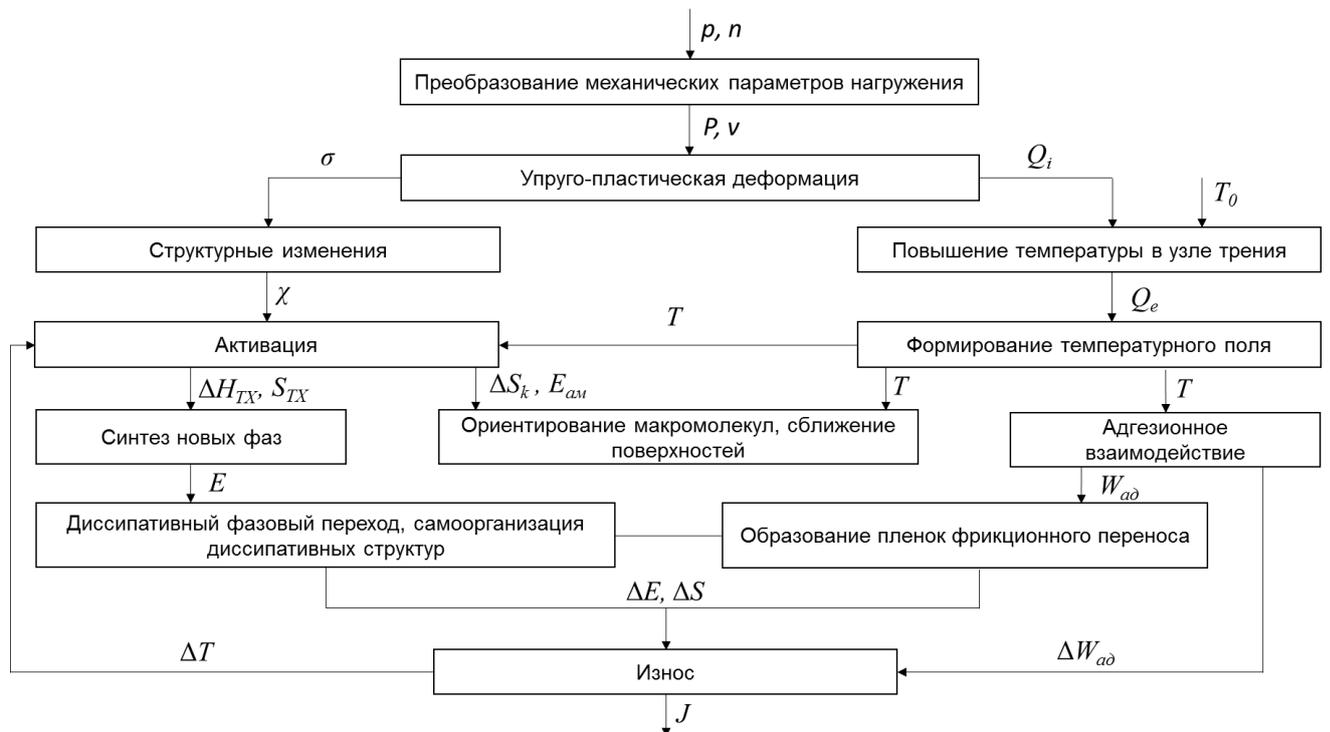


Рисунок 1.6 – Модель фрикционного взаимодействия композиционного полимерного материала с металлом

Уругопластическая деформация s полимерного композита сопровождается напряжением деформации σ , способствующим структурным преобразованиям за счет изменения матрицы композиционного материала χ . В результате вышеописанного процесса формируется пространственное распределение температуры и напряжений, что напрямую влияет на механические свойства композиционного материала. Установлена разница между тепловыделением Q_e и накопленным теплом Q_i . Параметры теплопроводности θ материалов, а также температура окружающей среды T_0 оказывают значительное влияние на разницу между тепловыделением Q_e и накопленным теплом Q_i материала. В условиях повышенной температуры и измененной конфигурационной энтропии S_k происходит активация триботехнических процессов (энергия активации) $E_{ам}$, способствующих перераспределению механических напряжений и повышению прочностных характеристик. Наступает момент, когда аморфное состояние

матрицы начинает демонстрировать свойства, схожие с полнокристаллическими материалами, но с сохраняющимися параметрами исходной структуры. Взаимодействие температурных изменений, структурных дефектов, энтропии $S_{ТХ}$, трибохимических реакций $\Delta H_{ТХ}$ ведет к возникновению новых структурных фаз с уникальными свойствами, способными адаптироваться под определенные эксплуатационные условия.

В процессе трения происходит изменение контактной поверхности, создавая новую слоистую структуру за счет химических и вандерваальсовых связей с энергией $W_{ад}$. Благодаря хорошей адгезионной прочности на микронеровностях пары трения «композит – металлический штамп» происходит перенос фрагментов композиционного материала на металлическое контртело. При контактном трибосопряжении частицы модификатора активно взаимодействуют с поверхностью металла, заполняя все микронеровности и образуя невидимую тонкую пленку, которая является результатом этого процесса переноса.

При фрикционном взаимодействии накопленная энергия E приходит в неравновесное состояние, осуществляя диссипативный фазовый переход (ДФП). Постоянно сообщаемая энергия рассеивается, увеличивая самоорганизацию. При достижении критических значений изменения энергии ΔE и энтропии ΔS происходит разрушение и износ J пленки переноса, и обмен с окружающей средой продуктами износа. Открытые новые участки при трении вступают в адгезионное взаимодействие с полимерным композиционным материалом. Процесс разрушения и восстановления вторичной структуры цикличен.

Ранее было отмечено, что политетрафторэтилен (ПТФЭ) обладает хорошими антифрикционными свойствами, способствующими образованию высокоориентированной пленки на металлополимерном сопряжении. Однако прочностные свойства ПТФЭ в тяжелонагруженных узлах трения ограничены, поэтому для повышения физико-механических параметров ее следует применять исключительно в качестве наполнителя полимерного материала. На сегодняшний день, применяя различные методы модифицирования, в качестве полимерной матрицы чаще всего используют эпоксидные связующие, фенилон,

алифатический полиимид [98–99]. Наличие модификаторов способствует увеличению кислородосодержащих групп $-\text{OH}$, $-\text{C}=\text{N}$, улучшая химическое взаимодействие материалов трибосопряжения.

Использование фторопласта в полимерном композите в качестве антифрикционного материала обеспечивает самосмазывание контактных поверхностей, однако низкая адгезия не удовлетворяет эксплуатационным требованиям узлов трения [100]. Поэтому в матрице используются различные связующие: полиимидные, эпоксидные, кремнийорганические, фенолоформальдегидные, полиэфирные, цианакрилатные и т. д. [101–103]. Например, модифицированные термостойким каучуком фенолоформальдегидные смолы чаще всего применяются в качестве связующего материала за счет хорошей термостойкости.

Процесс изнашивания композиционного покрытия в узле трения в ходе эксплуатации развивается в следующей последовательности:

1. В период приработки поверхностей трибосопряжения за счет усталостных процессов частицы связующего материала отделяются.

2. Антифрикционные фторопластовые наполнители вступают в контакт с металлическим контртелом.

3. Изнашивание полимерного композиционного материала происходит за счет адгезионного переноса.

4. Сформированная вторичная структура толщиной 2–3 мкм содержит только фторопласт. При этом образованная пленка переноса то разрушается, то образуется вновь.

Толщина пленки переноса ПТФЭ может достигать 40 нм и выполнять функцию смазки, но из-за слабой адгезии она не является сплошным слоем [104–105]. Перенос ПТФЭ на контртело в процессе фрикционного взаимодействия увеличивает ресурс материала на 10–25 %.

При критическом износе материала резко возрастают температура, коэффициент трения и контактные напряжения. При этом весь объем ПТФЭ в полимерном композите полностью расходуется, и на поверхность выходит

металлический субстрат. У полимеров с низкой усталостной прочностью данный процесс может происходить достаточно быстро.

Спектральный анализ вторичных структур показал, что результате термоокислительной реакции происходит деструкция материала (перенесение молекул фторопласта) [106–109]. В работе [110] указано, что в морской воде вымывание частиц износа ведет к снижению износостойкости подшипников с покрытием на 71–75 %.

Изучая процесс формирования вторичных структур композиционного полимерного материала, можно сделать вывод, что разрушение ПТФЭ при трении, с одной стороны, ускоряет адгезию за счет образования активных радикалов, а с другой – затрудняет ее вследствие создания низкомолекулярных участков. Также можно отметить, что изнашивание полимерного материала с применением ПТФЭ в качестве наполнителя ведет к нарушению химических и межатомных связей.

Анализ литературы показал, что модифицированным эпоксидным полимерам посвящено большое количество работ, а процессами формирования вторичных структур занимаются лучшие школы в области трения и износа. Однако разработка методов направленного регулирования не полностью реализована, поэтому и является первостепенной задачей современных исследований.

1.4 Выводы по главе 1

Анализируя результаты исследований в области трения и износа поверхностей трибосистем, можно сделать следующие выводы, а также определить основные направления в работе:

1. Управлять фрикционными свойствами и снизить износ материалов можно в результате введения в полимерную матрицу механоактивированных мелкодисперсных частиц, влияющих на процессы химических превращений в зоне трибоконтакта.

2. Свойства полимерных композиционных материалов напрямую зависят от физико-химических свойств всех составляющих, а также от температуры отверждения. К перспективным методам модифицирования поверхностей следует отнести применение износостойких и антифрикционных покрытий.

3. Тепловая энергия при фрикционном взаимодействии способствует образованию оксидных слоев. Образование дополнительных контактных напряжений и микротрещин в поверхностном слое зависит от плотности оксидной пленки, обусловленной химическими свойствами материала с наполнителями.

4. Добавление смешанных оксидов (например, структур типа шпинели) в качестве наполнителей в полимеры повышает трибологические свойства полученного материала в несколько раз.

5. Определение величины и распределения тепловых потоков в металлополимерных трибосистемах позволит выявить степень влияния температуры на пару трения в трибосопряжении.

6. Физико-механические характеристики зависят от температурных факторов (температурный градиент, температура) при фрикционном взаимодействии поверхностей трибосопряжения.

7. Процесс самоорганизации как один из видов избирательного переноса способствует снижению сил трения и интенсивности износа в условиях контактного взаимодействия несмазываемых металлополимерных узлов.

8. Изнашивание полимерного материала с применением ПТФЭ в качестве наполнителя ведет к нарушению химических и межатомных связей. Разрушение ПТФЭ при трении ускоряет адгезию за счет образования активных радикалов, а также затрудняет сцепление вследствие создания низкомолекулярных участков.

9. Формирование вторичных структур при самоорганизации является завершающим этапом в процессе приработки материалов узлов трения.

10. Исследование механизма образования вторичных структур при контактном взаимодействии поверхностей деталей узлов трения позволит создать

базу по разработке методов направленного регулирования свойств эпоксидных композитов.

1.5 Цели и задачи исследования

В последние годы стоимость ремонта и обслуживания машин, работающих в особо тяжелых условиях, может составлять до 25 % от их стоимости. Причиной значительного снижения ресурса эксплуатации техники является интенсивный износ деталей машин, который может достигать до 85 %.

Умение применять знания физико-механических и трибологических свойств различных материалов позволяет сократить расходы на ремонт и реставрацию поверхностей трения.

Все шире в ремонтном производстве применяются технологии восстановления направляющих скольжения металлорежущих станков при использовании композиционных материалов. Введение наполнителей в полимерную матрицу дает возможность получать материалы с улучшенными свойствами, а также проявлять стойкость к повышению температуры.

В результате применение новых композитов при ремонте тяжело нагруженных узлов трения путем восстановления поврежденных или изношенных поверхностей является наиболее перспективным методом. Примером композита, способного восстанавливать направляющие металлорежущего станка, является полимерный материал Moglice немецкой компании Diamant [111]. Данный материал прошел трибологические испытания в условиях сухого трения при возвратно-поступательном движении и показал положительные результаты. Однако его использование в направляющих металлорежущего станка предполагает значительные финансовые затраты, что является экономически невыгодным.

В связи с этим необходимо провести исследования нового композиционного материала, предназначенного для ремонтного производства путем восстановления

поврежденных или изношенных поверхностей направляющих скольжения металлорежущих станков.

Целью исследования является расширение области применения модифицированных функциональных полимерных материалов, используемых при восстановлении поверхности тяжело нагруженных узлов трения, путем установления основных закономерностей физико-химических процессов, происходящих в зоне их трения.

Поставленная цель требует решения следующих задач:

1. Разработать конечно-элементную модель узла трения «накладка направляющей поворотного стола – станина станка».

2. Подобрать качественный и количественный состав мелкодисперсных модификаторов и исследовать их влияние на эксплуатационные характеристики трибосистемы.

3. Установить кинетику образования вторичных структур и их влияние на трибологические свойства композита.

4. Провести верификацию теоретических разработок на основе результатов экспериментальных исследований.

5. Определить основные рекомендации по применению полученного композиционного материала по результатам промышленных испытаний.

Глава 2. ПЛОСКАЯ КОНТАКТНАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ ДВУХСЛОЙНОЙ ПОЛОСЫ ПРИ УЧЕТЕ ТЕПЛОВЫДЕЛЕНИЯ В ЗОНЕ КОНТАКТА

В области машиностроения проблемы контактных взаимодействий играют ключевую роль, так как контакт является основным методом взаимодействия элементов механизмов машин. Контактное давление влияет на прочность и долговечность конструкции и тем самым определяет основные условия фрикционного взаимодействия тяжело нагруженных узлов трения.

Активно развивающейся областью механики сплошных сред является механика контактных взаимодействий деформируемых твердых тел. Это объясняется тем, что распределение контактного давления между взаимодействующими деталями механизмов заранее неизвестно. Картина распределения напряжений и деформаций, возникающих вследствие контактных взаимодействий, может быть сформирована в результате решения специфических задач, которые называются контактными [112–115].

Развиваемые методы теории контактных задач позволяют определить места концентрации напряжений, контактную жесткость, учитывающую деформацию неровностей, находящихся на поверхности взаимодействующих тел. Часто при контактировании происходит термическое воздействие – в этом случае при решении контактных задач необходимо определение температурного поля в телах [116–120].

Исследованиями М. В. Коровчинского [121–124] отмечена особая роль при рассмотрении процессов решения контактных задач термоупругости при тепловыделении от трения в зоне контакта. При этом предполагается, что в области контакта происходит выделение тепла, а мощность трения при относительном скольжении тел пропорциональна количеству тепла, передаваемого в контактирующие тела. Соответствующая задача приводит к необходимости решения термоупругой контактной задачи.

В отличие от других контактных задач, здесь заранее не известны распределения внутри области контакта и на ее границах не только перемещений и напряжений, но и температур и тепловых потоков, а известны лишь некоторые смешанные краевые условия, которым должны удовлетворять функции, входящие в уравнения термоупругости и теплопроводности для каждого из соприкасающихся тел.

2.1 Математическая постановка контактной задачи при движении жесткого штампа по упругому основанию

Поскольку исследуемый материал предполагается использовать при восстановлении горизонтально-расточных станков с неподвижной передней стойкой, то необходимо рассмотреть их кинематическую схему (рисунок 2.1).

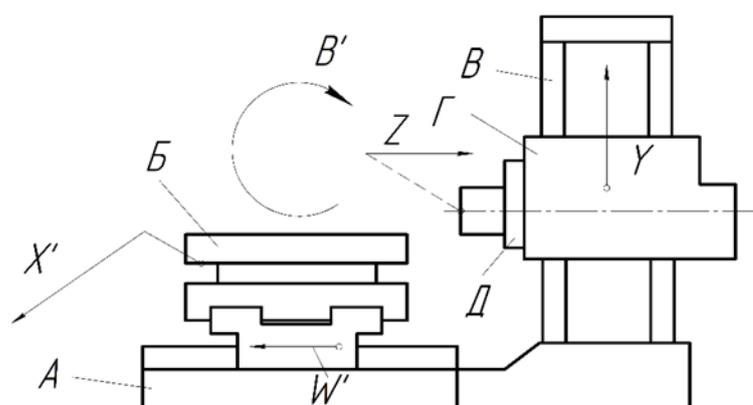


Рисунок 2.1 – Кинематическая схема горизонтально-расточного станка с неподвижной передней стойкой

Станок имеет неподвижную станину А, на которой расположены передняя стойка В и поворотный стол Б. Для обеспечения перемещения стола относительно станины направляющие стола имеют накладки, позволяющие уменьшить трение стола о станину. Именно для восстановления этих накладок и планируется использовать разрабатываемый материал. С механической точки зрения силовое взаимодействие в рассматриваемом узле трения обратимо. Поэтому в качестве

математической модели узла будем рассматривать контактную задачу о скольжении с постоянной скоростью V жесткого штампа по границе двухслойной полосы, жестко сцепленной с недеформируемым основанием [125]. Нижний слой полосы представляет собой тонкий слой нанесенного на подложку адгезива для обеспечения сцепления между основанием и верхним слоем. Верхний слой – покрытие из рассматриваемого модифицированного полимерного композита.

В работе [126] было установлено, что процессы, происходящие при трении вязкоупругого материала, можно описать упругими характеристиками, то есть введенные уравнения вязкоупругого тела удовлетворяют уравнениям равновесия деформаций, а также закону Гука для изотропного упругого тела. Поэтому явления, отмечаемые при фрикционном взаимодействии вязкоупругой двухслойной полосы и металлического основания, могут быть объяснены с помощью модели упругого тела.

Рассмотрим контактную задачу теории упругости о действии жесткого штампа на изотропный упругий двойной слой толщиной $h_1 + h_2$ (рисунок 2.2).

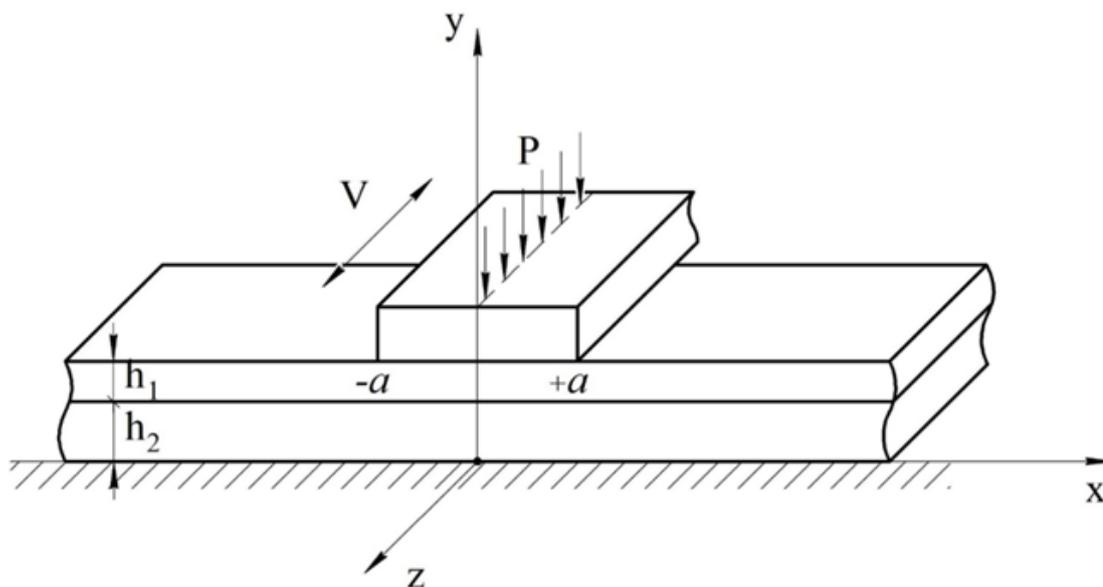


Рисунок 2.2 – Контактное взаимодействие жесткого штампа и изотропного упругого двойного слоя

Штамп прижимается вертикальной силой P и движется в направлении перпендикулярном плоскости чертежа с постоянной скоростью V . Зона штампа и полосы ограничена $|x| \leq a$. Будем считать, что толщина слоя мала по сравнению с размером зоны контакта ($h \ll 2a$, $h = h_1 + h_2$). Рассматривается установившийся квазистационарный режим:

$$\int_{-a}^a q(x) dx = P,$$

где $q(x)$ – контактное давление.

В зоне контакта возникают силы трения $\tau_{yz}(x)$, часть работы которых ($A_1 = \eta_1 A$) идет на образование тепловых потоков ($Q_1(x), Q_{ш}(x)$), направленных соответственно вглубь слоя и штампа. Действие вертикальной силы P вызывает осадку штампа δ . Силы трения $\tau_{yz}(x)$ связаны с контактным давлением $q(x)$ законом трения Кулона [127]:

$$\tau_{yz}(x) = f \cdot q(x),$$

где f – коэффициент кулоновского трения, зависящий от степени шероховатости поверхностей и механических характеристик тел.

Материалы двухслойной полосы имеют упругие характеристики: модуль упругости E_i , коэффициент Пуассона ν_i , коэффициенты Ламе $\mu_i; \lambda_i$ ($i=1,2$ для нижнего и верхнего слоев соответственно).

Поверхность полосы вне штампа свободна от напряжений. На границе слоев задано равенство напряжений и перемещений, нижняя поверхность полосы жестко закреплена. На границе между штампом и двухслойной полосой происходит превращение основного количества механической энергии в теплоту: тепловой поток под контртелом пропорционален работе сил трения:

$$Q(x) = \eta_1 \cdot \tau_{yz}(x) \cdot V,$$

где η_1 – коэффициент, характеризующий количество механической энергии, переходящей в тепло (далее будем считать $\eta_1 = 1$).

При переходе через границу слоев температура и тепловой поток непрерывны. На верхней и нижней поверхностях задан конвективный теплообмен с окружающей средой:

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y} + \alpha_{T1} (T_1 - T_*),$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y} + \alpha_{T2} (T_2 - T_{2*}),$$

где λ_1 и λ_2 – коэффициенты теплопроводности;

α_{T1} и α_{T2} – коэффициенты теплоотдачи первого и второго слоев полосы.

Требуется определить распределение температуры и контактного давления между взаимодействующими деталями конструкции.

Поставленная задача сводится к совместному решению термоупругих уравнений Дюгамеля – Неймана и стационарного уравнения теплопроводности:

$$\begin{aligned} (\lambda_i + \mu_i) \frac{\partial \theta_i}{\partial x_i} + \mu_i \Delta U_i - k_i \alpha_{Ti} \frac{\partial T_i}{\partial x_i} &= 0, \\ (\lambda_i + \mu_i) \frac{\partial \theta_i}{\partial y_i} + \mu_i \Delta V_i - k_i \alpha_{Ti} \frac{\partial T_i}{\partial y_i} &= 0, \\ \frac{\partial^2 T_i}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y_i^2} &= 0, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где U_i, V_i – горизонтальные и вертикальные перемещения;

$k_i = 2\mu_i + 3\lambda_i = \frac{E_i}{1 - 2\nu_i}$ – утроенный модуль объемного сжатия;

α_{Ti} – коэффициент теплоотдачи;

T_i – температура деформированного состояния;

$\theta_i = \frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \frac{\partial V_i}{\partial y_i}$ – объемное расширение.

Для решения и преобразования системы запишем уравнения в перемещениях (уравнения Ламе с температурными параметрами) и уравнения теплопроводности для двухслойной полосы:

$$\begin{aligned} \frac{2(1-\nu_i)}{1-2\nu_i} \cdot \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial y_i^2} + \frac{1}{1-2\nu_i} \cdot \frac{\partial^2 V_i}{\partial x_i \partial y_i} - \frac{2(1+\nu_i)}{1-2\nu_i} \cdot \alpha_{T_i} \cdot \frac{\partial T_i}{\partial x_i} &= 0, \\ \frac{2(1-\nu_i)}{1-2\nu_i} \cdot \frac{\partial^2 V_i}{\partial y_i^2} + \frac{\partial^2 V_i}{\partial x_i^2} + \frac{1}{1-2\nu_i} \cdot \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial y_i} - \frac{2(1+\nu_i)}{1-2\nu_i} \cdot \alpha_{T_i} \cdot \frac{\partial T_i}{\partial y_i} &= 0, \\ \frac{\partial^2 T_i}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y_i^2} &= 0, \quad (i = 1, 2), \end{aligned} \quad (2.2)$$

с тремя сериями граничных условий:

1. Жесткая заделка на нижней границе: $x \in (-\infty; +\infty)$, $y = 0$:

$$U_2 = V_2 = 0, \quad \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial y_2} + \alpha_{T_2} (T_2 - T_{2*}) = 0. \quad (2.3)$$

2. Непрерывность напряжений и перемещений, а также температуры и температурного градиента на границе слоев: $x \in (-\infty; +\infty)$, $y = h_2$:

$$U_1 = U_2, \quad V_1 = V_2, \quad \tau_{yz}^1 = \tau_{yz}^2, \quad \sigma_y^1 = \sigma_y^2, \quad T_1 = T_2, \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y_1} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y_2}. \quad (2.4)$$

3. Для верхнего слоя в зоне контакта: $x \in [-a; +a]$, $y = h_1 + h_2$:

$$V_1 = -\delta, \quad \tau_{xz}^1 = 0, \quad \frac{\partial T_1}{\partial y_1} = -\eta_1 \cdot Q_1(x), \quad (2.5)$$

и вне зоны контакта $x \in (-\infty; -a) \cup (+a; +\infty)$, $y = h_1 + h_2$:

$$\tau_{yz}^1 = \sigma_y^1 = 0, \quad \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial y_1} + \alpha_{T_1} (T_1 - T_{1*}) = 0. \quad (2.6)$$

В силу предположения о малости толщины полосы построим вырожденное асимптотическое решение задачи.

2.2 Асимптотическое решение плоской контактной задачи для двухслойной упругой полосы при учете тепловыделения в зоне контакта

Асимптотические методы служат для упрощения постановки и решения задач математического моделирования. В таких случаях асимптотические методы часто позволяют найти приближенное решение с нужной точностью. Разложение решения по степеням малого параметра – один из наиболее употребительных асимптотических методов.

Асимптотическое решение контактной задачи делится на три этапа [128]:

1. Выбор (или введение) малых (больших) параметров.
2. Асимптотическое упрощение, достигнутое в результате предельного перехода.
3. Оценка погрешности.

Введем в рассмотрение безразмерные геометрические параметры $\varepsilon_i = \frac{h_i}{a}$, которые в силу условия, что толщина слоев мала по сравнению с размером зоны контакта, являются малыми, и в окончательных уравнениях устремим их к нулю. Введем новые переменные x_i, y_i :

$$\begin{aligned}
 x &= 2ax_i - a, & y &= -hy_i, \\
 dx &= 2adx_i, & dy &= -hdy_i, \\
 \frac{dx_i}{dx} &= \frac{1}{2a}, & \frac{dy_i}{dy} &= -\frac{1}{h}
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

и перейдем к ним в уравнениях Ламе с температурными параметрами и уравнениях теплопроводности для двухслойной полосы, а также в сериях граничных условий.

Асимптотическое решение плоской контактной задачи сводится к преобразованию уравнений (2.2) с помощью переменных (2.7) и следующих выражений [129]:

$$\begin{aligned} U(x, y) &= U_{0i}(x, y) + \varepsilon_i U_{1i}(x, y) + O_i(\varepsilon_i^2), \\ V(x, y) &= V_{0i}(x, y) + \varepsilon_i V_{1i}(x, y) + O(\varepsilon_i^2), \\ T(x, y) &= T_{0i}(x, y) + \varepsilon_i T_{1i}(x, y) + O(\varepsilon_i^2), \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} \frac{2(1-\nu_i)}{1-2\nu_i} \cdot \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i^2} \cdot \frac{h^2}{4a^2} + \frac{\partial^2 U_i}{\partial y_i^2} - \frac{1}{1-2\nu_i} \cdot \frac{\partial^2 V_i}{\partial x_i \partial y_i} \cdot \frac{h}{2a} - \frac{2(1+\nu_i)}{1-2\nu_i} \cdot \alpha_{Ti} \cdot h \cdot \frac{h}{2a} \cdot \frac{\partial T_i}{\partial x_i} &= 0, \\ \frac{2(1-\nu_i)}{1-2\nu_i} \cdot \frac{\partial^2 V_i}{\partial y_i^2} + \frac{\partial^2 V_i}{\partial x_i^2} \cdot \frac{h^2}{4a^2} - \frac{1}{1-2\nu_i} \cdot \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_i \partial y_i} \cdot \frac{h}{2a} + \frac{2(1+\nu_i)}{1-2\nu_i} \cdot \alpha_{Ti} \cdot h \cdot \frac{\partial T_i}{\partial x_i} &= 0, \\ \frac{\partial^2 T_i}{\partial x_i^2} \cdot \frac{h^2}{4a^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y_i^2} &= 0. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Так как толщина упругой полосы мала по сравнению с зоной контакта, то вырожденное асимптотическое решение контактной задачи (нулевое приближение) может быть представлено следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 U_i}{\partial y_i^2} &= 0, \\ \frac{\partial^2 V_i}{\partial y_i^2} - \gamma_i \cdot \frac{\partial T_i}{\partial y_i} &= 0, \\ \frac{\partial^2 T_i}{\partial y_i^2} &= 0, \end{aligned} \quad (2.10)$$

где $\gamma_i = \frac{1+\nu_i}{1-\nu_i} \cdot \alpha_{Ti} h$,

с двумя сериями граничных условий:

$$1. \ x \in [-1; +1] \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned}
U_2 = V_2 = 0|_{y_2=0}, \quad \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial y_2} - \alpha_{T_2} h_2 (T_2 - T_{2*}) = 0|_{y_2=0}, \\
V_1 = -\delta|_{y_1=1}, \quad \tau_{yz}^1 = \frac{\mu_1}{h_1} \cdot \frac{\partial U_1}{\partial y_1} = 0|_{y_1=1}, \quad \frac{\partial T_1}{\partial y_1} = -Q(x)|_{y_1=1}, \\
U_1 = U_2|_{y_1=1, y_2=0}, \quad V_1 = V_2|_{y_1=1, y_2=0}, \quad T_1 = T_2|_{y_1=1, y_2=0}, \\
\lambda_1 h_2 \left[\frac{\partial V_1}{\partial y_1} \left(1 + \frac{1-2\nu_1}{\nu_1} \right) + \frac{1+\nu_1}{\nu_1} \alpha_{T_1} T_1 h_1 \right] = \\
= \\
= \lambda_2 h_1 \left[\frac{\partial V_2}{\partial y_2} \left(1 + \frac{1-2\nu_2}{\nu_2} \right) + \frac{1+\nu_2}{\nu_2} \alpha_{T_2} T_2 h_2 \right] |_{y_1=1, y_2=0}, \\
\frac{\mu_1}{h_1} \cdot \frac{\partial U_1}{\partial y_1} = \frac{\mu_2}{h_2} \cdot \frac{\partial U_2}{\partial y_2} |_{y_1=1, y_2=0}, \quad \lambda_1 h_2 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial y_1} = \lambda_2 h_1 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial y_2} |_{y_1=1, y_2=0},
\end{aligned}$$

$$2. x \in (-\infty; -1) \cup (+1; +\infty) \tag{2.12}$$

$$\begin{aligned}
U_2 = V_2 = 0|_{y_2=0}, \quad \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial y_2} - \alpha_{T_2} h_2 (T_2 - T_{2*}) = 0|_{y_2=0}, \\
\tau_{yz}^1 = \frac{\mu_1}{h_1} \cdot \frac{\partial U_1}{\partial y_1} = 0|_{y_1=1}, \quad \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial y_1} + \alpha_{T_1} h_1 (T_1 - T_{1*}) = 0|_{y_1=1} \\
\frac{\nu_1}{1-2\nu_1} \cdot \frac{\partial V_1}{\partial y_1} + \frac{\partial V_1}{\partial y_1} + \frac{1+\nu_1}{1-2\nu_1} \cdot \alpha_{T_1} \cdot \frac{\partial T_1}{\partial y_1} = 0|_{y_1=1}, \\
U_1 = U_2|_{y_1=1, y_2=0}, \quad V_1 = V_2|_{y_1=1, y_2=0}, \quad T_1 = T_2|_{y_1=1, y_2=0}, \\
\lambda_1 h_2 \left[\frac{\partial V_1}{\partial y_1} \left(1 + \frac{1-2\nu_1}{\nu_1} \right) + \frac{1+\nu_1}{\nu_1} \alpha_{T_1} T_1 h_1 \right] = \\
= \lambda_2 h_1 \left[\frac{\partial V_2}{\partial y_2} \left(1 + \frac{1-2\nu_2}{\nu_2} \right) + \frac{1+\nu_2}{\nu_2} \alpha_{T_2} T_2 h_2 \right] |_{y_1=1, y_2=0}, \\
\frac{\mu_1}{h_1} \cdot \frac{\partial U_1}{\partial y_1} = \frac{\mu_2}{h_2} \cdot \frac{\partial U_2}{\partial y_2} |_{y_1=1, y_2=0}, \quad \lambda_1 h_2 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial y_1} = \lambda_2 h_1 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial y_2} |_{y_1=1, y_2=0}.
\end{aligned}$$

2.3 Аналитическое представление вырожденного решения плоской контактной задачи для двухслойной полосы при учете тепловыделения в зоне контакта

В работе [130] для тонкого покрытия предложен метод построения вырожденного решения поставленной задачи. Решение (2.10), (2.11) и (2.12) представим в виде формул, выражающих распределение температуры и перемещений по толщине двухслойного основания:

$$\begin{aligned} T_1 &= c_1 y_1 + c_2, & T_2 &= a_1 y_2 + a_2, & U_1 &= U_2 = 0, \\ V_1 &= -\frac{1}{2} \gamma_1 y_1^2 c_1 + c_5 y_1 + c_6, & V_2 &= -\frac{1}{2} \gamma_2 y_2^2 a_1 + a_5 y_2 + a_6, \end{aligned} \quad (2.13)$$

где $\gamma_i = \frac{1 + \nu_i}{1 - \nu_i} \alpha_T h_i$.

Входящие в (2.13) коэффициенты a_i и c_i получены с помощью программы аналитических вычислений Maple [131]. Распределение температуры верхнего слоя с учетом коэффициентов представлено в виде:

$$T_1(x, y) = \eta_1 q(x)(h_2 - y) + \eta_1 \lambda_1 (\alpha_{T2} h_2 + \lambda_2) \frac{\alpha_{T2} h_2 + \lambda_2}{\alpha_2 \lambda_2} q(x) + \Phi(x), \quad (2.14)$$

где $\Phi(x)$ – распределение температуры в зоне фрикционного контакта.

Упругие перемещения на поверхности трения выразим из полученного решения термоупругой контактной задачи:

$$V_1(x, y) = -\frac{1}{2} \gamma_1 \left(\frac{h_1 - y}{h_1} \right)^2 c_1 + c_5 \left(\frac{h_1 - y}{h_1} \right) + c_6.$$

Связь между перемещением точек и контактным давлением будет выражаться формулой:

$$V_1(x, y) = -\psi q(x) - \Phi(x)(\gamma_1 + \gamma_2), |x| \leq 1, \quad (2.15)$$

где

$$\psi = \left[\frac{\lambda_1}{\alpha_2}(\gamma_1 + \gamma_2) + \frac{\alpha_2}{\lambda_2}(\gamma_1 h_1 \lambda_2 - \gamma_2 h_2 \lambda_1) \right] \eta_1 - \frac{s_1 + s_2}{s_2 s_2}. \quad (2.16)$$

Двухслойное основание в рамках рассмотренной модели ведет себя как основание Фусса – Винклера с добавлением температурных членов [132–134]. Коэффициенты, не зависящие от температуры, представлены в следующем виде:

$$\frac{s_1 + s_2}{s_2 s_2} = \frac{h_1(1 - 2\nu_1)}{2\lambda_1(1 - \nu_1)} + \frac{h_2(1 - 2\nu_2)}{2\lambda_2(1 + \nu_2)}.$$

Преобразовав (2.16), получим окончательное выражение, связывающее упругие перемещения под металлическим контртелом с нанесенным упругим двухслойным покрытием с контактным давлением:

$$V_1(x, y) = - \left[\frac{\lambda_1}{\alpha_2}(\gamma_1 + \gamma_2) + \frac{\alpha_2}{\lambda_2}(\gamma_1 h_1 \lambda_2 - \gamma_2 h_2 \lambda_1) \right] \eta_1 q(x) + \left[\frac{h_1(1 - 2\nu_1)}{2\lambda_1(1 - \nu_1)} + \frac{h_2(1 - 2\nu_2)}{2\lambda_2(1 + \nu_2)} \right] q(x) - \Phi(x)(\gamma_1 + \gamma_2). \quad (2.17)$$

Так как упругие перемещения зависят от осадки и формы контактирующей поверхности, то контактное давление из (2.17) можно представить как:

$$q(x) = \frac{\Phi(x)((\gamma_1 + \gamma_2) - \delta)}{\left(\frac{h_1(1 - 2\nu_1)}{2\lambda_1(1 - \nu_1)} + \frac{h_2(1 - 2\nu_2)}{2\lambda_2(1 + \nu_2)} \right) - \left(\frac{\lambda_1}{\alpha_2}(\gamma_1 + \gamma_2) + \frac{\alpha_2}{\lambda_2}(\gamma_1 h_1 \lambda_2 - \gamma_2 h_2 \lambda_1) \right) \eta_1}. \quad (2.18)$$

Дальнейшее решение контактной задачи было продолжено с применением конечно-элементного моделирования в программном комплексе ANSYS.

2.4 Конечно-элементное моделирование контактного взаимодействия двухслойного покрытия при учете тепловыделения в зоне контакта

На сегодняшний день современная наука широко применяет математические модели (ММ) для построения и анализа конкретных задач. Особенностью данного метода является замена исходного объекта его ММ и дальнейшее ее изучение с помощью реализуемых на компьютерах вычислительно-логических алгоритмов [135–136]. Исследование объекта через его модель позволяет быстро и без существенных затрат изучить его характеристики и поведение в различных обстоятельствах, не взаимодействуя с ним непосредственно [137].

Рассматривается пространственная задача о контакте штампа с двухслойной полосой конечных размеров:

1. Двухслойная полоса: $x \in \left(-\frac{L_1}{2}; \frac{L_1}{2}\right), y \in (0; h_1 + h_2 - \delta), z \in (-b; +b)$.

2. Штмп: $x \in \left(-\frac{L_2}{2}; \frac{L_2}{2}\right), y \in (h_1 + h_2 - \delta; h_1 + h_2 - \delta + h_u), z \in (-a; +a)$.

Нижняя поверхность двухслойной полосы жестко закреплена $y = 0$. Штмп прижимается вертикальной силой P и движется в направлении, перпендикулярном плоскости чертежа, с постоянной скоростью V (рисунок 2.3). Зона контакта полосы и металлического штампа ограничена $|x| \leq a$. На поверхности полосы в области контакта со штампом возникает «третье тело» (промежуточный слой), при этом сама поверхность контртела не изнашивается.

Для решения тепловой задачи используется стационарное уравнение теплопроводности $\Delta T = 0$. В результате контактного взаимодействия под контртелом с нанесенным двухслойным покрытием возникают силы трения $\tau_{yx}(x)$, работа которых идет на образование тепловых потоков $Q_1(x)$ и $Q_{ш}(x)$, направленных соответственно вглубь слоя и металлического основания [138–139].

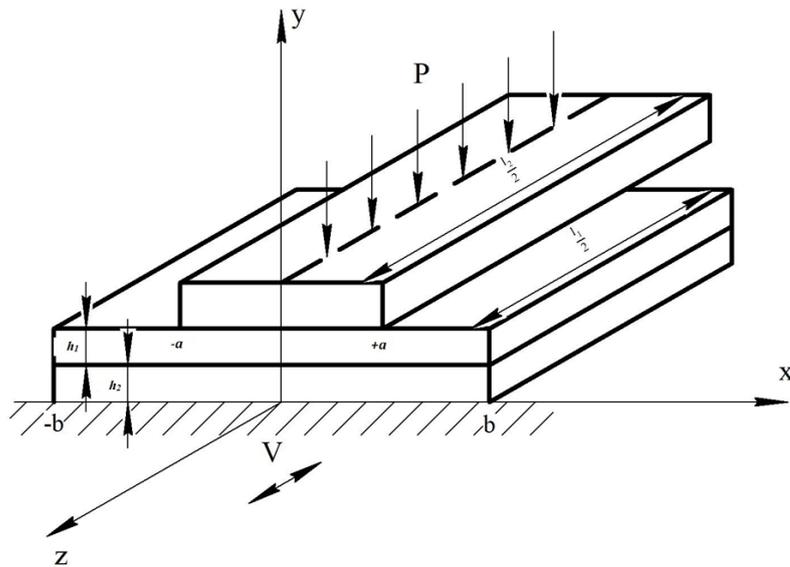


Рисунок 2.3 – Постановка пространственной задачи связанной термоупругости

Материал полосы имеет упругие характеристики: модуль упругости E_i , коэффициент Пуассона ν_i , коэффициенты Ламе μ_i и λ_i . При переходе через границу слоев температура и тепловой поток непрерывны. На верхней и нижней поверхностях вне зоны контакта задан конвективный теплообмен с окружающей средой.

Численное решение контактной задачи осуществлено на основе программы, написанной на макроязыке APDL ANSYS [140–142]. Тестирование проводилось на основании полученных выше результатов численно-аналитического решения.

На рисунке 2.4 представлена модель конечно-элементного разбиения пространственной задачи термоупругости с учетом геометрической симметрии. В соответствии с методологией решения контактных задач при построении конечно-элементной сетки обеспечивалось сгущение разбиения вблизи области контакта. Для этого дополнительно строилась подобласть, для которой задавалось уменьшение размера конечного элемента при приближении к центру области контакта. При построении конечно-элементной модели использовались объемные конечные элементы SOLID226 с опцией симметрии. Контактная пара задавалась контактными элементами CONTA174 со специальным набором опций, обеспечивающих сходимость алгоритма расчета, и ответными элементами TARGE170.

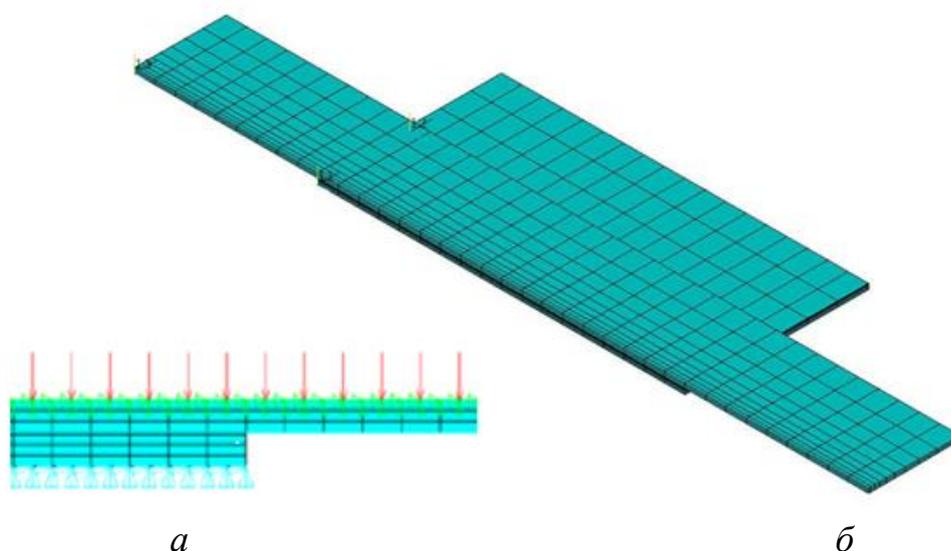


Рисунок 2.4 – Разбиение зоны трибоконтакта сеткой конечных элементов с учетом геометрической симметрии:

a – плоское представление задачи вдоль оси OZ ;

б – пространственное представление задачи

Исходные данные для расчета и полученные результаты представлены в главе 5.

2.5 Выводы по главе 2

1. Рассматриваемая контактная задача о действии металлического контртела по нанесенному упругому двойному слою сводится к решению термоупругих уравнений Дюгамеля – Неймана и стационарного уравнения теплопроводности.

2. Построено асимптотическое решение поставленной задачи. Показано, что двухслойное основание в рамках рассмотренной модели ведет себя как основание Фусса – Винклера с добавлением температурных членов.

3. С целью получения численных результатов была предложена конечно-элементная модель рассматриваемой задачи в программном комплексе ANSYS.

4. Результаты определения температуры и напряженно-деформированного состояния в зоне действия, а также сходимость теоретического анализа с экспериментальными исследованиями представлены в главе 5.

Глава 3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

При высоких нагрузках контактного взаимодействия пары трения целесообразно выбирать модифицированные композиционные материалы. При изучении закономерностей влияния параметров внешних воздействий на трибологические характеристики материалов устанавливаются оптимальные концентрационные соотношения компонентов с точки зрения минимизации трения [143].

В данной главе подробно описан синтез и анализ физико-механических свойств материалов, методика испытаний, а также основные данные об оборудовании, инструментах и образцах. Образование композитов требует в методике исследований структурного плана в экспериментальном разделе. Установив их состав, можно определить область эксплуатационных режимов: контактные напряжения, скорость, нагрузку.

Синтез модифицированных материалов является наиболее перспективным направлением в развитии полимеров, включающих в себя два или более составляющих. Данные материалы позволяют решать ряд проблем, которые не могут быть устранены моноармированными композитами. Поэтому наполнители целесообразно использовать для регулирования механических свойств полимерной матрицы и оптимизации конструкции изделия в целом.

3.1 Структура исследований

Анализ технической и специальной научной литературы позволил точно установить, что для увеличения ресурса узлов трения, работающих в условиях высоких нагрузок, широкое применение в современной технике получили композиционные полимерные материалы благодаря своим хорошим эксплуатационным характеристикам.

Из-за разных условий эксплуатации контактируемых поверхностей следует учитывать термическую стойкость и механические свойства композиционного

материала. Кроме того, важным аспектом является изучение взаимодействия антифрикционных покрытий с окружающей средой, так как воздействие влаги, химикатов и температуры способно изменить поведение материалов в условиях нагружения. С помощью индентирования и спектральных исследований можно наблюдать поведение композитов в различных условиях.

Повышение ресурса металлополимерных трибосопряжений – важная задача в разработке новых материалов для различных промышленных областей. Одним из ключевых аспектов, оказывающих влияние на физико-механические характеристики полимерных модифицированных материалов, являются температурные факторы: температура и температурный градиент.

Соединения в поверхностном слое, обладающие высокими износостойкими свойствами, формируются за счет введения в полимерную матрицу микро- и наноразмерных наполнителей. Одной из основных задач трибоматериаловедения является формирование вторичных структур. Чтобы осуществить поставленную задачу, требуется привлечение современных тонких методов экспериментальной оценки физических свойств материалов и их химического состава, физики поверхности, нанотехнологий. Изучение реальной картины напряженно-деформированного состояния взаимодействующих сред в узле трения с учетом концентрации и способа распределения добавок требует постановки контактных задач с усложненными физико-механическими условиями в зоне контакта, разработки новых и привлечения известных современных численно-аналитических методов расчета.

Для достижения поставленной в настоящей работе цели и решения ее задач была составлена обобщенная структурная схема исследований (рисунок 3.1), устанавливающая поэтапный порядок выполнения испытаний.

Процесс образования полимерных материалов на основе эпоксидной смолы с применением различных армированных и антифрикционных наполнителей требует в методике исследований структурного плана в экспериментальном разделе.



Рисунок 3.1 – Структурная схема исследований

В теоретической части содержится постановка контактной задачи при скольжении металлического контртела с нанесенным упругим двойным слоем по недеформированному основанию с учетом тепловыделения в зоне контакта. С помощью конечно-элементного моделирования устанавливается допустимый диапазон температурной нагрузки, что поможет ориентироваться при эксплуатации.

Раздел экспериментальных исследований состоит из двух блоков. В первой части описан синтез композиционных материалов на основе эпоксидной смолы. Для этого были рассмотрены наполнители, которые содержат два или более компонентов в разной концентрации. Данные материалы позволяют решать ряд проблем, которые не могут быть устранены моноармированными композитами. Поэтому наполнители целесообразно использовать для регулирования механических свойств полимерной матрицы и оптимизации конструкции изделия

в целом. Главным критерием оценки эффективности применения разработанного материала при этом является высокая износостойкость.

Второй этап эксперимента обусловлен влиянием эксплуатационных режимов на триботехнические характеристики (коэффициент трения, температура трибоконтакта, интенсивность изнашивания и т. д.) композиционного материала с наполнителями.

После определения оптимальных эксплуатационных режимов происходит сопоставление теоретических и экспериментальных результатов исследований. Заключительным этапом идут промышленные испытания и практические рекомендации по применению полученного композиционного материала.

3.2 Синтез композиционных материалов на основе эпоксидной смолы

На сегодняшний день наиболее перспективным и эффективным способом разработки полимерных композиционных материалов является введение в полимерную основу мелкодисперсных наполнителей. Трибологические и физико-механические свойства таких материалов существенно различаются за счет высокой поверхностной активности. Важным аспектом применения таких материалов является возможность варьирования количественного содержания наполнителей в полимерной основе. Диспергирование наполнителей повышает износостойкость и прочность материалов без значительного увеличения модуля упругости и коэффициента трения. Поэтому для повышения эффективности трибосопряжений необходимо использовать модифицированные полимерные материалы, мелкодисперсные частицы наполнителей которых способствуют образованию новых структур соединений на поверхности.

Комплексный подход к подготовке добавок с использованием высококачественного оборудования обеспечит высокую эффективность и надежность конечного полимерного материала.

В ходе выполнения исследования был проведен целенаправленный поиск наполнителей, которые обладали бы высокой адгезией к связующему материалу и

высокой степенью дисперсности. В качестве основы композита были рассмотрены термопластические полимеры: фенилон (ФС-2), поликапроамид (ПА-6) и эпоксидно-фенольные смолы. Для улучшения характеристик материала исследованы следующие виды наполнителей:

– армирующие наполнители: углеродные гидроцеллюлозные волокна, ариимидная нить «Аримид 29,4 текс», добавки серпентинитов, модифицированного графита, фуллереновой сажи, мелкодисперсной шпинели металлов (железа, марганца, магния, хрома). Их основной задачей является повышение прочности модифицированного композита;

– антифрикционные наполнители: порошок политетрафторэтилена марки Ф4МБ (является сополимером тетрафторэтилена и гексафторпропилена).

Одним из главных преимуществ материалов, состоящих из указанных наполнителей, является их высокая гидролитическая, термическая и химическая стабильность, что обеспечивает долгий срок службы и надежность в условиях воздействия влаги, температурных колебаний и химических реакций. Композиты имеют хорошие адгезионные свойства за счет способности наполнителей глубоко проникать в трехмерную структуру матрицы полимера.

Принцип формирования композита является наиболее перспективным направлением в развитии полимеров. Полученные материалы позволяют решить ряд проблем, связанных с физико-химическими и механическими свойствами, которые не могут быть решены при использовании моноармированных композитов. Примером может быть повышение чувствительности материала к концентраторам напряжений и снижение ударной вязкости с увеличением модуля упругости. Поэтому целесообразно использовать принцип полиармирования для оптимизации конструкции изделия, регулирования механических свойств полимерных композиционных материалов, их анизотропии по всему объему и в различных зонах детали.

Исследования показали, что достигнуть высоких требований к трибологическим показателям поверхности трения невозможно без создания в зоне контакта саморегулирующихся структур. В качестве примера можно

привести многокомпонентные функциональные слои или модифицированные материалы поверхностного слоя узла трения. Принцип формирования вторичных структур обеспечивается функциональными свойствами каждого из компонентов: матричный полимер должен обеспечивать адгезионные свойства с металлическим контртелом, фторопласт обеспечивает антифрикционные свойства, волокнистый наполнитель компенсирует низкие механические свойства фторопласта, мелкодисперсная механоактивированная добавка обеспечивает формирование ячеистой структуры на поверхности трения.

Рассмотренные мелкодисперсные частицы шпинели металлов $(\text{Mn/Mg})\text{Fe}_2\text{O}_4$ (якобсит MnFe_2O_4 и магнезиоферрит MgFe_2O_4) имеют развитую удельную поверхность и изменяют надмолекулярную структуру модифицируемой композиции. Именно эти свойства оказывают существенное влияние на механизм триботехнических преобразований при контактном сопряжении, а также на образование переносных слоев на контртеле и износостойкость полимерного материала. При введении в полимерную основу активных добавок с развитой поверхностью происходит формирование надмолекулярных структур, являющихся центрами кристаллизации. Данный процесс улучшает прочностные и физико-механические характеристики, а также обеспечивает изменение отверждения в композиционном материале.

Процесс образования мелкодисперсных частиц шпинели основан на окислительно-восстановительной реакции между марганцем (Mn^{+7}) и железом (Fe^{+2}):



Для осуществления указанной реакции были приготовлены и смешаны в эквивалентных пропорциях 0,5 М растворы перманганата калия (KMnO_4) и хлорида железа (FeCl_2). Эмульгированный коллоид промывали дистиллированной водой для получения продуктов реакции в виде красновато-коричневых кристаллов (Fe^{+3}), коричневого порошка (Mn^{+4}) и бесцветных гигроскопических

кристаллов (K^{+1}). В процессе центрифугирования образованные кристаллы были отделены, а последующее сушение при температуре 80 °С позволило сохранить их структуру и физические свойства.

Прежде чем применять добавки с различной концентрацией в полимерную матрицу, необходимо сперва воспользоваться планетарной мономельницей PULVERISETTE 6, которая предназначена для тонкого и сверхтонкого измельчения, а также диспергирования порошков. Принцип ее работы заключается во вращении барабана относительно центральной оси и вокруг собственной оси в противоположную сторону вращения ротора мельницы. Для получения более измельченного материала (до 10 нм) частицы соударяются с мелющими телами (обычно стальные шарики) и стенками барабана.

Такой высокотехнологичный процесс обеспечивает равномерное распределение частиц добавок в полимерной матрице, способствующее уменьшению агломерации, которая может негативно сказаться на механических свойствах композита. После процесса диспергирования полученные гранулы подвергались дополнительным испытаниям, включая анализ на механическую прочность и устойчивость к температурным колебаниям.

Настройка параметров измельчения позволяет добиться результатов, которые не могут быть достигнуты при работе с другими шаровыми мельницами. PULVERISETTE 6 подходит для перемешивания и совершения гомогенизации эмульсий или паст, а также для измельчения таких материалов, как камни, гравий, песок, минералы, фарфор, спечённая керамика, глина, удобрения, соли, неорганические и органические материалы. Независимая друг от друга установка скорости вращения опорного диска и размольных стаканов является главным преимуществом данного оборудования.

С помощью дисковой центрифуги CPS Model DC24000 с применением дифференциальной высокоскоростной седиментации определялся размер измельченных материалов. Прибор может работать с частицами размером от 10 до 40 мкм. Параметры центрифугирования, такие как скорость вращения и время обработки, влияют на эффективность осаждения частиц. Одним из ключевых

аспектов проведения анализа являлся процесс осаждения частиц в жидкой среде с помощью градиентной плотности. На основе потоков жидкости на внешней кромке вращающегося диска можно добиться равномерного распределения частиц по радиусу и определить размеры частиц материала. Далее, используя алгоритмы обработки данных, можно извлечь более глубокую информацию о морфологии частиц, их форме и агрегатном состоянии.

Параметры измельчения представлены в таблице 3.1. Для обеспечения постоянной скорости седиментации использовался химически совместимый градиентный раствор с образцом. Применение раствора сахарозы с концентрацией 8 % и 24 % позволило создать необходимый градиент плотности. Последовательное введение растворов сахарозы проводилось в 10 этапов по 1,8 мл разной концентрации: начиная с максимальной 24 % и заканчивая минимальной 8 %. Общий объем градиентного раствора в системе составил 18 мл.

Таблица 3.1 – Параметры измельчения мелкодисперсной шпинели

№ п/п	Параметры	Значения
1	Диаметр мелющих тел, мм (стальные шарики)	6 мм
2	Степень заполнения барабана, %	30 %
3	Соотношение массы мелющих тел и исходных веществ	1/2
4	Число оборотов барабанов, об/мин	200
5	Продолжительность измельчения, мин	10–180 мин

Для уменьшения испарения жидкости с поверхности градиентного раствора в данную систему было добавлено 0,5 мл додекана. Через 15 минут после введения раствора сахарозы ступенчатый градиент концентрации дисперсионной среды превратился в линейный. Графики размера распределения частиц приведены на рисунке 3.2. После обработки в планетарной мельнице, включающей процесс измельчения и механоактивации, смесь шпинели металлов (Mn, Mg, Fe) была проанализирована посредством седиментационного анализа порошков. В результате исследования было определено, что для достижения равномерной дисперсности материала в 22 нм требуется время равное 120 минутам.

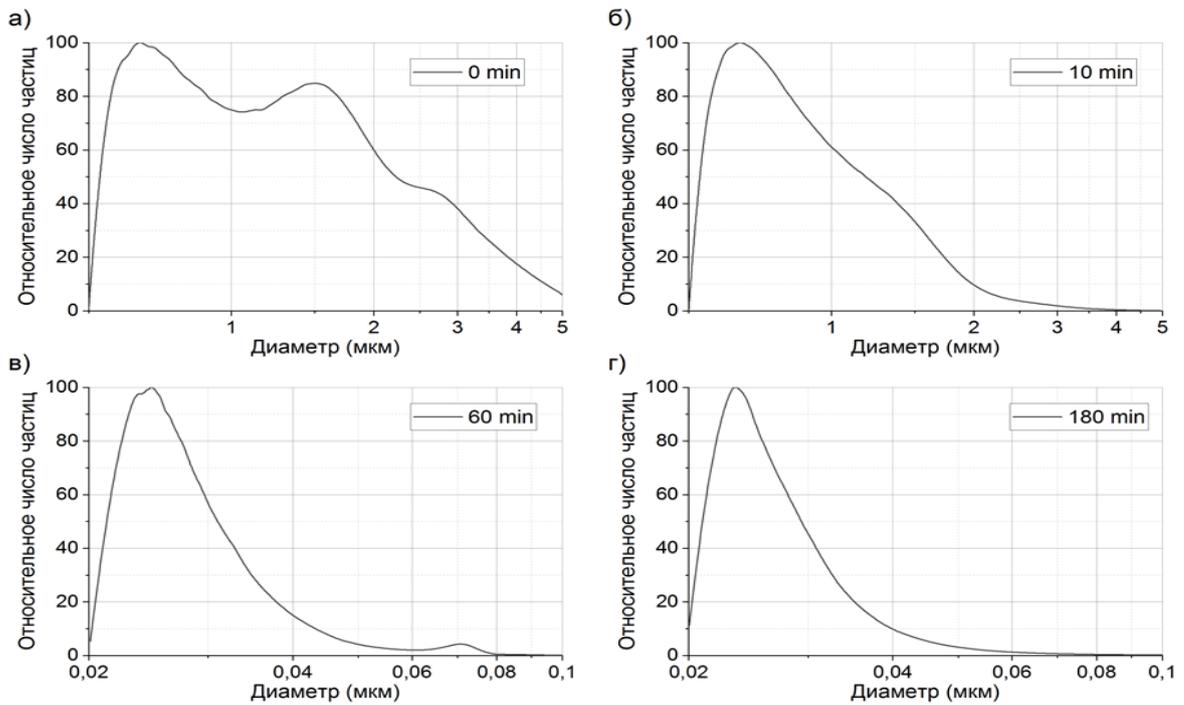


Рисунок 3.2 – Численное распределение частиц шпинели в зависимости от их размеров со стечением времени помола

На данном этапе работы рассмотрена возможность использования в качестве основы для создания полимерного композиционного материала эпоксидно-диановой смолы марки ЭД-20 (ГОСТ 10587-84), которая включает в свой состав эпихлоргидрин и дифенилолпропан. Смола ЭД-20 является полимерным продуктом конденсации указанных выше компонентов в щелочной среде, обладающим высокой плавкостью и пластичностью. Полимеризация происходит за 1,5 часа при температуре 20 °С.

Основные преимущества смолы ЭД-20: высокая твердость, термостойкость, хорошая адгезия, легкость в работе, высокая плотность, беспористость готового продукта, стойкость к механическим повреждениям, агрессивной среде, влиянию влаги; противокоррозионные способности, малая усадка, широта сфер применения.

Преимуществом смолы марки ЭД-20 также является способность к комбинированию с различными отвердителями. В отвержденном виде характеризуется высокой прочностью на разрыв и сжатие.

Для улучшения прочностных характеристик композиционного материала была выбрана мелкодисперсная шпинель металлов с процентным соотношением к основе, составляющим поэтапно 3, 6, 9, 12 и 15 %. Введение отвердителя в процессе полимеризации композиции проводилось в стехиометрическом соотношении. Для удаления воздушных пузырьков из неотвержденных образцов применялся метод вакуумирования, принцип которого заключается в использовании разности адгезионных сил: пузырьки более легких компонентов поднимаются вверх, а более тяжелых – остаются на дне.

Для анализа механических и трибологических свойств были подготовлены образцы, в качестве основы материала которых использовалась смола ЭД-20, а в качестве наполнителя – мелкодисперсная шпинель металлов. На рисунке 3.3 представлены фотографии данных образцов.



Рисунок 3.3 – Фотографии образцов:

a – основа; *б* – полимерный материал

с добавлением мелкодисперсной шпинели металлов

При выборе антифрикционного наполнителя для данного процесса был применен политетрафторэтилен марки Ф4МБ. Данный материал представляет собой сополимер тетрафторэтилена и гексафторпропилена с частицами размером, не превышающими 50 нм.

Чтобы получить функциональный материал, необходимо с учетом оптимальных параметров равномерно распределить армирующие наполнители в полимерной матрице. С целью избежания агрегации добавок смолу необходимо подогреть. Наполнители добавляли в полимер и перемешивали вручную или с

помощью специализированного лабораторного оборудования, такого как лабораторный миксер Heidolph RZR 2041, лабораторная магнитная мешалка с подогревом ES-6120, ультразвуковая ванна ПБС-5735-05 и смеситель SILVERSON L5M-A. Скорость вращения ротора составила 300–400 об/мин, а время перемешивания – 30 мин.

Следующим этапом формирования композитов являлось добавление сшивающих агентов, влияющих на свойства материала [144]. На низкие коэффициенты трения оказывают положительное влияние линейные гибкие цепи, содержащие аминные группы. К отвердителям, относящимся к аминной группе с прямолинейной структурой молекул, можно отнести модифицированный аминный отвердитель «Этал-45М», полиэтиленполиамин (ПЭПА) и триэтилентетрамин (ТЭТА). Чтобы определить оптимально подходящий отвердитель для композиционного материала, были изготовлены экспериментальные образцы с использованием трех рассматриваемых сшивающих агентов. Последующий анализ механических свойств композитов, отвержденных разными аминами, показал, что отвердитель ПЭПА обеспечивает наибольший модуль упругости и твердость. На основе этих результатов было принято решение использовать отвердитель ПЭПА для дальнейшего производства композиционных материалов.

После добавления отвердителя в материал в определенной пропорции полученную смесь снова перемешивали с помощью лабораторного оборудования и помещали в пресс-форму, поверхность которой обрабатывалась восковым антиадгезивом, для проведения процессов вакуумирования и отверждения. Данный процесс проводился в суховоздушном шкафу в течение 12 часов за счет автоматической циркуляции горячего воздуха (~95 °С). После отверждения композита проводился анализ однородности механических свойств материалов в разных областях полимерного образца. Использование лабораторного оборудования позволило достичь равномерного распределения мелкодисперсных армирующих добавок в полимерной матрице.

Исследование физико-механических и трибологических свойств композитов показало, что качественное и количественное содержание наполнителей ведет к значительным изменениям. Важным фактором воздействия также является теория самосогласованного поля [145], которая заключается во влиянии малых объектов друг на друга аппроксимированным усредненным эффектом. Увеличение массовой доли армированных компонентов способствует росту прочностных характеристик [146–148], что свидетельствует об увеличении интенсивности износа.

Для проведения испытаний на торцевой машине трения по схеме «плоский диск – палец» были созданы цилиндрические образцы диаметром 10 мм и высотой 30 мм. Для сравнительных трибологических испытаний на трибометре TRB по схеме «шар – диск» использовались образцы в форме дисков диаметром 40 мм и высотой 5–7 мм.

3.3 Оборудование и инструменты. Методика испытаний

Экспериментальные исследования проводились с использованием лабораторного оборудования и инструментов при нормальных атмосферных условиях (температура окружающей среды составляла 25 ± 5 °С; относительная влажность воздуха не превышала 80 %; атмосферное давление варьировалось в пределах от 630 до 800 мм рт. ст.).

В процессе изучения закономерностей влияния параметров внешних воздействий на трибологические характеристики полимерных композиционных материалов устанавливались концентрационные соотношения компонентов с точки зрения минимизации трения.

В зоне контактного взаимодействия наблюдалось существенное различие в пластической деформации компонентов композита, что вело к образованию остаточных напряжений. Для оценки механических свойств было осуществлено исследование твердости остаточных напряжений с использованием метода инструментального индентирования. Для этого проводились испытания на

твердомере ТВР-D «Восток-7» с применением индентора типа D (ГОСТ 24621-91) [149].

Анализ физико-механических свойств материалов выполнялся в лаборатории методом микро- и наноиндентирования с использованием модульного комплекса NanoTest 600 [150–163]. В рамках этого исследования выявлялись основные закономерности механического поведения материалов в областях субмикро- и наномасштабов, а также в тонких поверхностных слоях и пленках.

Упомянутое оборудование представляет собой современную платформу, предназначенную для определения характеристик, тестирования, разработки и последующего исследования материалов в нано- и микромасштабах. Установка имеет возможность проводить измерения в трех режимах, при этом может работать при высокой температуре до 500 °С:

1) индентирование – исследование материала сопровождается методом вдавливания в поверхность образца специального инструмента – индентора. Данный режим чаще всего применяется при анализе тонких пленок, различных биологических тканей;

2) удар – это кратковременное взаимодействие с контактной поверхностью, при котором происходит перераспределение кинетической энергии;

3) царапание – процесс образования узких бороздок на поверхности твердого предмета в направлении скольжения. Данный режим применяется для анализа поверхности с нанесенным на нее тонким твердым материалом.

NanoTest 600 позволяет проводить различные испытания для анализа физико-механических свойств материала:

- исследование на ползучесть и релаксацию материала, а также на контактную усталость, износостойкость, вязкое разрушение, растяжение-сжатие и ударную прочность;

- определение топографии поверхности, модуля прочности, жесткости и поверхностного трения;

- обнаружение адгезионного разрыва;

- фиксирование разрушения (пробоя) пленки и расслоения поверхности;
- определение изменения прочности и модуля упругости по толщине образца.

Модуль индентации NanoTest благодаря высокой поверхностной чувствительности способен исследовать структуру и однородность многослойных тонких покрытий и пленок [164–165]. С помощью NanoTest можно проводить тестирование образцов, полученных методом прессования порошков или покрытий, нанесенных на подложки, чтобы определить влияние размеров частиц на их механические свойства, степень уплотнения, силу трения и электростатические взаимодействия.

Главным компонентом комплекса NanoTest 600 является вращающийся на шарнире керамический маятник цилиндрической формы, на конце которого установлена индукционная катушка, которая под воздействием электрического тока определяет траекторию движения алмазного индентора. Введение алмазного индентора в образец задается с точностью 0,04 нм. Диапазон допустимых нагрузок составляет: для наномаятника 0,05–500 мН; для микромаятника до 20 Н.

Для исследования механических свойств материала из основных образцов были вырезаны фрагменты диаметром 10 мм и высотой 5 мм с помощью автоматического высокоточного отрезного станка для влажной абразивной резки BRILLANT 220 и отшлифованы на однодисковой шлифовально-полировочной машине Sapphir 550, что позволило уменьшить шероховатость поверхности и увеличить однородность сечения.

Процесс индентирования включает в себя 15 уколов алмазным индентором в виде трехгранной пирамиды Берковича. Первый укол был выполнен с отступом от края в 500 мкм, а расстояние между последующими уколами составляло 600 мкм.

NanoTest Platform 3 – программный комплекс, предназначенный для получения и обработки наложенных друг на друга кривых гистерезиса ($P - h$ – диаграмма зависимости нагрузки от глубины проникновения индентора).

В цикле «нагружение – разгрузка» введение индентора в материал происходило линейно с максимальной силой вдавливания 200 мН и скоростью нагружения $V = 10$ мН/с. Для определения степени ползучести композита использовался цикл «нагружение – статичное положение – разгрузка». Индентор, проникая в материал, находился в статичном положении в течение разного времени выдержки с максимальной нагрузкой. Чтобы избежать влияния температуры на результат испытания, во время разгрузки сила вдавливания снижалась на 90 % от максимального значения.

Трибологический анализ был проведен на трибометре TRB (Anton Paar) с использованием методики DIN 50324 по схеме испытаний «шар – диск» (рисунок 3.4). Испытания заключались во вдавливании стального шара диаметром 6 мм (ШХ15) с усилием на штифте 0,5 и 1 Н по нормали к поверхности диска (в форме «таблетки») при вращении с линейной скоростью 0,1 м/с. Выбранные режимы испытаний соответствуют следующим значениям удельных нагрузок: 0,5 Н – 58,8...70,5 МПа, 1 Н – 74,1...88,8 МПа.

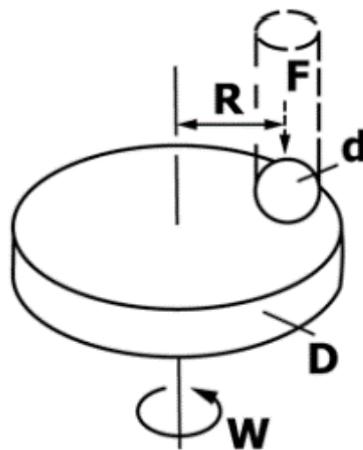


Рисунок 3.4 – Схема трибологических испытаний на трибометре TRB:

d – диаметр штифта; D – диаметр диска (образца в виде «таблетки»);

R – радиус износа; F – нормальное усилие на штифте; w – скорость вращения диска

Продолжительность испытания составляла 250 м, по окончании которого фиксировалось достижение пройденного пути или предельного коэффициента трения, значение которого можно рассчитать по следующей формуле:

$$\mu = \frac{F_{\text{ТР}}}{P},$$

где $F_{\text{ТР}}$ – сила трения, Н;

P – нагрузка на образцы, Н.

В ходе испытаний были проведены дериватографические исследования, направленные на анализ термических превращений композитов. Особое внимание уделялось взаимосвязи между структурой наполнителя, его модификацией и термической стабильностью готовых материалов. Данный комплексный анализ позволил исследовать термодинамику материалов с разной модификацией.

Используя методы термического анализа, такие как термогравиметрия (ТГА), дифференциальный термический анализ (ДТА), дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК) [166–167], можно получить широкий спектр результатов, свидетельствующих о термической устойчивости материала. Масс-спектроскопический анализ выделяющихся газообразных продуктов по термограммам позволяет сделать выводы о термической деструкции композиционного материала. Этот метод также позволяет определить степень отверждения и исследовать процессы старения изучаемых материалов. Данные, полученные с помощью термического анализа, могут использоваться как предварительная информация при подборе материалов, устойчивых в определенных условиях.

Исследование было проведено на высокочувствительном дериватографе STA 449 F3 Jupiter фирмы NETZSCH в закрытых вентилируемых корундовых тиглях в атмосфере азота (скорость подачи газа 20 мл/мин) при непрерывном нагревании от 30 до 650 °С со скоростью 10 °С/мин. Точность измерения тепловых процессов в материале составляла 0,05–0,1 Дж/моль. Для измерения температуры превращений использовалась точность в пределах $\pm 0,3$, а для массы

варьировалась в пределах от 0,1 до 0,2 %. Навески образцов для анализа составляли 10–20 мг.

Обработка экспериментальных данных была реализована с помощью программного обеспечения Netzsch Proteus Analyses. По полученным интегральным термогравиметрическим кривым ТГ можно оценить количественное изменение массы образца в процессе разложения, а по дифференциальным термогравиметрическим кривым ДТГ – температурный интервал деструкции, температура начала и конца разложения и его стадий. Пики на кривой ДТГ также позволяют определить температуру, при которой разложение происходит с максимальной скоростью.

Для изучения изменения поверхности трибоконтакта был применен метод ИК-спектроскопии. В ходе исследования использовалась машина трения торцевого типа с реализованной схемой испытаний «палец – плоский диск» (рисунок 3.5).

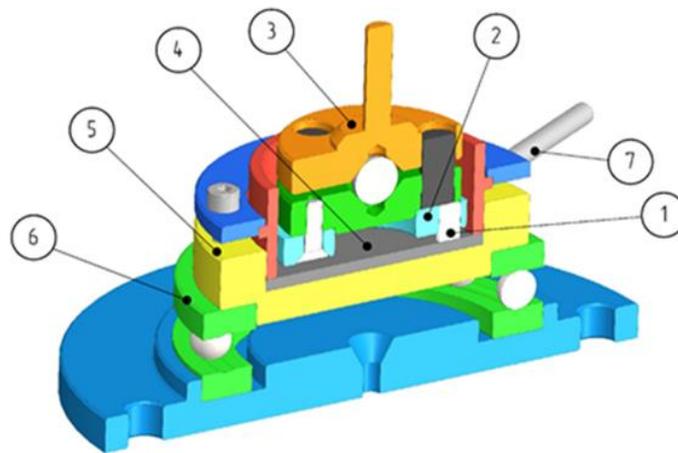


Рисунок 3.5 – 3D модель узла машины трения торцевого типа:

- 1 – образец (палец); 2 – обойма; 3 – шпиндель; 4 – контртело (диск);
5 – держатель; 6 – упорный шарикоподшипник; 7 – тензобалка

Равномерное распределение на диаметре 70 мм трех образцов создает общую площадь опоры 2,36 см². Закрепленное на держателе стальное контртело (сталь 45 ГОСТ 1050-74) изготовлено в виде диска. Свободное вращение держателя под воздействием момента силы трения ограничено тензобалкой. Продолжительность испытаний под действием распределенной нагрузки на узел

трения 0,3 МПа составила 180 минут, частота вращения при этом достигла 136,4 об/мин. Регистрация полос момента трения на протяжении всего испытательного цикла дала полное представление о динамике трения и его изменениях. Температура и относительная влажность окружающей среды строго контролировались, чтобы исключить влияние внешних факторов на результаты.

Получение спектров осуществлялось с применением ИК Фурье-спектрометра Bruker ALPHA II, оборудованного приставкой нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) в инфракрасном (ИК) диапазоне 4000–400 см⁻¹. Данный модуль оснащен кристаллом ZnSe и имеет шесть внутренних отражений. Максимальная скорость сканирования составляет 22,5 мм/с, каждый спектр при этом проходит 32 сканирования с разрешением 4 см⁻¹.

Непрерывная запись спектров с поверхности контртела длилась 30 минут и позволила изучить процесс образования вторичных структур, для подтверждения факта формирования которых была проведена оценка качественного и количественного состава сформированного образования.

Для оценки морфологии поверхности и анализа элементного состава вторичных структур, образованных на дорожках трения металлического контртела, были проведены исследования с использованием растровой электронной микроскопии с применением универсального растрового электронного микроскопа (РЭМ) Zeiss EVO MA 18, оснащенного энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) X-Max 50N (Oxford Instruments), встроенным в электронный микроскоп.

Основные характеристики РЭМ:

- максимальное разрешение микроскопа – 3 нм (30 кВ, SE, W);
- ускоряющее напряжение – 0,2–30 кВ;
- увеличение – 5–1 000 000х;
- детекторы: SE – вторичных электронов, HDBSD – обратнорассеянных электронов.

РЭМ позволяет исследовать структуру поверхности трибоконтакта, ее фазовый и химический состав. Для полного изучения образца необходимо

выполнить несколько подготовительных операций. Сначала следует осуществить откачку воздуха из камеры образцов РЭМ. Затем нужно установить ускоряющее напряжение и настроить режимы работы осветительной системы оборудования, а также отрегулировать электронный зонд РЭМ, чтобы он регистрировал вторичные электроны. Ускоряющее напряжение должно быть настроено таким образом, чтобы обеспечить оптимальное функционирование оборудования.

Следующим этапом настройки перед исследованием поверхности образца является электронно-оптическое увеличение, каждый этап которого сопровождается фокусировкой электронного зонда в соответствии с рекомендациями, указанными в инструкции по эксплуатации. Электронно-оптическое увеличение РЭМ прекращается, когда получено необходимое видеоизображение объекта исследования на экране. Для оценки качества элементного состава используется программное обеспечение Aztec.

На объекте измерений выбирается интересующая область, на которой снимается рентгеновский спектр за время 300 с. Если размер объекта меньше области рассеяния, то съемку спектра следует проводить в режиме малого раstra, полностью накрывающего объект.

Проведение спектроскопического исследования позволило проанализировать процесс формирования вторичных структур на поверхности контртела. Для этого использовался метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии с монохроматическим рентгеновским излучением линии Al K α при мощности 300 Вт на установке SPECS. Съемка XPS-спектров производилась в вакууме $8 \cdot 10^{-10}$ мбар, поддерживаемом на уровне $9 \cdot 10^{-10}$ мбар, при помощи рентгеновского микрозонда диаметром 800 мкм с пятном съемки размером 500 мкм. При рентгеновском возбуждении было достигнуто предельное разрешение порядка 0,6 эВ. Толщина исследуемой поверхностной пленки не превышала 4 нм. Полученные оже- и рентгеноэлектронные спектры были сравнены с данными РФЭС «ненатертой» поверхности стали, а также с данными анализа поверхностной структуры стали после выдержки в сухом проветриваемом помещении при комнатной температуре в течение двух недель.

Для точного определения содержания химических элементов от поверхности трения вглубь образца композиционного материала необходимо последовательное исследование каждого слоя отдельно, которое осуществлялось с помощью камеры подготовки образца, оснащенной пушкой для ионного профилирования низкой мощности ~ 3 Вт при ускоряющем напряжении 2,9 keV. Ионное профилирование (ионы инертных газов Ar^+ , Ne^+ и др.) осуществлялось каждые 10 минут при параметрах работы ионной пушки $U_{\text{уск}} = 2,99$ кэВ, и токе пучка $I = 10$ мА при давлении аргона около $4,5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Скорость травления при указанных выше режимах работы составляла ~ 3 Å/мин.

При проведении эксперимента с помощью метода рентгеноэлектронной спектроскопии в диапазоне от 0,5 до 4 нм по глубине слоя были отмечены изменения количественного состава химических элементов в приповерхностном слое трибосопряжений.

3.4 Выводы по главе 3

Проведенные исследования свойств композиционных материалов позволили установить следующее:

1. Эпоксидно-диановая смола марки ЭД-20 не только служит связующим материалом, но и обладает высокой теплостойкостью и способностью выдерживать значительные нагрузки при добавлении шпинели металлов и фторопласта.

2. Наличие ПТФЭ в полимерной матрице способствует увеличению сил адгезии за счет разной электрической полярности со связующим материалом, а также формированию вторичных структур на поверхности контртела.

3. Механоактивированные мелкодисперсные частицы шпинели металлов (Mn, Mg, Fe) придают композиту повышенные прочность и несущую способность, а также благодаря высокой поверхностной энергии способствуют образованию ячеистой структуры на поверхности трения в процессе трибосопряжения.

Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ЭПОКСИДНОЙ СМОЛЫ

Проведенный в главе 1 анализ современных представлений о развитии производства и высоких требованиях к надежности и функциональности машиностроительного оборудования показал, что на первый план выходит эффективность работы тяжело нагруженных узлов трения. Большое внимание уделяется применению полимерных композиционных материалов, которые способны работать в широком диапазоне механических и тепловых воздействий.

Управлять фрикционными свойствами полимерного композита и снизить его износ можно путем модификации, заключающейся во введении в полимерную матрицу механоактивированных мелкодисперсных частиц, влияющих на процессы химических превращений в зоне трибоконтакта [168]. Применение модификаторов улучшает прочностные характеристики и уменьшает ползучесть материала, а также способствует формированию вторичных структур на поверхности контртела.

Происходящее в результате трения повышение температуры приводит к необратимым изменениям свойств материалов, влияющим на их физико-механические и трибологические характеристики, и активизирует физико-химические процессы, происходящие в зоне контакта. Тепловой режим трения определяет фазовые превращения в полимере и характеризуется возникновением надмолекулярных структур, которые влияют на характер трения [169]. Поэтому учет тепловыделения при трении является важным фактором, определяющим износостойкость полимерных композиционных материалов.

Однако процессы, протекающие в поверхностном слое металлополимерных сопряжений на микроуровне, до сих пор не изучены в полном объеме и требуют дополнительных исследований. В связи с этим необходимо изучить влияние модификации функционального полимерного материала на его эксплуатационные свойства.

4.1 Определение концентрации армирующих компонентов

Для определения концентрации армирующих наполнителей были проведены трибологические и физико-механические исследования. В качестве полимерной матрицы была выбрана смола марки ЭД-20, отвердитель ПЭПА, а в качестве армирующих компонентов – мелкодисперсная шпинель металлов (Mn, Mg, Fe). Процентное соотношение массы наполнителя к основе варьировалось в следующих пределах: 0, 3, 6, 9, 12 и 15 %.

Механические исследования проводились на твердомере ТВР-D «Восток-7» по методу Шора с использованием индентора типа D (ГОСТ 24621-91). Таблица 4.1 содержит обобщенные данные физико-механических характеристик образцов композиционного материала на основе эпоксидной смолы марки ЭД-20 с добавлением мелкодисперсной добавки различной концентрации.

Таблица 4.1 – Обобщенные данные физико-механических характеристик образцов композиционного материала

Образец	Концентрация, %	Среднее значение твердости, HSD	Дисперсия	Среднеквадратическое отклонение
1	0	74,5	0,58	0,76
2	3	82	1,17	1,08
3	6	79,2	1,59	1,26
4	9	72,3	3,04	1,74
5	12	66	4	2
6	15	58,5	9	3

Из анализа полученных данных можно сделать вывод, что при концентрации наполнителя свыше 6 % среднее значение твердости снижается, а наивысшая твердость достигается при процентном соотношении массы мелкодисперсной добавки 3 %. В свою очередь, среднеквадратическое отклонение и дисперсия повышаются при увеличении массовой доли шпинели

металлов, что говорит о неоднородности структуры полученного композиционного материала.

Трибологический анализ был проведен на трибометре TRB (Anton Paar) с использованием методики DIN 50324 по схеме испытаний «шар – диск» с усилием на штифте 0,5 и 1 Н по нормали к поверхности диска (в форме «таблетки») при вращении с линейной скоростью 0,1 м/с (рисунок 4.1).

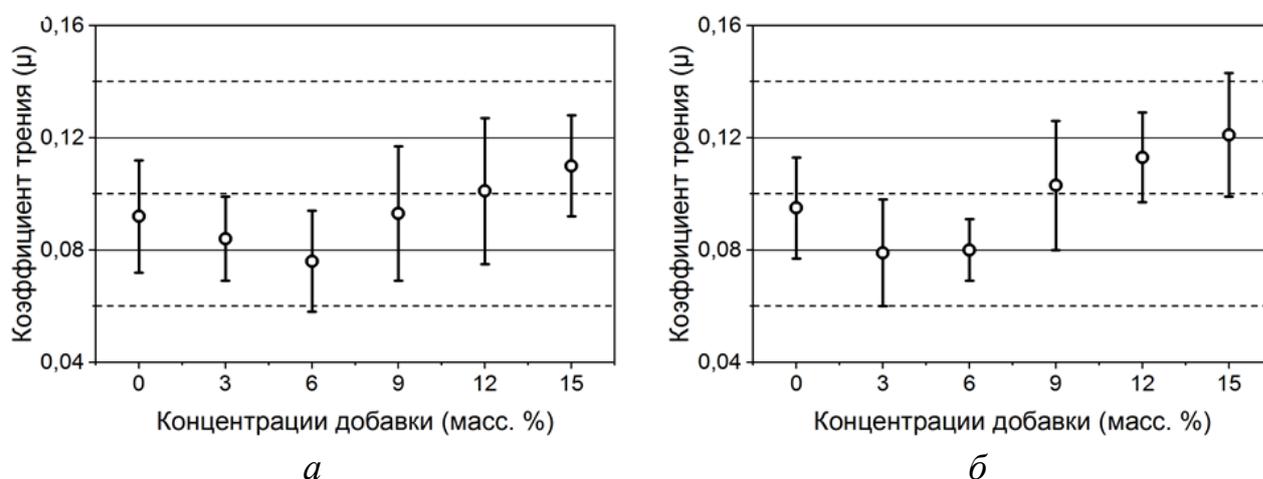


Рисунок 4.1 – Влияние концентрации добавки шпинели на коэффициент трения при различной нагрузке:

a – нагрузка 5 Н; *б* – нагрузка 10 Н

При добавлении наполнителя в большом количестве наблюдалось повышение коэффициента трения. Было установлено, что введение мелкодисперсной шпинели металлов в полимерную основу в концентрации 3 % и 6 % при нагрузке 5 Н снижает коэффициент трения до значений 0,076 и 0,084 соответственно. При больших нагрузках наименьшее значение коэффициента трения и среднеквадратического отклонения имеет композит с массовой долей наполнителя в 6 %.

Анализ трибологических и физико-механических свойств композита, в полимерную матрицу которого входят армирующие компоненты, показал, что для улучшения эксплуатационных свойств материала при различной нагрузке следует применять концентрацию шпинели металлов 6 %.

4.2 Определение концентрации антифрикционных компонентов

Достоверность результатов трибологических исследований зависит от выполнения большого количества испытаний. При этом тепловая напряженность узла трения является определяющим фактором эксплуатационного режима [170–171]. Происходящее в зоне контакта повышение температуры приводит к изменениям физико-механических и трибологических свойств материалов. Влияние температуры на изменение коэффициента трения изучено в работах А. М. Зуева, А. Д. Чертавского, Р. Кинга, Д. Тейбора, В. П. Митровича, А. Д. Курицкого, И. В. Крагельского, Н. М. Михина, Ю. А. Евдокимова, С. Л. Рыбалова [172–180]. Накопленные в результате исследований данные позволили выделить основную закономерность изменения коэффициента трения: при увеличении температурного градиента и уменьшении общей температуры узла сопряжения коэффициент трения возрастает [181–182]. Поэтому для определения трибологических параметров разработанного материала необходимо исследовать влияние концентрации наполнителя и нагрузки на коэффициент трения.

Для оценки влияния концентрации антифрикционных добавок и нагрузочных режимов на процессы трения был использован статистический метод планирования эксперимента [183] с применением ортогонального плана второго порядка.

В качестве исследуемой функции отклика выбран коэффициент трения образцов, а в качестве варьируемых факторов – концентрация шпинели $K_{Ш}$ (X_1), концентрация фторопласта $K_{Ф}$ (X_2), усилие на инденторе P (X_3), (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Факторы				Уровни варьирования			
Наименование	Размерность	Обозначение		кодовые			интервалы варьирования
		натуральное	кодовое	-1	0	+1	
				натуральные			
Концентрация шпинели	%	$K_{Ш}$	X_1	3	6	9	3
Концентрация фторопласта	%	$K_{Ф}$	X_2	3	6	9	3
Усилие на инденторе	Н	P	X_3	0,5	1,0	1,5	0,5

Диск, совершая вращательное движение, двигался с линейной скоростью 0,1 м/с, усилие на штифте было выбрано 0,5, 1,0, 1,5 Н, а продолжительность испытания составляла 250 м. Интервал варьирования наполнителей равен 3, а усилия на инденторе – 0,5.

В качестве математической модели был принят полином второго порядка:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{12}X_1X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2.$$

Для двухфакторного ортогонального плана звездные точки равны ± 1 . Согласно плану эксперимента, было проведено девять опытов: четыре в углах квадрата, четыре в середине каждой стороны и один в центре. Каждый опыт проводился трижды в случайном порядке для уменьшения погрешностей.

В таблицах 4.3 и 4.4 представлена матрица планирования эксперимента, а также средние значения, дисперсия параллельных опытов и значения, рассчитанные на основании полученных математических моделей.

Полученные значения дисперсий параллельных опытов были проверены на однородность по критерию Кохрена соответственно для степеней свободы числителя $f_1 = 2$ и знаменателя $f_2 = 9$ при уровне значимости 0,05. Дисперсии параллельных опытов оказались однородными, так как расчетные их значения были меньше табулированных.

Таблица 4.3 – Матрица плана и результаты эксперимента для образцов, содержащих различную концентрацию добавки шпинели

№ опыта	Матрица планирования эксперимента			Выходные параметры оптимизации		
	X_0	X_1	X_3	\bar{Y}_u	$s_{Y_u}^2$	\hat{Y}_u
1	+1	-1	-1	0,695	5,33E-03	0,676
2	+1	+1	-1	0,655	4,29E-03	0,676
3	+1	-1	+1	0,801	3,36E-03	0,777
4	+1	+1	+1	0,794	5,63E-03	0,777
5	+1	-1	0	0,684	4,69E-03	0,727
6	+1	+1	0	0,730	3,84E-03	0,727
7	+1	0	-1	0,615	2,50E-03	0,598
8	+1	0	+1	0,676	3,54E-03	0,699
9	+1	0	0	0,655	1,52E-03	0,649

Таблица 4.4 – Матрица плана и результаты эксперимента для образцов, содержащих 6 % шпинели и различную концентрацию добавки фторопласта

№ опыта	Матрица планирования эксперимента			Выходные параметры оптимизации		
	X_0	X_2	X_3	\bar{Y}_u	$s_{Y_u}^2$	\hat{Y}_u
1	+1	-1	-1	0,270	9,03E-05	0,271
2	+1	+1	-1	0,206	7,23E-05	0,209
3	+1	-1	+1	0,265	6,40E-05	0,265
4	+1	+1	+1	0,179	1,69E-04	0,181
5	+1	-1	0	0,268	1,60E-05	0,268
6	+1	+1	0	0,200	5,63E-05	0,195
7	+1	0	-1	0,215	1,00E-04	0,214
8	+1	0	+1	0,195	2,50E-05	0,197
9	+1	0	0	0,207	3,60E-05	0,206

Далее были определены дисперсии воспроизводимости и средние квадратичные ошибки эксперимента:

1. Для образцов, содержащих различную концентрацию добавки шпинели:

$$s^2(\mu) = 3,86E-03,$$

$$s(\mu) = 6,21E-02.$$

2. Для образцов, содержащих 6 % шпинели и различную концентрацию добавки фторопласта:

$$s^2(\mu) = 6,99E-05,$$

$$s(\mu) = 8,36E-03.$$

После расчета коэффициентов уравнений и учета статистически значимых коэффициентов были получены уравнения регрессии:

1. Для образцов, содержащих различную концентрацию добавки шпинели:

$$\hat{Y}(\mu) = 0,65 + 0,05 \cdot X_3 + 0,08 \cdot X_1^2.$$

2. Для образцов, содержащих 6 % шпинели и различную концентрацию добавки фторопласта:

$$\hat{Y}(\mu) = 0,21 - 0,04 \cdot X_2 - 0,01 \cdot X_3 - 0,01 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,03 \cdot X_2^2.$$

По критерию Фишера (F) полученные уравнения регрессии оказались адекватными при уровнях значимости 0,05. Следует отметить, что наибольшее влияние на коэффициент трения оказывает не нагрузка, а концентрация наполнителей. Из анализа полиномов также следует, что кроме линейных эффектов факторов воздействия имеются квадратичные.

Графики полученной регрессионной модели влияния концентрации антифрикционных добавок и нагрузочных режимов на процессы трения представлены на рисунке 4.2.

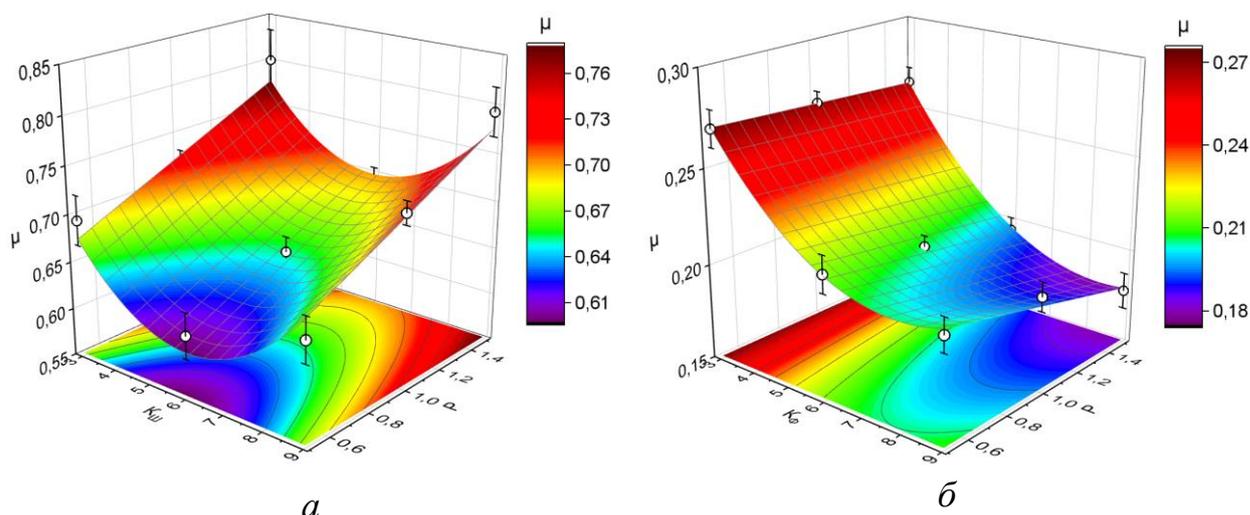


Рисунок 4.2 – Изменение величины коэффициента трения μ от нагрузки и концентрации добавки:

a – для образцов, содержащих различную концентрацию добавки шпинели;

b – для образцов, содержащих 6 % шпинели и различную концентрацию добавки фторопласта

На основании результатов трибологических испытаний образцов, содержащих различную концентрацию добавки шпинели, выбрана массовая доля 6 %. Существенное снижение коэффициента трения достигалось добавлением порошка фторопласта в композит. Причем эффективность работы наполненного материала при увеличении нагрузки наблюдалась с добавлением 6 % ПТФЭ.

4.3 Трибологические исследования композиционных материалов

С целью проведения дальнейших исследований в области трибологии, а также изучения физико-механических свойств композиционных материалов были изготовлены образцы, в основе которых использовалась эпоксидно-диановая смола марки ЭД-20 с добавлением мелкодисперсной шпинели металлов и политетрафторэтилена марки Ф4МБ в качестве наполнителей.

При проведении трибологических лабораторных испытаний усилие на штифте составляло 0,5 и 1 Н, а вращательное движение диска производилось с линейной скоростью 0,1 м/с. Массовое содержание наполнителей варьировалось в пределах от 0 до 15 %.

При небольшой нагрузке, равной 0,5 Н, применение шпинели в качестве наполнителя при любой концентрации значительно увеличивает коэффициент трения (рисунок 4.3). А при нагрузке в 1 Н коэффициент трения наполненного композита становится сопоставимым со значением его основы. Из рисунка 4.3 также видно, что применение ПТФЭ с концентрацией в 6 % значительно снижает коэффициент трения.

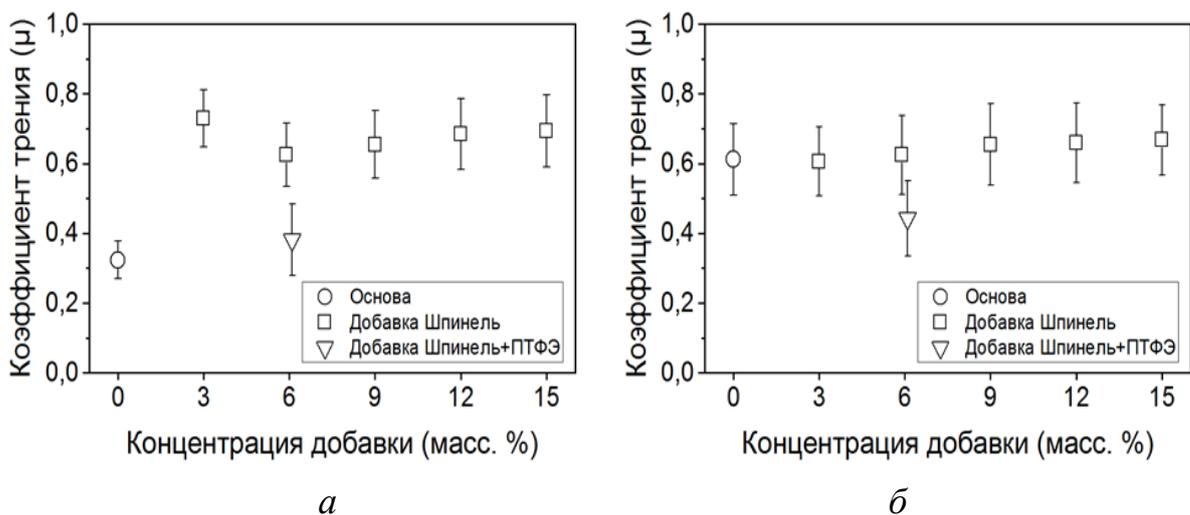


Рисунок 4.3 – Влияние концентрации наполнителей на коэффициент трения при различной нагрузке:

а – нагрузка 0,5 Н; *б* – нагрузка 1 Н

Из полученных данных следует, что наилучшими свойствами композит обладает при концентрации наполнителей с массовой долей 6 %. Далее все исследования были проведены на специально подготовленных образцах с разным составом: первый вариант – контрольный – смола ЭД-20 без наполнителей; второй – ЭД-20 + 6 % шпинели. Третий вариант модификации – ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ. Для проведения испытаний все образцы подвергались идентичной обработке.

Трибологические исследования полученных образцов (рисунок 4.4) позволили получить важные выводы о поведении материалов при наличии добавки шпинели:

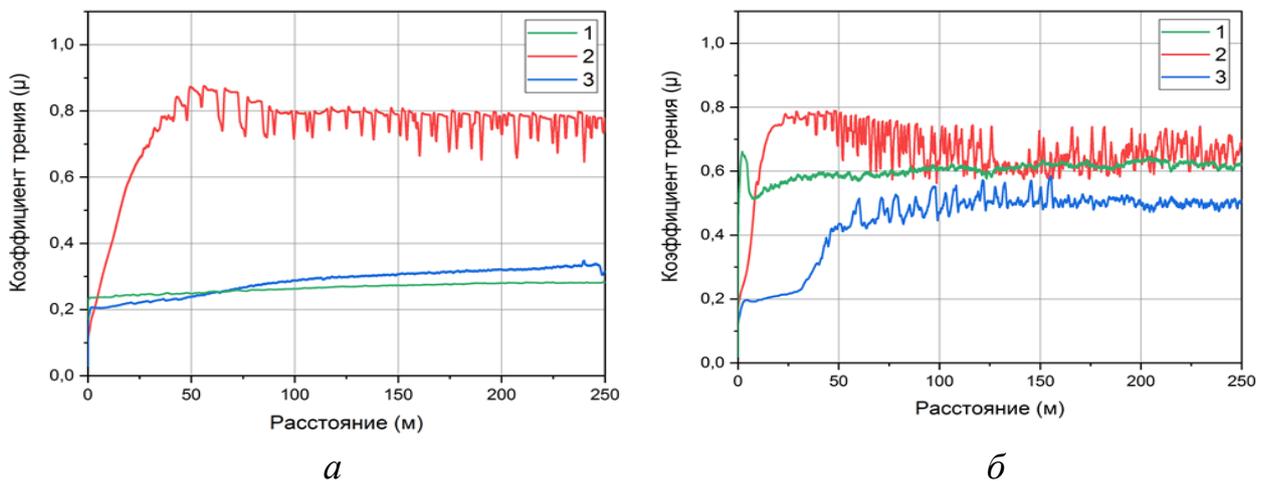


Рисунок 4.4 – Изменение коэффициента трения в процессе испытаний при нагрузке 0,5 Н (а) и 1 Н (б):

кривая 1 – смола ЭД-20; кривая 2 – ЭД-20 + 6 % шпинели;

кривая 3 – ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ

1. При малой нагрузке, когда усилие на штифте составляло 0,5 Н, добавка шпинели оказала значительное негативное влияние на коэффициент трения. Это говорит о том, что при подобных условиях использование шпинели в композите может привести к значительному повышению трения.

2. При достижении значения нагрузки в 1 Н ситуация меняется. В данном случае коэффициент трения наполненного композита становится соразмерным с

коэффициентом трения основы. Это указывает на то, что при больших нагрузках добавка шпинели перестает существенно влиять на трение и не вызывает значительных отклонений.

3. Использование в качестве антифрикционных наполнителей фторопласта при разных нагрузках способствует снижению коэффициента трения.

Таким образом, установлен состав полимерного композиционного материала, повышающий эксплуатационные свойства металлополимерного трибосопряжения: введение в полимерную матрицу 6 % шпинели металлов и 6 % ПТФЭ способствует снижению коэффициента трения при контактном давлении 58,8...70,5 МПа на 16,7 %, а при 74,1...88,8 МПа – на 28,6 % по сравнению с немодифицированным полимером. Полученная информация может быть полезна в разработке и выборе материалов для различных инженерных и технических приложений, где трение играет важную роль.

4.4 Физико-механические исследования композиционных материалов

Для анализа физико-механических характеристик композита был использован метод инструментального индентирования на приборе NanoTest 600. Обработка результатов исследований проводилась с помощью программного комплекса NanoTest Platform 3 с применением метода Оливера – Фарра [184].

С использованием треугольного режима нагружения (рисунок 4.5), при котором в течение заданного времени наблюдается линейный рост, а затем спад нагрузки, были определены следующие физико-механические характеристики: твердость (H), модуль упругости (E), коэффициент упругого восстановления (W), индекс упругости, характеризующий сопротивление материала при нагружении (H/E), и индекс пластичности, характеризующий сопротивление пластической деформации (H^3/E^2) [185].

В таблице 4.5 представлены средние значения физико-механических свойств исследуемых параметров.

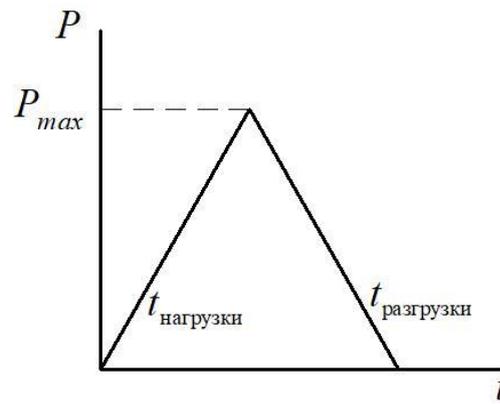


Рисунок 4.5 – Треугольный режим нагружения

Таблица 4.5 – Результаты физико-механических испытаний композитов

Наименование образца	$H_{ср}$, ГПа	$E_{ср}$, ГПа	W	$H_{ср}/E_{ср}$	$H_{ср}^3/E_{ср}^2$
Смола ЭД-20	0,162	3,86	0,147	0,042	0,000285
Смола ЭД-20 + 6 % шпинели железа	0,250	5,10	0,157	0,049	0,000601
Смола ЭД-20 + 6 % шпинели железа + 6 % ПТФЭ	0,236	4,73	0,167	0,050	0,000588

Результаты испытаний показали, что применение наполнителей способствует снижению релаксационных процессов. В качестве подтверждения на рисунке 4.6 представлены диаграммы «нагрузка – глубина погружения» для материалов с разным составом.

В цикле «нагружение – разгрузка» определяется энергия рассеяния W_{pl} , которая поглощается и рассеивается в процессе индентирования. Она является показателем внутреннего трения вязкоупругой среды, которая рассчитывается тангенсом угла механических потерь.

По полученным диаграммам «нагрузка – глубина погружения» исследуемых образцов видно, что в случае использования наполнителей наблюдается существенное уменьшение площадей за счет формирования областей с хорошей межфазной адгезией [186–187].

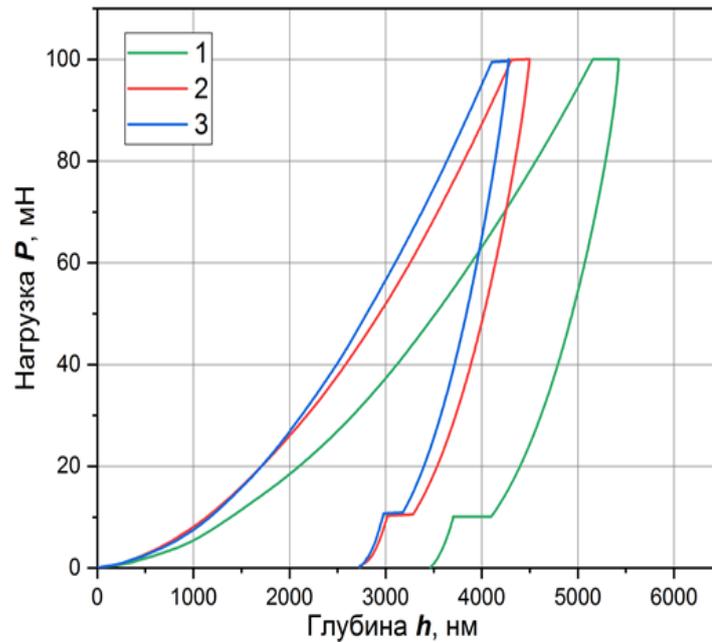


Рисунок 4.6 – Диаграммы «нагрузка – глубина погружения», полученные методом нормального индентирования:
 кривая 1 – смола ЭД-20; кривая 2 – ЭД-20 + 6 % шпинели;
 кривая 3 – ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ

Для установления степени медленного деформирования модифицированного материала под воздействием механического напряжения или постоянной нагрузки были проведены механические испытания на ползучесть [188–192]. В связи с этим индентирование осуществлялось с помощью трапецеидального режима нагружения (рисунок 4.7) при нагрузке $P = 200$ мН и скорости нагружения $V = 10$ мН/с.

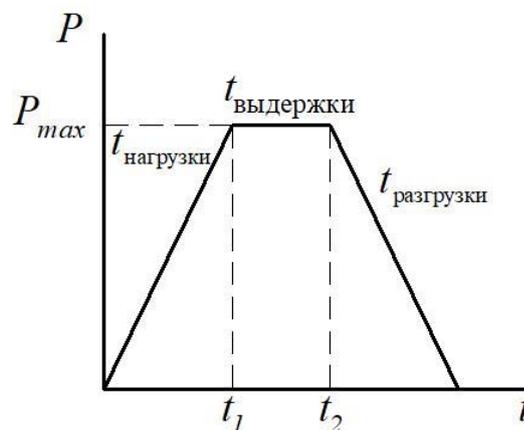


Рисунок 4.7 – Трапецеидальный режим нагружения

Время нагрузки и разгрузки всегда составляло 20 с. Значения времени выдержки варьировалось в пределах t_B : 5, 30, 60, 90 и 120 с. Погружение индентора в исследуемый материал происходило линейно. Результаты исследования микротвердости и приведенного модуля упругости показаны на рисунке 4.8.

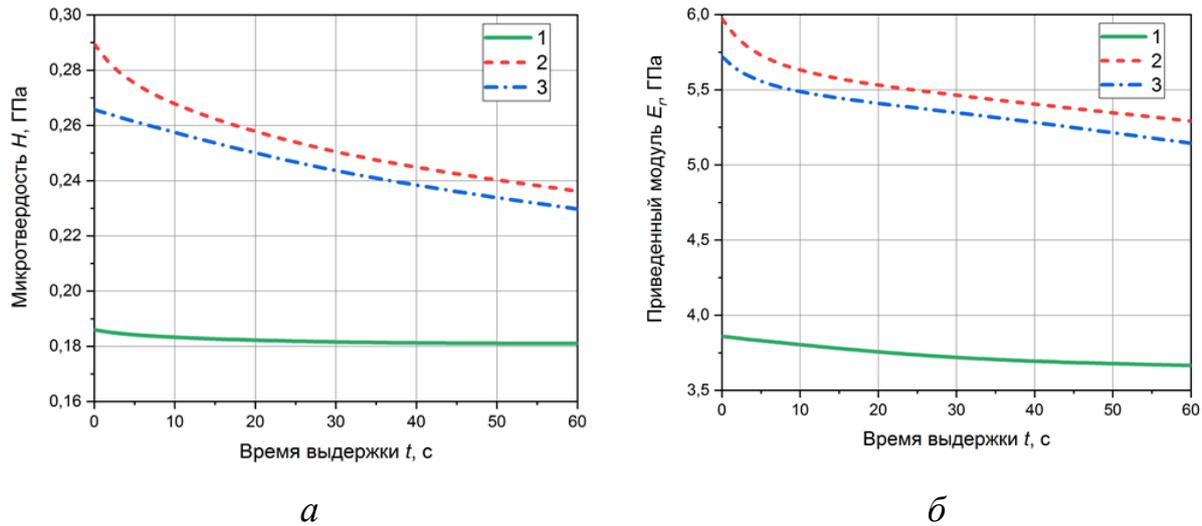


Рисунок 4.8 – Изменение микротвердости (*а*) и приведенного модуля упругости (*б*) в зависимости от времени выдержки:

кривая 1 – смола ЭД-20; кривая 2 – ЭД-20 + 6 % шпинели;

кривая 3 – ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ

При увеличении времени выдержки внедрение индентора в материал увеличивается за счет его ползучести. Поэтому аппроксимированные кривые показывают снижение значений микротвердости и приведенного модуля упругости. Для образца из смолы без добавок микротвердость и модуль упругости стабилизируются после выдержки материала $t_B = 30$ с. Для образцов с наполнителями похожая картина наблюдается после $t_B = 90$ с. Это говорит о том, что вязкие свойства значительно уменьшаются и увеличиваются прочностные характеристики.

Для оценки вязкоупругих характеристик использовалось относительное изменение глубины индентирования [193]:

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \cdot 100 \%, \quad (4.1)$$

где h_1 – глубина индентирования при достижении испытательной нагрузки, поддерживаемой постоянной с момента t_1 ;

h_2 – глубина индентирования после выдержки под нагрузкой к моменту времени $t_2 = t_1 + t_B$.

Для определения статистически точных параметров измерений были рассчитаны среднеквадратическое отклонение S (4.2) и коэффициент вариации v (4.3). Полученные значения показывают разброс данных вокруг среднего значения математического ожидания \bar{x}_i . Чем ниже показатели этих параметров, тем плотнее распределение результатов вокруг среднего значения.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}{n}}, \quad (4.2)$$

$$v = \frac{S}{\bar{x}_i} \cdot 100 \%. \quad (4.3)$$

где x_i – экспериментально полученные значения;

n – количество наблюдений.

В таблице 4.6 приведены значения относительного изменения глубины индентирования под воздействием постоянной нагрузки с увеличением времени выдержки t_B как для чистого полимера, так и для модифицированного, а также статистические данные по микротвердости поверхности, рассчитанные по формулам (4.1)–(4.3). Аппроксимированные кривые относительного изменения глубины индентирования при увеличении времени выдержки t_B представлены на рисунке 4.9.

Таблица 4.6 – Значения относительного изменения глубины индентирования под воздействием постоянной нагрузки с увеличением времени выдержки t_B и статистические данные по микротвердости поверхности

n	t_B, c	h_1	h_2	$C_{IT}, \%$	S	$v, \%$
1	2	3	4	5	6	7
Смола ЭД-20						
1	5	4367,169	4452,921	1,97	0,209	0,005
2		4372,721	4456,912			
3		4211,801	4308,348			
4		4295,532	4379,418			
5		4229,047	4301,301			
1	30	4323,331	4517,694	4,71	0,522	0,012
2		4306,292	4501,807			
3		4212,203	4447,322			
4		4207,919	4404,965			
5		4134,686	4308,639			
1	60	4174,095	4411,546	5,89	0,282	0,006
2		4149,069	4413,096			
3		4208,253	4448,269			
4		4317,466	4566,053			
5		4264,943	4517,944			
1	90	4174,095	4443,316	6,88	0,524	0,012
2		4149,069	4449,948			
3		4208,253	4484,411			
4		4317,466	4598,363			
5		4264,943	4589,521			
1	120	4165,442	4512,834	7,67	0,853	0,019
2		4216,844	4574,161			
3		4296,809	4589,578			
4		4243,909	4527,765			
5		4345,681	4693,906			
Смола ЭД-20 + 6 % шпинели						
1	5	4299,329	4446,017	3,55	0,191	0,004
2		5152,245	5331,315			
3		6212,814	6442,996			
4		4696,437	4853,885			
5		5775,287	5994,168			
1	30	3642,039	3942,237	6,96	0,781	0,014
2		5165,7487	5498,261			
3		6131,896	6548,144			
4		5028,225	5382,457			
5		6222,177	6611,938			

Продолжение таблицы 4.6

1	2	3	4	5	6	7
1	60	4123,091	4492,059	9,27	0,621	0,011
2		5028,225	5506,933			
3		6222,177	6742,825			
4		5165,749	5681,431			
5		6131,896	6714,632			
1	90	5360,168	5910,213	11,04	0,771	0,013
2		5194,819	5785,635			
3		5718,032	6412,949			
4		4815,344	5315,577			
5		5004,847	5557,277			
1	120	5400,182	6073,553	12,45	0,679	0,012
2		4445,119	4965,844			
3		4995,093	5670,674			
4		5951,083	6693,443			
5		5471,439	6131,351			
ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ						
1	5	4283,253	4343,149	1,36	0,169	0,004
2		4180,164	4225,517			
3		4207,579	4264,217			
4		4157,449	4218,984			
5		4221,302	4284,957			
1	30	4283,253	4420,017	3,18	0,305	0,007
2		4180,164	4321,249			
3		4207,579	4319,181			
4		4157,449	4297,128			
5		4221,302	4362,104			
1	60	4221,302	4403,181	4,21	0,211	0,005
2		4145,979	4304,755			
3		4261,811	4447,231			
4		4234,038	4413,839			
5		4304,833	4488,541			
1	90	4304,833	4510,189	4,89	0,299	0,007
2		4231,576	4420,047			
3		4209,621	4428,823			
4		4137,533	4349,393			
5		4150,169	4353,269			
1	120	4288,459	4490,047	5,18	0,488	0,011
2		4221,422	4439,459			
3		4229,301	4481,951			
4		4116,072	4329,599			
5		4072,855	4271,402			

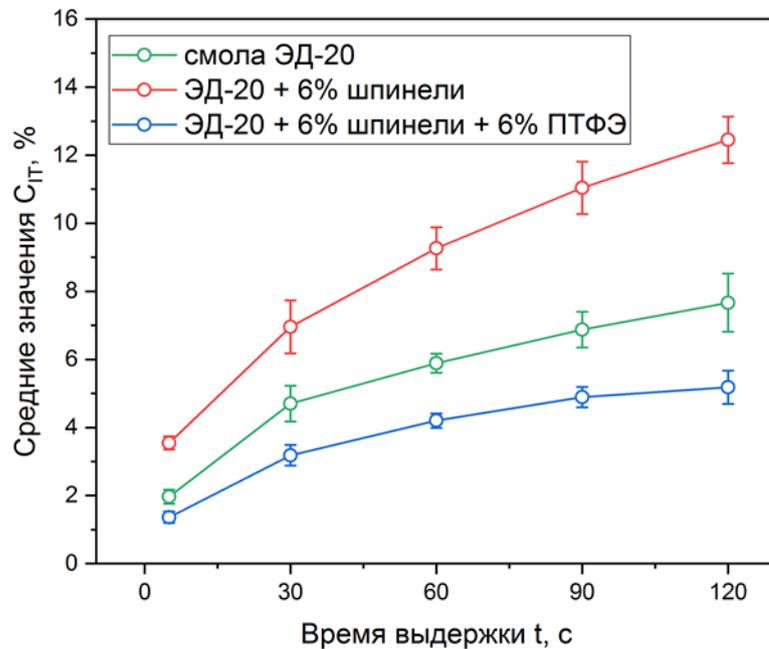


Рисунок 4.9 – Средние значения C_{IT} при разном времени выдержки t_B

Статистический анализ проведенных испытаний показал, что стабильностью полученных данных в отношении как твердости и приведенного модуля упругости [194], так и ползучести обладает композиционный материал ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ. При этом среднее значение относительного изменения глубины индентирования варьируется от 1,36 до 5,18 % ($\sim 3,82$ %). Данный факт говорит о том, что использование наполнителей способствует формированию прочной сетчатой надмолекулярной структуры.

Вместе с тем образцы из ЭД-20 и ЭД-20 + 6 % шпинели демонстрируют большой разброс значений C_{IT} : для смолы ЭД-20 – от 1,97 до 7,67 % ($\sim 5,7$ %), а при использовании мелкодисперсной шпинели в качестве наполнителя 3,55–12,45 % ($\sim 8,9$ %), что указывает на существенное увеличение вязких свойств композита.

Если сравнивать среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации композиционных материалов, то использование ПТФЭ в качестве добавки демонстрирует более стабильное поведение и меньший разброс данных.

По сравнению с исходным полимером применение модифицированного материала позволяет существенно повысить прочностные характеристики и, как следствие, износостойкость. Из аппроксимированной кривой на рисунке 4.9 видно, что при добавлении шпинели металлов и ПТФЭ в полимерную основу

относительное изменение глубины индентирования меняется незначительно. Установившееся значение C_{IT} при увеличении времени выдержки свидетельствует о релаксационной твердости. Если взять это значение и разделить на значение микротвердости при $t_B = 0$, то получим следующие соотношения: для образца из ЭД-20 – 0,974, для образца из ЭД-20 с добавлением 6 % шпинели – 0,795, для образца из ЭД-20 с добавлением 6 % шпинели и 6 % ПТФЭ – 0,852.

4.5 Исследование кинетики образования вторичных структур

Для изучения изменения поверхности трибоконтакта и процесса формирования вторичных структур применялся метод ИК-спектроскопии. В ходе исследования использовалась машина трения торцевого типа с реализованной схемой испытаний «палец – плоский диск». Получение спектров осуществлялось с применением ИК Фурье-спектрометра Bruker ALPHA II, оборудованного приставкой нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) в инфракрасном (ИК) диапазоне $4000\text{--}400\text{ см}^{-1}$. Исследования инфракрасных спектров полимерных материалов подробно описаны в научных трудах ряда авторов [195–200].

На рисунке 4.10 представлена характерная зависимость изменения коэффициента трения рассматриваемого композита (состав композиции: смола ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ).

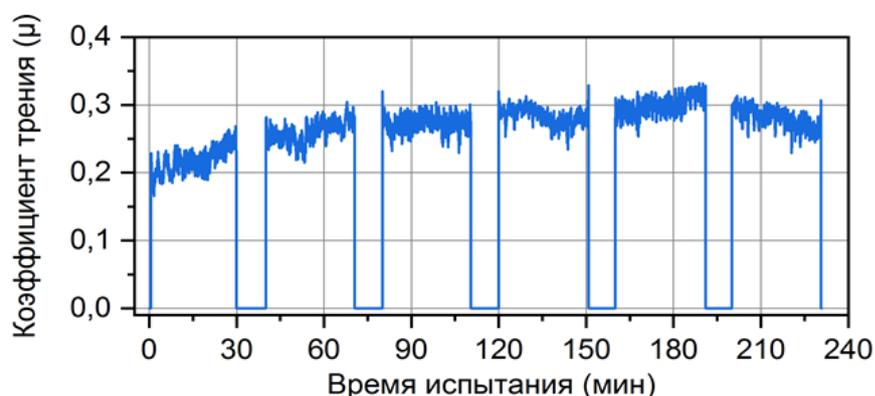


Рисунок 4.10 – Изменение коэффициента трения при испытании материала на торцевой машине трения

В ходе испытаний на торцевой машине трения наблюдался нестационарный режим, который представляет собой последовательное образование и отрыв вторичных структур. Этот процесс приводит к временным колебаниям коэффициента трения – сначала наблюдается его рост, затем снижение. Изменение коэффициента трения можно объяснить сложной динамикой приработки материала, в которой решающее значение имеет взаимодействие контактных поверхностей. Длительность периода приработки непосредственно зависит от геометрических параметров образцов, а также от размыкания трибопары, осуществляемого для выявления процессов формирования вторичных структур. Метод ИК-спектроскопии позволил зафиксировать перераспределение материалов, а также образование вторичных структур при их взаимодействии.

При анализе спектров, полученных с поверхности образцов после трения (рисунок 4.11), было установлено, что для структур данного типа пики находятся в диапазонах волновых чисел $3200\text{--}2700\text{ см}^{-1}$ и $1600\text{--}600\text{ см}^{-1}$:

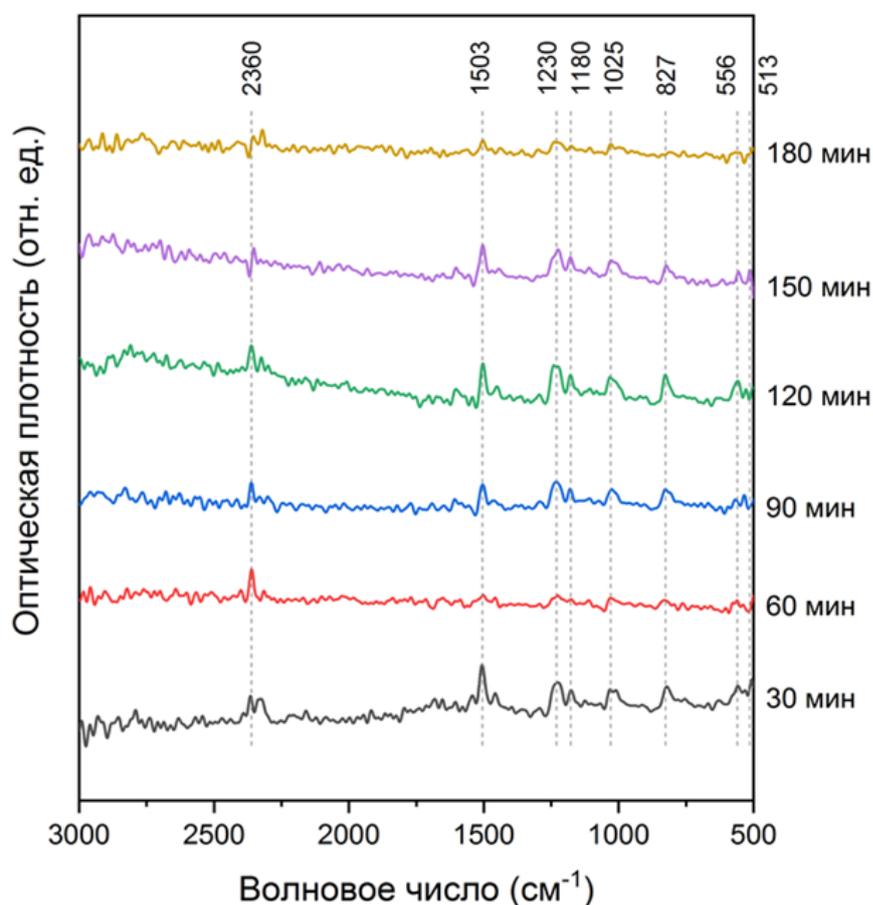


Рисунок 4.11 – ИК-Фурье спектры вторичных структур с поверхности контртела

- 827 см^{-1} – соответствует деформации С–О–С оксиранового кольца эпоксидной группы;
- 1025 см^{-1} – представляет собой деформацию С–О–С сложноэфирных групп;
- 1503 см^{-1} – относится к деформации ароматических соединений С–С.

На ИК-спектре в диапазоне $650\text{--}900\text{ см}^{-1}$ фиксируется отвердитель в виде полос деформационных колебаний связи N–H, что указывает на наличие аминной группы С–NH₂ [201–206]. Полученная в спектре полоса 2360 см^{-1} (см. рисунок 4.11) соответствует антисимметричным валентным колебаниям ν_2 молекулы CO₂ [207–209].

Для проведения спектрального анализа политетрафторэтилена была использована структурная модель, основным элементом которой является молекулярная цепь перфторорганического (ПФО) соединения C_nF_{2n+2} [210]. В данном олигомере все атомы водорода, соединенные с атомами углерода, замещены на атомы фтора.

Путем сопоставления модели с экспериментально полученными спектрами были выявлены полосы, волновые числа которых соответствуют значениям 1180 и 1230 см^{-1} . Данные пики свидетельствуют о валентных колебаниях группы CF₂. Подробное рассмотрение области вокруг $\sim 1240\text{ см}^{-1}$ выявляет перегиб, представляющий собой деформационные колебания ν С–С связи. На частотах 556 и 513 см^{-1} были определены соответственно деформационные и маятниковые колебания группы CF₂. Важно отметить, что данные полосы полностью совпадают с ИК-спектрами ПТФЭ, описанными в [211–212].

Проведенный анализ ИК-спектров показал, что модифицированный полимерный материал, в основе которого применялась эпоксидная смола, способствует формированию вторичных структур. В процессе трибосопряжения на металлическом контртеле образуются структуры композиционного материала (см. рисунок 4.11). Формирование валентной группы С–F в диапазоне $1150\text{--}1250\text{ см}^{-1}$, а также регистрация полос С–О–С оксиранового кольца эпоксидной группы $600\text{--}1500\text{ см}^{-1}$ служит подтверждением данного процесса. При дальнейшем фрикционном взаимодействии интенсивность полос снижается, а затем

стабилизируется, что позволяет сделать предположение о цикличности процессов формирования вторичных структур и их последующего разрушения. Это указывает на динамику изменений, происходящих в материале под воздействием трения, что, в свою очередь, может влиять на его эксплуатационные характеристики и долговечность деталей машин, работающих в особо тяжелых условиях. Таким образом, наблюдаемая закономерность подчеркивает важность контроля фрикционных свойств материалов в условиях их практического применения.

Для углубленного анализа морфологии поверхности и элементного состава вторичных структур, образующихся на металлическом диске, использовались высокоточные методы растровой электронной микроскопии (РЭМ) и энергодисперсионной спектроскопии. Оценка микроструктуры проводилась на универсальном растровом электронном микроскопе Zeiss EVO MA 18, оснащенный энергодисперсионным спектрометром X-Max 50N. Программное обеспечение Aztec микроскопа позволило получить количественное представление о химическом составе образований.

В результате проведенного анализа было установлено, что взаимодействие металлического контртела с модифицированным материалом ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ ведет к образованию вторичных структур. На рисунке 4.12 представлен их общий вид на поверхности дорожки трения, а также характерный электронный спектр сформированного образования и концентрация перенесенных химических элементов.

Электронный спектр демонстрирует элементы с различными энергетическими уровнями. Линии углерода с энергией 277 эВ, кислорода – 526 эВ, фтора – 677 эВ и железа, состоящего из компонентов со значениями 615, 703, 6404, 7058 эВ, указывают на химическое взаимодействие в зоне трения.

Наличие фтора, зафиксированного на уровне 677 эВ, подтверждает перенос политетрафторэтилена на подложку. Учитывая его весовое содержание 1,5 %, можно сделать вывод о том, что фрикционное взаимодействие усиливает формирование вторичных структур, которые, в свою очередь, могут оказывать влияние на эксплуатационные характеристики композита.

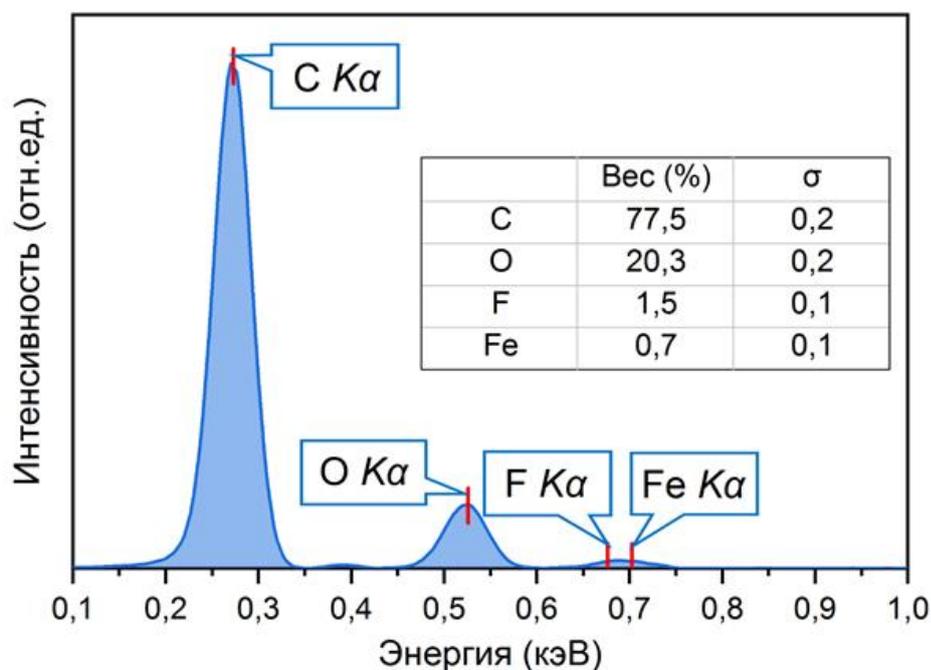
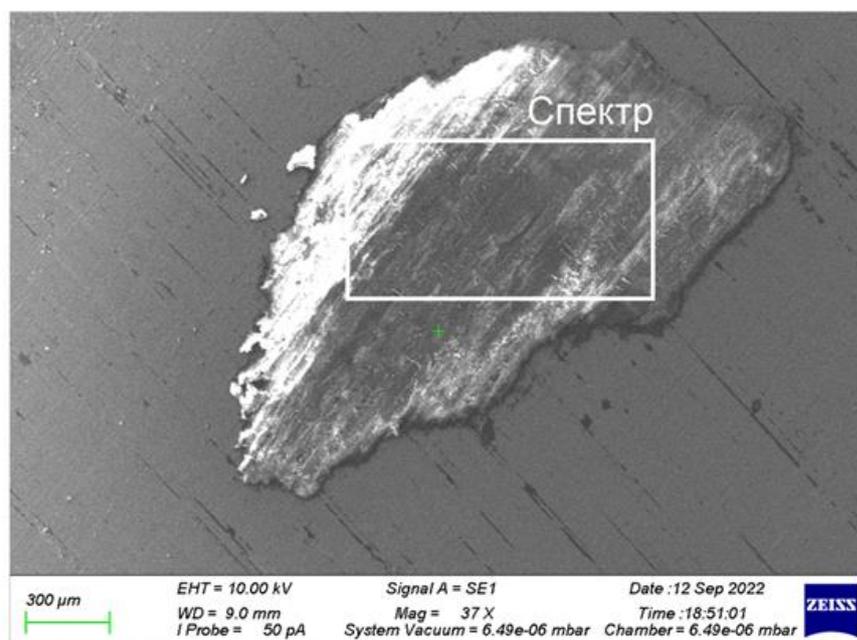


Рисунок 4.12 – Элементный состав вторичных структур в зоне дорожки трения

Результаты испытаний показывают, что приработанные поверхности обладают уникальными свойствами, которые существенно влияют на эффективность работы трибосистем. Понимание этих процессов необходимо для разработки более надежных материалов и технологий, что, в свою очередь, ведет к улучшению эксплуатационных характеристик машин и механизмов.

4.6 Исследование вторичных структур на поверхности трения

С помощью разработанных и аттестованных спектроскопических методик [213–215] рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (далее – РФЭС) на системе анализа SPECS был проведен анализ процесса формирования пленки фрикционного переноса на поверхность контртела.

Образец для испытаний содержал две дорожки трения. Регистрация спектра осуществлялась как в следе трения (на рисунке 4.13 этому спектру соответствует цифра 1), так и на границе «след трения – контртело» (цифра 2 на рисунке 4.13).

Из рисунка 4.13 видно, что наибольшей интенсивностью обладают линии кислорода (энергия связи в следе трения равна ~ 530 эВ, а на границе «след трения – контртело» – ~ 532 эВ) и углерода (энергия связи составляет ~ 285 эВ). О наличии железа уровня $2p$ свидетельствует слабоинтенсивная «ступенька» в области энергий связи около 710 эВ.

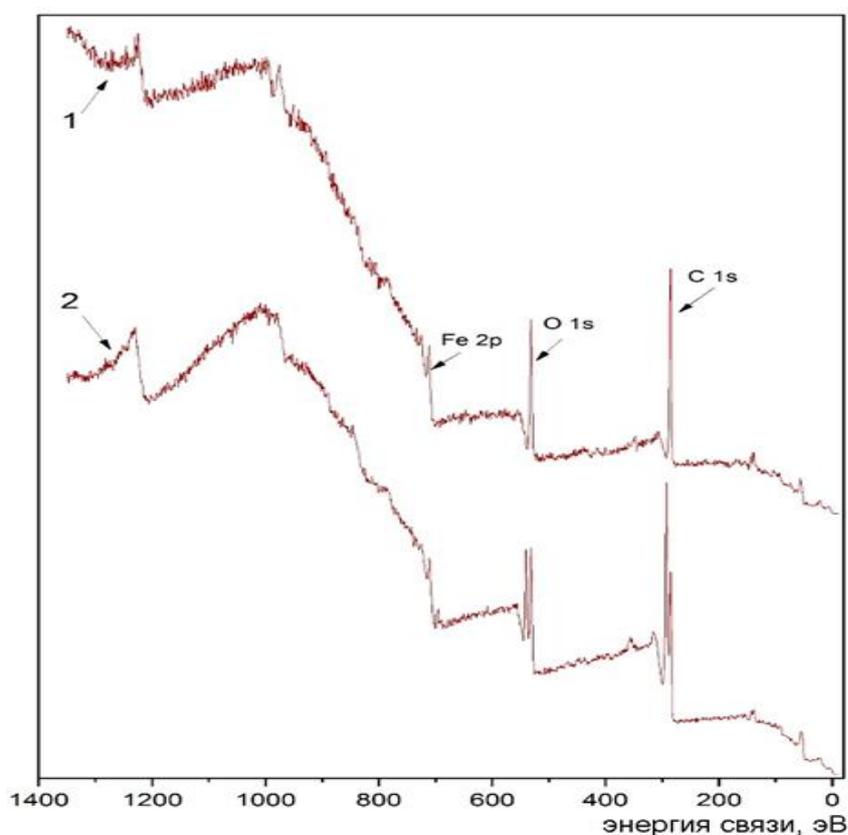


Рисунок 4.13 – Обзорные спектры РФЭС с поверхности «след трения» (1) и на границе «след трения – контртело» (2)

Содержание атомов в продуктах фрикционного переноса для спектров 1 и 2 имеет существенное различие (таблица 4.7). Наличие кислорода в следе трения составляет 27,1 ат. %, а на границе «след трения – контртело» это значение существенно меньше и составляет 22,2 ат. %. Этот факт можно объяснить тем, что в первом случае кислород взаимодействует с атомами железа, а во втором – вступает в реакцию с водородом. Атомарное содержание углерода для спектра 2 составило 74,5 ат. %, а для 1 – 67,4 ат. %, что говорит об углеводородных загрязнениях стали. Содержание железа (в процентном соотношении с другими элементами значительно меньше) в «следе трения» – 5,5 ат. %; «след трения – контртело» – 3,3 ат. %.

Таблица 4.7 – Элементный состав продуктов фрикционного переноса на поверхности «след трения» (1), на границе «след трения – контртело» (2)

Элементный состав Параметры	Фрикционный перенос на поверхности					
	<i>следа трения</i>			<i>след трения – контртело</i>		
	Fe 2p	O 1s	C 1s	Fe 2p	O 1s	C 1s
Энергия связи, эВ	704...717	530	285	704...717	532	285
Содержание, ат. %	5,5	27,1	67,4	3,3	22,2	74,5

Анализ химического состава продуктов фрикционного переноса по внутренним спектрам (C 1s, O 1s и Fe 2p), проведенный с применением метода РФЭС, в месте съемки спектров «следа трения» 1 и «след трения – контртело» 2 показал существенные отличия (рисунок 4.14) по сравнению с обзорными спектрами, приведенными на рисунке 4.13.

Анализ атомов химических элементов продуктов фрикционного переноса показал практически полное совпадение со значениями спектров 1 и 2. Однако снижение интенсивности наложенных линий спектра 2 свидетельствует о том, что съемка спектров осуществлялась из места, содержащего границу между материалом контртела и сформированной в процессе трения пленки

фрикционного переноса, на что указывает также со стороны большей энергии связи на спектре 2 компонента *A* (рисунок 4.14, *a* и *б*).

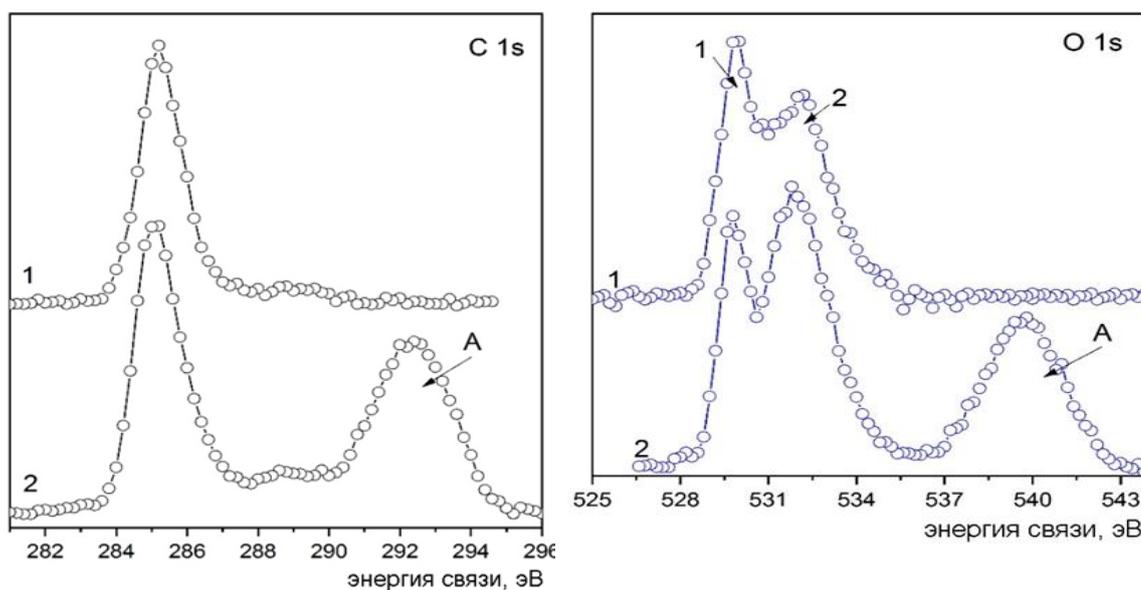
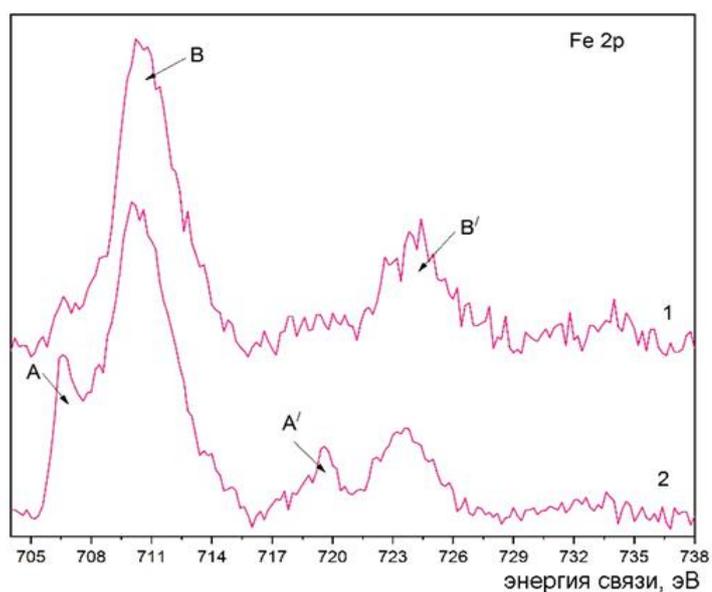
*a**б**в*

Рисунок 4.14 – Спектры РФЭС для линий C 1s, O 1s и Fe 2p с поверхности «след трения» (1) и на границе «след трения – контртело» (2)

Зафиксированные химические элементы при фрикционном взаимодействии указывают также на наличие поверхностных загрязнений образцов, что, естественно, возможно при проведении испытаний в лабораторных условиях. На спектре углерода С 1s (энергия связи ~ 285 эВ), соответствующего С–С связи, можно обнаружить дополнительные пики, которые указывают на возможные реакции углеводородов с поверхностными оксидами. Это подтверждает наличие загрязнений на стали, образовавшихся в процессе трения как на воздухе в условиях испытаний, так и от условий вакуума аналитической камеры спектрометра.

Спектр кислорода О 1s демонстрирует двойное распределение энергии, что может свидетельствовать о различных состояниях исследуемых образцов. На рисунке 4.14, б в спектре кислорода О 1s компонента 1 с энергией связи ~ 530 эВ подтверждает наличие оксидов железа, тогда как компонента 2, энергия связи которой составляет ~ 532 эВ, подчеркивает присутствие молекул воды [216].

Рассмотрим химическое состояние железа по спектрам, представленным на рисунках 4.13 и 4.14, в. В спектре 2 сформирована новая структура А железа уровня Fe 2p (рисунок 4.14, в). Данная компонента указывает на наличие атомов железа на границе «след трения – контртело» со степенью окисления ноль. В свою очередь, компонента В соответствует оксиду Fe₃O₄, что говорит об окислительной реакции железа в следе трения [217–218]. Компоненты А' и В', находящиеся в диапазоне 717–728 эВ, относятся к тонкой структуре спектра Fe 2p_{1/2}. Их формирование полностью идентично линиям спектра Fe 2p_{3/2}, расположенным в диапазоне энергий 704–717 эВ. Следует отметить, что разница в энергии связи электронов уровня Fe 2p_{3/2} для металлического и окисленного состояний составляет $\sim 3,7$ эВ.

4.7 Определение тепловых процессов

4.7.1 Влияние наполнителей на температуру композиционного материала

Эксплуатационные свойства полимерных материалов, как известно, определяются их составом, молекулярным строением и надмолекулярной организацией. Исследование изменений этих свойств в зависимости от температуры позволяет отметить, что существуют области, в которых происходит резкое изменение характеристик материала. Обусловлено это тем, что в этих температурных зонах происходит изменение молекулярной подвижности или какие-либо структурные превращения. Изменение скорости подвижности различных участков макромолекул является проявлением областей релаксации, а именно релаксационной природой, и обусловлено макроскопическими характеристиками полимеров.

Физическая модификация полимеров является основой изменения эксплуатационных свойств исходного материала. В зависимости от свойств вводимого наполнителя и его совместимости с матрицей можно создавать композитные материалы, сочетающие эластичность, износостойкость и прочность исходного полимера с повышенными модулем упругости и долговечностью, а также низким коэффициентом трения.

Исследование влияния содержания наполнителя на термические превращения в полимерном композите проводилось методом термического анализа, основанным на термогравиметрии (ТГА), дифференциальном термическом анализе (ДТА) и дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) [166]. Полученные данные дают широкую информацию о термической устойчивости материала. Масс-спектроскопический анализ выделяющихся газообразных продуктов по термограммам позволяет сделать выводы о термическом разложении как полимера, так и композиционного материала на его основе.

Синхронный термический анализ, проведенный на высокочувствительном дериватографе STA 449 F3 Jupiter фирмы NETZSCH, позволил получить детальную оценку термической стабильности образца. Программное обеспечение Netzsch Proteus Analyses обеспечило интегральными термогравиметрическими (ТГ) данными, что позволило определить массу образца на различных стадиях разложения. Это дало возможность установить количественное изменение массы образца и выявить ключевые стадии термической деструкции. Анализ дифференциальных термогравиметрических кривых (ДТГ) помог установить температурные интервалы деструкции, все ступени эндотермического эффекта, а также температуру начала и конца разложения. Важно отметить, что пики на кривой ДТГ указали на температуры, при которых разложение происходило с максимальной скоростью, что является критически важным для понимания термической устойчивости материала.

Процесс термического разложения у чистой смолы ЭД-20 проходил в одну стадию в интервале температур от 180 до 480 °С (рисунок 4.15). Максимальная скорость деструкции равна 11,57 %/мин и наблюдалась при температуре 364 °С, о чем свидетельствует пик на кривой ДТГ. Разложение происходило практически полностью, потеря массы образца составила 94 %.

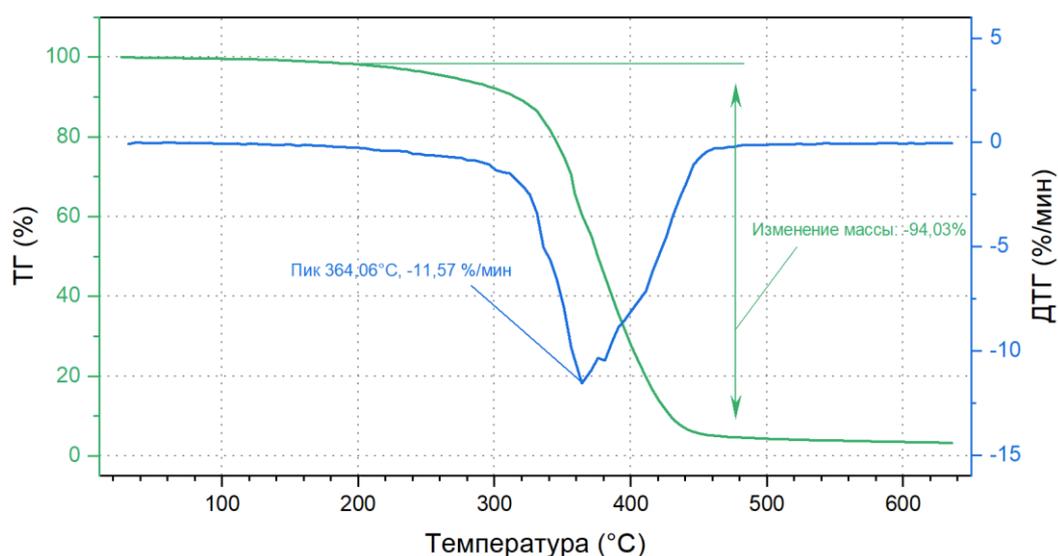


Рисунок 4.15 – Результаты термического анализа смолы ЭД-20

На рисунке 4.16 представлены результаты термического анализа смолы ЭД-20 с добавлением 6 % шпинели металлов в качестве наполнителя. Процесс разложения, как и в случае с ЭД-20 без добавок, одностадийный. Начало разложения смещалось в область более высоких температур и составило 315 °С. Максимальная скорость деструкции (23,45 %/мин) достигалась при температуре 362 °С. Потеря массы образца прекратилась при температуре 460 °С и составила 65,93 %, что значительно меньше, чем у ЭД-20 без добавки шпинели.

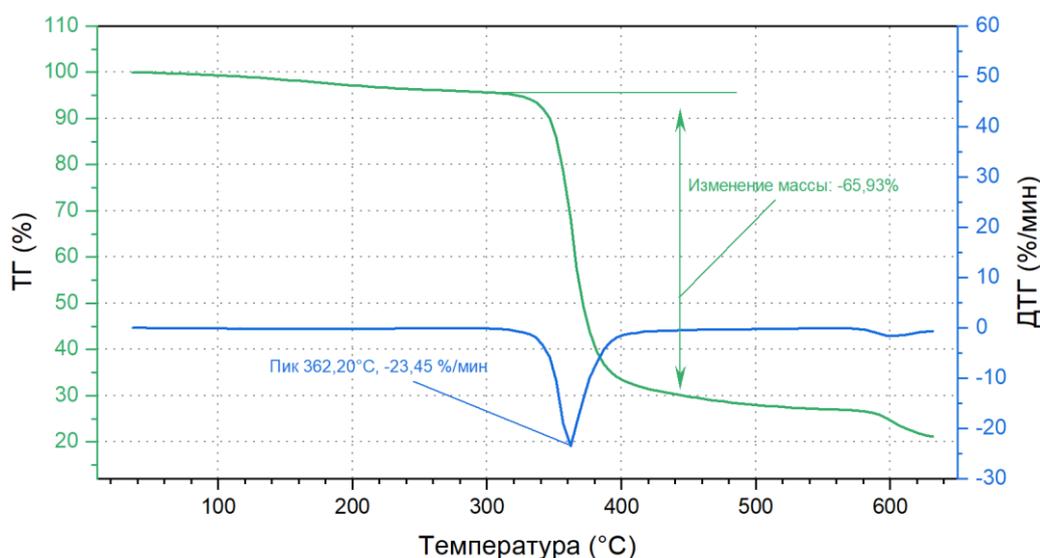


Рисунок 4.16 – Результаты термического анализа смолы ЭД-20 + 6 % шпинели

На рисунке 4.17 у композиционного полимерного материала ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ отчетливо наблюдалось два эндотермических эффекта. Первая ступень разложения происходила в интервале температур от 295 до 450 °С, которая значительно выше, чем у образца из чистой смолы ЭД-20, но ниже, чем у образца с добавлением только шпинели в качестве добавки. При этом максимальная скорость деструкции, равная 12,67 %/мин, достигалась при температуре 369 °С, а потеря массы составляла 51,49 %. Второй эндотермический эффект начинался практически без смещения и проходил в интервале от 450 до 600 °С. Анализ кривой ДТГ показал, что при температуре 499 °С достигалась максимальная скорость деструкции 1,91 %/мин. Потеря массы на кривой ТГ

составила около 11,79 %. Если принять во внимание, что процесс деструкции происходил в две стадии, то суммарная потеря массы образца равна 63,28 %, что значительно меньше, чем для чистой смолы ЭД-20 и ЭД-20 + 6 % шпинели. Обобщенные результаты термического анализа исследуемых материалов приведены в таблице 4.8.

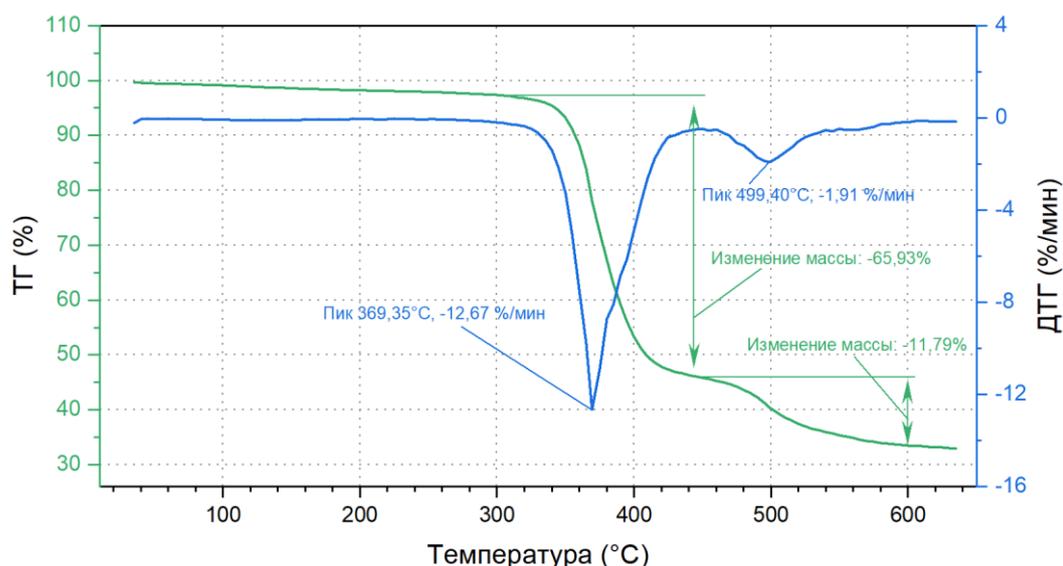


Рисунок 4.17 – Результаты термического анализа смолы ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ

Таблица 4.8 – Обобщенные данные термического анализа материалов

№ п/п	Состав образцов	Период термической деструкции, °С	Максимальная скорость деструкции, %/мин	Потеря массы, %
1	ЭД-20	180–480	11,57 при $t = 364$ °С	94
2	ЭД-20 + 6 % шпинели	315–460	23,45 при $t = 362$ °С	65,93
3	ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ	295–450	12,67 при $t = 369$ °С	51,49
		450–600	1,91 при $t = 499$ °С	11,79
				63,28

На основании анализа дифференциального термического поведения исследованных образцов можно сделать вывод о высокой термической устойчивости модифицированного полимерного материала ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ. Данный состав демонстрирует значительное повышение термостойкости, что подтверждается тем, что процессы термической деструкции

начинаются лишь при температуре, превышающей 369 °С. Скорость разложения данного образца при этом составляет 12,67 %/мин, что указывает на его относительную стабильность в условиях нагрева. Суммарное изменение массы, наблюдаемое при двух эндотермических эффектах, было минимальным и составило 63,28 %. Таким образом, результаты исследования подтверждают, что модификация полимерных материалов указанными добавками заметно улучшает их термическую стабильность, что может способствовать расширению области их применения в различных отраслях, требующих устойчивости к высоким температурам.

4.7.2 Влияние температуры на физико-механические свойства композиционного материала

Следующим этапом исследований было определение влияния температуры на вязкоупругие свойства материала. Анализ результатов физико-механических и термических испытаний трех различных составов показал, что для последующего исследования следует выбрать композиционный материал ЭД-20 + + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ. В таблице 4.9 приведены средние значения относительного изменения глубины индентирования, а также статистические показатели микротвердости поверхности, полученные на основе формул (4.1)–(4.3).

Индентирование осуществлялось с помощью трапецеидального режима нагружения при нагрузке $P = 200$ мН и скорости нагружения $V = 10$ мН/с. Идентификация данных проводилась при температурах: 25, 60, 85 и 100 °С с увеличением времени выдержки t_B : 300, 900, 1800, 2700 и 3600 с. В зоне индентирования температура поддерживалась постоянной на весь период времени выдержки. Аппроксимированные кривые относительного изменения глубины индентирования при увеличении времени выдержки t_B приведены на рисунке 4.18.

Таблица 4.9 – Значения относительного изменения глубины индентирования под воздействием постоянной нагрузки с увеличением времени выдержки t_B и статистические данные по микротвердости поверхности

n	t_B, c	h_1	h_2	$C_{IT}, \%$	S	$v, \%$
1	2	3	4	5	6	7
Температура 25 °С						
1	300	3808,641	4144,841	8,89	0,373	0,009
2		4016,027	4364,716			
3		4181,044	4536,485			
4		3997,586	4376,749			
5		4073,685	4438,194			
1	900	3808,641	4163,582	10,99	1,084	0,024
2		4016,027	4465,039			
3		4181,044	4640,552			
4		3997,586	4491,316			
5		4073,685	4527,771			
1	1800	3808,641	4166,402	13,21	2,283	0,051
2		4016,027	4579,633			
3		4181,044	4731,829			
4		3997,586	4615,678			
5		4073,685	4641,773			
1	2700	3808,641	4205,089	15,02	2,647	0,057
2		4016,027	4644,864			
3		4181,044	4829,954			
4		3997,586	4678,508			
5		4073,685	4743,922			
1	3600	3808,641	4253,011	16,73	2,906	0,062
2		4016,027	4713,679			
3		4181,044	4919,091			
4		3997,586	4760,401			
5		4073,685	4802,707			
Температура 60 °С						
1	300	4610,946	5032,049	9,41	0,366	0,007
2		4699,849	5161,723			
3		4663,104	5118,969			
4		4671,737	5096,733			
5		4880,091	5328,037			
1	900	4610,946	5061,887	11,51	1,016	0,019
2		4699,849	5283,598			
3		4663,104	5222,652			
4		4671,737	5220,552			
5		4880,0913	5447,013			

Продолжение таблицы 4.9

1	2	3	4	5	6	7
1	1800	4610,946	5075,065	13,15	1,742	0,033
2		4699,849	5374,565			
3		4663,104	5307,832			
4		4671,737	5317,925			
5		4880,091	5545,904			
1	2700	4610,946	5126,157	14,65	2,013	0,037
2		4699,849	5465,494			
3		4663,104	5375,228			
4		4671,737	5402,808			
5		4880,091	5605,072			
1	3600	4610,946	5163,309	16,14	2,357	0,043
2		4699,849	5525,089			
3		4663,104	5452,418			
4		4671,737	5491,628			
5		4880,091	5693,975			
Температура 85 °С						
1	300	8017,303	9543,781	19,84	0,542	0,006
2		8165,459	9795,669			
3		8227,956	9842,811			
4		8236,801	9889,843			
5		8313,691	10017,117			
1	900	8017,303	10477,543	31,27	1,389	0,013
2		8165,459	10685,593			
3		8227,956	10654,631			
4		8236,801	10902,503			
5		8313,691	11054,096			
1	1800	8017,303	11075,959	39,31	1,166	0,011
2		8165,459	11275,366			
3		8227,956	11500,002			
4		8236,801	11506,349			
5		8313,691	11706,108			
1	2700	8017,303	11371,224	45,69	2,803	0,024
2		8165,459	11818,556			
3		8227,956	11975,814			
4		8236,801	12095,058			
5		8313,691	12426,565			
1	3600	8017,303	11827,721	50,69	5,014	0,041
2		8165,459	12033,619			
3		8227,956	12035,823			
4		8236,801	12805,672			
5		8313,691	13035,273			
Температура 100 °С						

Продолжение таблицы 4.9

1	2	3	4	5	6	7
1	300	9965,6819	13554,881	36,99	0,979	0,007
2		9911,602	13481,323			
3		9889,922	13676,448			
4		9854,029	13542,864			
5		10180,634	13971,712			
1	900	9965,6821	15257,004	55,62	2,262	0,015
2		9911,602	15244,514			
3		9889,922	15562,532			
4		9854,029	15317,651			
5		10180,634	16126,499			
1	1800	9965,682	16671,087	72,55	4,053	0,024
2		9911,602	16954,551			
3		9889,922	17010,347			
4		9854,029	17155,164			
5		10180,634	18152,194			
1	2700	9965,682	18236,711	85,65	4,465	0,024
2		9911,602	18314,496			
3		9889,922	18815,571			
4		9854,029	17748,288			
5		10180,634	19356,774			
1	3600	9965,682	18781,241	95,06	5,086	0,026
2		9911,602	19241,122			
3		9889,922	19941,809			
4		9854,029	18995,297			
5		10180,634	20188,523			

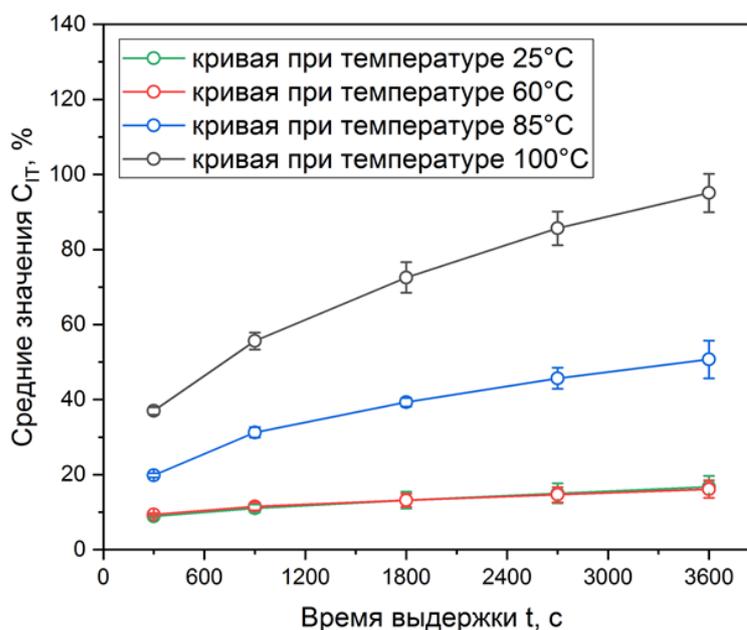


Рисунок 4.18 – Средние значения C_{IT} для ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ при разной температуре в зоне контакта

Статистический анализ проведенных испытаний показал, что композиционный материал обладает хорошей стабильностью данных в отношении ползучести для всего периода времени выдержки. При $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ изменение глубины индентирования варьируется от 8,89 до 16,73 % ($\sim 7,84\%$), что указывает на умеренные колебания показателей ползучести и тем самым подчеркивает надежность используемого композита в условиях комнатной температуры. При $t = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ разница значений коэффициента ползучести не превышает $\sim 6,73\%$, что свидетельствует о том, что материал сохраняет свои механические свойства при умеренных термических воздействиях. Дальнейшее повышение температуры ведет к увеличению вязких свойств полимерного композита. Результаты испытаний показали, что ползучесть материала под постоянной нагрузкой начинается задолго до полной термической деструкции, что предполагает его потенциальное применение в условиях повышенных температур при длительных нагрузках.

4.8 Выводы по главе 4

В результате проведения экспериментальных исследований свойств материала установлено следующее:

1. Введение в полимерную матрицу 6 % шпинели металлов и 6 % ПТФЭ способствует снижению коэффициента трения при контактном давлении 58,8...70,5 МПа на 16,7 %, а при 74,1...88,8 МПа – на 28,6 % по сравнению с немодифицированным полимером.

2. Относительное изменение глубины индентирования модифицированного полимерного материала варьируется незначительно (в пределах 4 % ($\sim 3,82\%$)). Установившееся значение C_{IT} при увеличении времени выдержки свидетельствует о релаксационной твердости.

3. Порошок политетрафторэтилена в полимерной матрице при контактном взаимодействии с металлическим контртелом способствует формированию вторичных структур. Данный факт подтверждает образованная валентная группа

C–F в диапазоне 1150–1250 cm^{-1} . При этом продукты износа ПТФЭ представляют собой граничную смазку. Дальнейшее трение образованного «третьего тела» происходит циклично: удаление и последующее образование вторичных структур.

4. Анализ спектров C 1s, O 1s и Fe 2p подтверждает наличие вторичных структур на поверхности контртела:

- атомы железа тесно взаимодействуют с кислородом, что характеризует окислительную реакцию;
- деформационные колебания C–C связи говорят о наличии углеводородных загрязнений, которые возможны при контактном взаимодействии исследуемых образцов со стальным контртелом.

5. Эпоксидно-диановая смола ЭД-20 с применением наполнителей в виде шпинели металлов и политетрафторэтилена марки Ф4МБ обладает наибольшей термической устойчивостью: термическая деструкция по сравнению с образцами других составов происходит в два этапа при более высоких температурах от 369 °С, скорость разложения при этом не достигает предельной величины (12,67 %/мин), суммарная потеря массы за два эндотермических эффекта показала наименьшее значение и составила 63,28 %.

6. В процессе идентификации влияния температуры на вязкоупругие свойства материала наблюдается рост S_{IT} при температуре свыше 85 °С. Это свидетельствует о том, что вязкие свойства материала возникают задолго до полной термической деструкции.

Глава 5. ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ УЗЛА ТРЕНИЯ «НАКЛАДКА НАПРАВЛЯЮЩЕЙ ПОВОРОТНОГО СТОЛА – СТАНИНА СТАНКА»

В данном разделе представлены экспериментальные данные анализируемой трибологической системы в режиме трения скольжения, а также результаты промышленного тестирования разработанных материалов. Основной целью этого раздела является подтверждение теоретических выводов, сформулированных в виде окончательных математических выражений и данных, полученных с помощью численного моделирования на основе метода конечных элементов. Также представлены данные о промышленных испытаниях, выполненных на производственном оборудовании ООО «РостИнТех».

5.1 Анализ теоретических исследований рассматриваемого узла трения

В подтверждение теоретических выводов настоящего исследования был проведен анализ напряженно-деформированного и теплового состояний узла трения «накладка направляющей поворотного стола – станина станка» горизонтально-расточного станка 2А622, полученных в результате численного решения контактной задачи при геометрических и теплофизических параметрах.

Нагрузка составила $P = 5000$ т со скоростью движения $V = 800$ мм/мин = $0,013$ м/с, амплитуда $A = 10$ мм. При расчете задавалось 300 циклов возвратно-поступательного движения с шагом по времени 0,5. Объектом исследования было выбрано комбинированное двухслойное покрытие. Нижний слой представляет собой подложку из смолы марки ЭД-20 (ГОСТ 10587-84) для улучшения адгезии между основанием из стали 45 ГОСТ 1050-2013 и верхним слоем. Верхним слоем для анализа были выбраны три варианта состава композита: первый вариант – контрольный – представляет собой смолу марки ЭД-20 без наполнителей, второй отличается от первого введением в полимерную матрицу 6 % мелкодисперсной шпинели. Третий вариант модификации – ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ.

Для построения конечно-элементной модели использовались теплофизические параметры, значения которых были определены из справочной литературы, а также в результате проведенных трибологических, физико-механических и тепловых исследований (таблица 5.1).

Таблица 5.1 – Теплофизические параметры

Параметры	Жесткий штамп	Нижний слой	Верхний слой		
			Смола ЭД-20	Смола ЭД-20 + 6 % шпинели	Смола ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ
Состав	Сталь 45	Смола ЭД-20	Смола ЭД-20	Смола ЭД-20 + 6 % шпинели	Смола ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ
Модуль упругости E_i , ГПа	200	3,86	3,86	5,1	4,73
Коэффициент Пуассона ν_i	0,26	0,25	0,25	0,28	0,3
Плотность материала ρ , кг/м ³	7799	1250	1250	1400	1350
Коэффициент теплового расширения α_{Ti} , (°C) ⁻¹	$11,9 \cdot 10^{-6}$	$55 \cdot 10^{-6}$	$55 \cdot 10^{-6}$	$45 \cdot 10^{-6}$	$50 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент теплопроводности α_i , Вт/(м·°C)	48	0,19	0,19	0,2	0,21
Коэффициент теплоёмкости C_i , Дж/кг·K	473	1210	1210	1200	1200
Коэффициент трения	–	0,63	0,63	0,71	0,54

Результаты распределения напряженно-деформированного состояния и температуры удобно оценивать вдоль линий AB и CD (рисунок 5.1), точки которых имеют следующие координаты:

$$A (0; h_1 + h_2; 0); B \left(\frac{L_1}{2}; h_1 + h_2; 0 \right); C \left(\frac{L_1}{4}; h_1 + h_2; 0 \right); D \left(\frac{L_1}{4}; h_1 + h_2; -a \right).$$

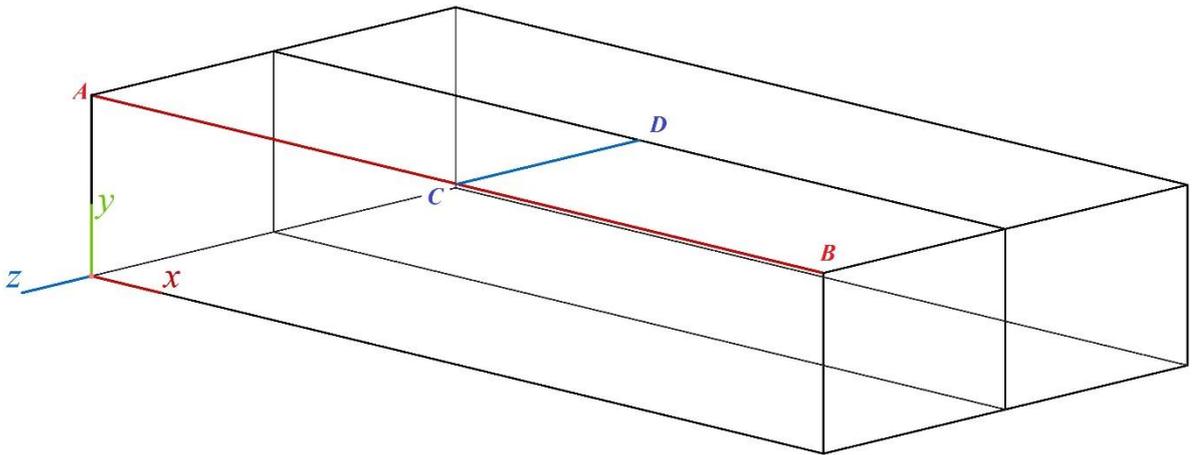


Рисунок 5.1 – Геометрическое представление пространственной задачи

В конечном итоге были получены результаты изменения деформации (рисунок 5.2, *а*) и температуры (рисунок 5.2, *б*) для трех разных составов верхнего слоя по линии *AB*.

По сравнению с материалом из смолы марки ЭД-20 добавление 6 % шпинели металлов в полимерную основу ведет к увеличению деформации. В свою очередь, модифицированный материал смола ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ менее подвержен деформационным процессам. Причиной этого являются изменения теплофизических параметров материалов: коэффициента теплового расширения и коэффициента теплопроводности.

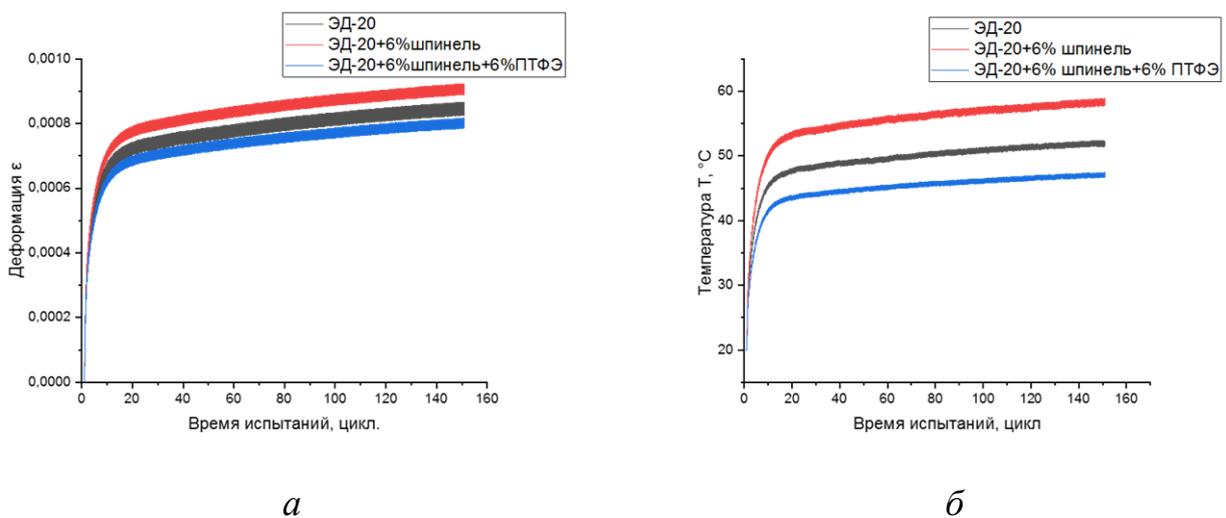


Рисунок 5.2 – Изменение деформации (*а*) и температуры (*б*) в течение 300 циклов по времени

Графическое представление изменения температуры носит экспоненциальный характер. При расчетных параметрах температура материала из смолы ЭД-20 достигает ~ 52 °С. При добавлении 6 % шпинели металлов в исследуемый материал температура асимптотически стремится к ~ 59 °С. На это влияют теплофизические параметры шпинели. В свою очередь, образец с составом верхнего слоя смола ЭД-20 + 6 % шпинель + 6 % ПТФЭ в результате решения контактной задачи достигает наименьшего значения температуры ~ 45 °С, так как фторопласт с точки зрения теплофизических характеристик плохо проводит тепло. Таким образом, добавление 6 % ПТФЭ в полимерную матрицу повышает устойчивость к термическому разложению. Причем распределение температуры и деформации имеет экспоненциальный характер и в первые 20 циклов по времени наблюдается существенный рост, далее – деформация и температура меняются незначительно.

Были получены также результаты распределения нормальных напряжений на последнем шаге расчета вдоль линии AB (рисунок 5.3, a), вдоль линии CD (рисунок 5.3, b), а также вдоль линии CD в окрестности зоны контакта (рисунок 5.3, $в$).

Анализ результатов показал, что при условии конвективного теплообмена распределение нормальных напряжений вдоль линии AB для составов ЭД-20 и ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ имеет несущественную разницу, причем модифицированный материал показывает наименьшее значение. Тогда как добавление только 6 % шпинели металлов в полимерную матрицу значительно увеличивает нормальные напряжения по причине влияния теплофизических параметров мелкодисперсной шпинели.

По линии CD нормальные напряжения меняются нелинейно, наличие модификаторов оказывает незначительное влияние. Напряженное состояние смолы ЭД-20 в окрестности зоны контакта имеет линейную зависимость.

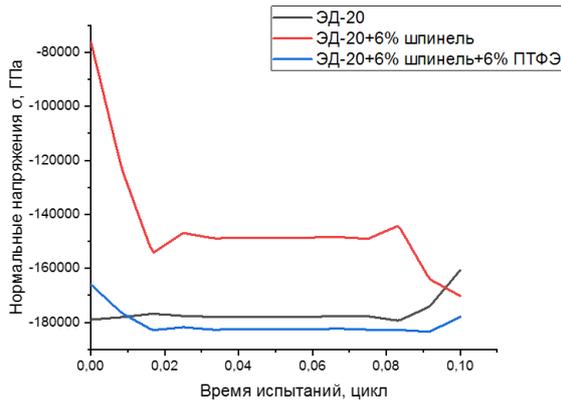
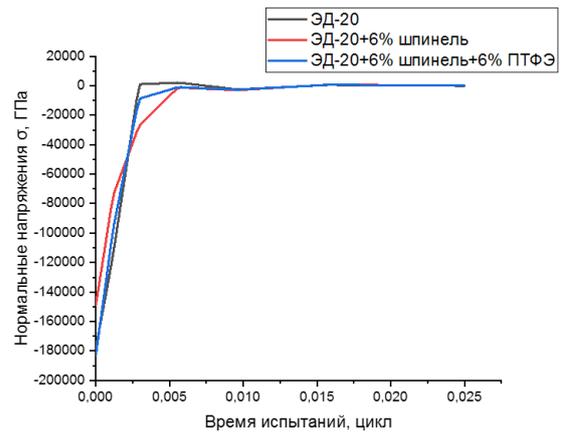
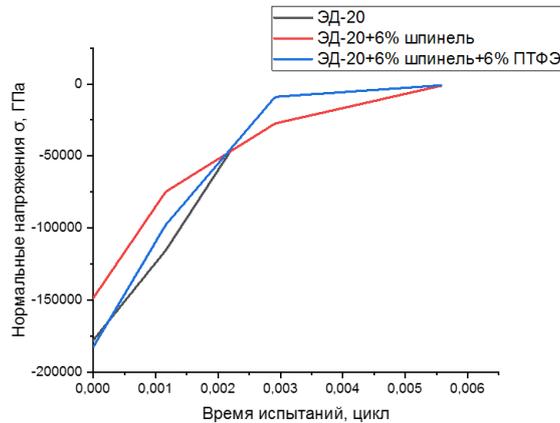
*a**б**в*

Рисунок 5.3 – Распределение нормальных напряжений за время последнего цикла:

a – вдоль линии *AB*; *б* – вдоль линии *CD*; *в* – вдоль линии *CD*
в окрестности зоны контакта

Графическая интерпретация влияния режимов нагружения на температуру в зоне контакта для трех рассматриваемых составов представлена на рисунке 5.4.

Значение температуры по линии *AB* на последнем шаге расчета показывает стабильный характер за исключением небольших колебаний. Так как влияние нагрузочных режимов по линии *CD* в окрестности зоны контакта снижается, то распределение тепловых потоков ведет себя аналогичным образом.

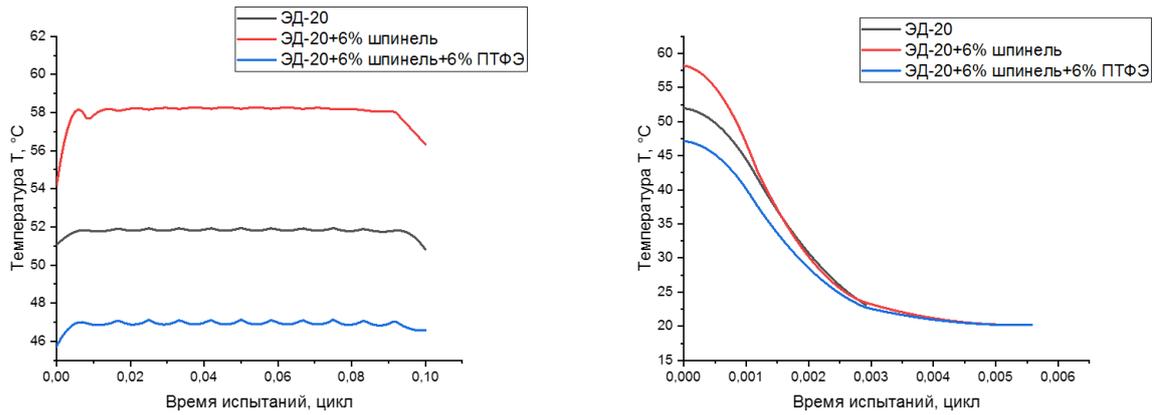
*а**б*

Рисунок 5.4 – Изменение температуры за время последнего цикла:

а – вдоль линии *AB*; *б* – вдоль линии *CD* в окрестности зоны контакта

Таким образом, анализ напряженно-деформированного и теплового состояний узла трения показал, что введение в полимерную матрицу модификаторов в виде 6 % шпинели и 6 % ПТФЭ способствует улучшению механических свойств и повышению устойчивости к термическому разложению.

5.2 Промышленные испытания

Повышению темпов роста промышленной продукции способствуют такие мероприятия, как внедрение современных высокопроизводительных машин и технологий, а также широкая модернизация морально устаревшего оборудования. Решение подобных задач в машиностроительной области прежде всего связано с повышением производительности металлорежущих станков. Эффективная работа этих машин является основой для достижения высоких показателей производительности и конкурентоспособности в условиях современного рынка.

На сегодняшний день в металлообрабатывающей промышленности имеется большой парк морально устаревших и физически изношенных горизонтально-расточных станков модели 2А622. Высокий износ узлов и, как следствие, потеря точности требуют обновления парка. В современной экономической обстановке

целесообразно производить модернизацию имеющегося оборудования оснащением современными комплектующими и системами управления.

Горизонтально-расточные станки с неподвижной передней стойкой и встроенным поворотным столом предназначены для консольной обработки корпусных деталей (рисунок 5.5). Основными узлами таких станков являются:

- жестко закреплённая станина 1;
- неподвижная передняя стойка 4, на которой установлена шпиндельная бабка 5 с горизонтально расположенным расточным шпинделем 3. Шпиндельная бабка может перемещаться по вертикали для установки инструмента на необходимую высоту;
- встроенный поворотный стол 2, на котором устанавливается и закрепляется обрабатываемая деталь. Стол имеет возможность продольного и поперечного перемещения для позиционирования детали относительно инструмента;
- задняя стойка с люнетом для поддержки длинных валов и других протяженных деталей;
- система ЧПУ для автоматического управления перемещениями шпинделя, стола и других узлов станка.

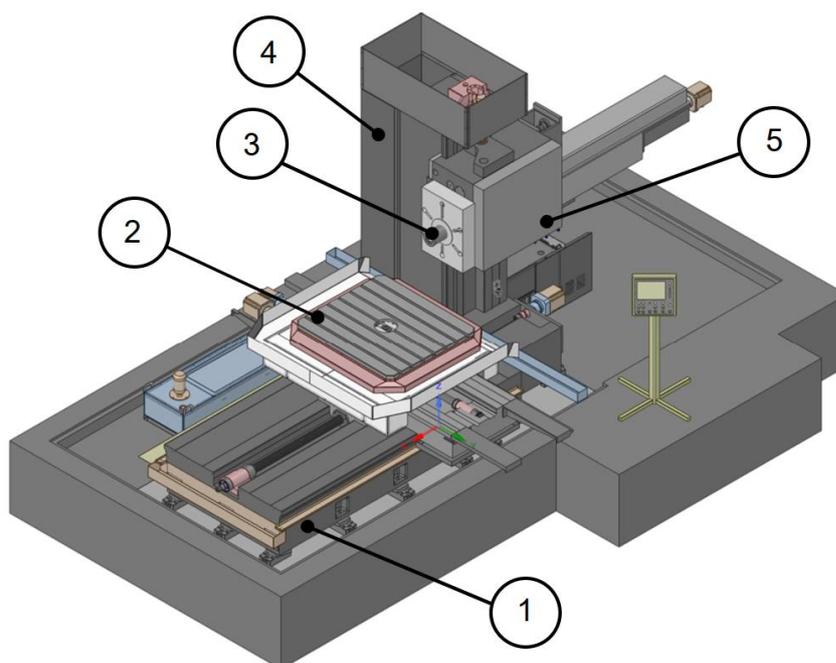


Рисунок 5.5 – Горизонтально-расточной станок модели 2А622

Основные технологические возможности таких станков:

- Растачивание, сверление, зенкерование, развертывание отверстий.
- Фрезерование плоских и фасонных поверхностей.
- Нарезание резьбы.
- Обработка корпусных деталей средних и крупных размеров из черных и цветных металлов.

Станки с неподвижной передней стойкой и встроенным поворотным столом обеспечивают высокую точность обработки за счет жесткой конструкции и возможности точного позиционирования детали. Они широко применяются в единичном и мелкосерийном производстве деталей для машиностроения, авиастроения, судостроения и других отраслей.

Установка обрабатывающего инструмента: обрабатывающий инструмент устанавливается в шпиндель или суппорт Д планшайбы. Инструмент выполняет вращательное движение, которое обеспечивается приводом шпинделя. Это вращение позволяет инструменту эффективно взаимодействовать с обрабатываемой деталью, обеспечивая необходимое снятие материала (см. рисунок 2.1).

Установка обрабатываемой детали: заготовка или деталь для последующей обработки устанавливаются на столе Б станка. Стол имеет возможность перемещения в двух направлениях:

- Продольное перемещение (W): позволяет перемещать заготовку вдоль оси, параллельно направлению движения инструмента.
- Поперечное перемещение (X): обеспечивает перемещение заготовки перпендикулярно направлению движения инструмента.

Перемещения шпинделя: шпиндель, в котором установлен обрабатывающий инструмент, поступательно перемещается в направлении Z . Это движение позволяет инструменту перемещаться вверх и вниз, что необходимо для точного снятия материала с заготовки и формирования требуемой геометрии детали.

Направляющие стола имеют накладки для обеспечения ремонтпригодности. В случае прекращения подачи смазочного материала в зону

направляющих возникают колебания перемещения стола из-за высокой силы трения, и, как следствие, возможна неточность позиционирования заготовки относительно инструмента. Применение композиционных материалов в качестве покрытия накладок уменьшит вероятность возникновения процессов схватывания чистых поверхностей направляющих, что позволит увеличить межремонтный период накладок стола станка. Исходя из объемов парка станков данного типа, модернизация с применением предлагаемого материала в узлах направляющих имеет актуальное значение.

В рамках реконструкции горизонтально-расточных станков на предприятии ООО «РостИнТех» были осуществлены промышленные испытания накладок, обработанных композиционным покрытием. Установка накладок производилась в процессе осуществления регламентного технического ремонта станка типа 2А622 (рисунок 5.6).



Рисунок 5.6 – Общий вид горизонтально-расточного станка модели 2А622 на базе предприятия ООО «РостИнТех»

Поверхность накладок направляющих стола зачищали шлифовальным кругом для полного удаления примесей и создания необходимой шероховатости поверхности. Далее эту поверхность следовало очистить и обезжирить очищающей жидкостью (бензин «Галоша») для обеспечения лучшего адгезионного взаимодействия материала накладки и наносимого

композиционного материала. Композитный материал наносился на поверхность накладки шпателем таким образом, чтобы толщина накладки с нанесенным композиционным покрытием соответствовала размерам допуска. Лучше всего сразу нанести необходимое количество полимерной смеси. Далее поверхность нанесенного композитного материала выравнивалась с помощью специально подготовленных шлифованных линейек. Поверхность линейек обрабатывалась разделительным составом с помощью кисточки. Отверждение композитного материала происходило в течение 15 часов. Толщина нанесенного покрытия при этом составила от 1,5 до 2,5 мм. Установленные накладки с нанесенным композиционным покрытием полностью соответствуют размерам допуска (рисунок 5.7).



Рисунок 5.7 – Установленные накладки направляющих горизонтально-расточного станка модели 2А622

После полугодовой эксплуатации была проведена контрольная разборка накладок направляющих. В ходе этой процедуры была осуществлена тщательная проверка состояния рабочей поверхности накладок.

В результате проверки выявлены следующие положения:

– Рабочая поверхность накладок имеет сглаженную структуру, что свидетельствует о равномерном распределении нагрузок и отсутствии локальных повреждений.

– Не обнаружены следы нарушения целостности или отслоения композиционного слоя, что подтверждает высокое качество нанесенного покрытия и его адгезию к основанию.

В ходе расчета ресурса экспериментальных накладок, выполненного после разборки, было установлено, что величина их износостойкости превышает показатели штатных накладок на 14–16 %. Это говорит о том, что накладки с композиционным слоем обладают значительно более высокой износостойкостью.

Испытания накладок направляющих продолжаются, и полученные результаты уже сейчас демонстрируют их преимущества по сравнению с традиционными решениями. Дальнейшие исследования и тестирования помогут окончательно подтвердить эффективность и целесообразность использования этих инновационных накладок в промышленности.

5.3 Выводы по главе 5

1. Анализ напряженно-деформированного и теплового состояний узла трения показал, что введение в полимерную матрицу модификаторов в виде 6 % шпинели и 6 % ПТФЭ способствует улучшению ее механических свойств и повышению устойчивости к термическому разложению.

2. Промышленные испытания показали, что рабочая поверхность накладок имеет сглаженную структуру, что свидетельствует о равномерном распределении нагрузок и отсутствии локальных повреждений.

3. Не обнаружены следы нарушения целостности или отслоения композиционного слоя, что подтверждает высокое качество нанесенного покрытия и его адгезию к основанию.

4. В ходе расчета ресурса экспериментальных накладок, выполненного после разборки, было установлено, что величина их износостойкости превышает показатели штатных накладок на 14–16 %. Это говорит о том, что накладки с композиционным слоем обладают значительно более высокой износостойкостью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Основные выводы

1. Разработана конечно-элементная модель, позволяющая определить напряженно-деформированное и тепловое состояния узла трения «накладка направляющей поворотного стола – станина станка».

2. Установлен состав полимерного композиционного материала, повышающий эксплуатационные свойства металлополимерного трибосопряжения:

– Введение в полимерную матрицу 6 % шпинели металлов и 6 % ПТФЭ способствует снижению коэффициента трения при контактном давлении 58,8...70,5 МПа на 16,7 %, а при 74,1...88,8 МПа – на 28,6 % по сравнению с немодифицированным полимером.

– Относительное изменение глубины индентирования модифицированного полимерного материала варьируется в пределах 4 % (~3,82 %). Установившееся значение C_{IT} при увеличении времени выдержки свидетельствует о релаксационной твердости.

– Полученный функциональный полимерный материал обладает наибольшей термической устойчивостью: термическая деструкция происходит при более высоких температурах (от 369 °С), скорость разложения при этом не достигает предельной величины (12,67 %/мин), суммарная потеря массы за два эндотермических эффекта показала наименьшее значение – 63,28 %.

– В процессе идентификации влияния температуры на вязкоупругие свойства материала наблюдается рост C_{IT} при температуре свыше 85 °С. Это свидетельствует о том, что вязкие свойства материала возникают задолго до полной термической деструкции.

3. Установлен механизм формирования вторичных структур на поверхности контртела в металлополимерном узле и исследовано их влияние на эксплуатационные свойства:

– наличие в результате фрикционного взаимодействия рассматриваемого композиционного материала и стального контртела 1,5 % весового содержания фтора подтверждает процесс формирования «островков» вторичных структур;

– продукты износа ПТФЭ на контртеле представляют граничную смазку, и их дальнейшее трение с композитом происходит циклично: удаление и последующее образование вторичных структур.

4. В рамках промышленных испытаний накладок с композиционным слоем на предприятии ООО «РостИнТех» установлено повышение их износостойкости на 14–16 %.

2. Практические результаты работы включают проверку научных исследований по разработке нового композита с оптимальной концентрацией модификаторов с целью повышения эксплуатационных свойств трибосопряжения.

На основе разработанной нормативной и технической документации проведены промышленные испытания на технологическом оборудовании ООО «РостИнТех», получившие положительные рекомендации по повышению износостойкости и надежности работы рассматриваемого трибосопряжения с учетом модификации полимерной матрицы.

3. Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме диссертации.

Установленные закономерности кинетики и механизма формирования вторичных поверхностных структур являются основой для разработки рекомендаций к повышению эксплуатационных свойств широкого класса полимерных материалов. Разработанные в диссертации принципы определения концентрации армированных и антифрикционных наполнителей являются перспективной основой применения полученных композитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Multiscale Biomechanics and Tribology of Inorganic and Organic Systems. In memory of Professor Sergey Psakhie / G.-P. Ostermeyer, V. L. Popov, E. V. Shilko, O. S. Vasiljeva // Springer Tracts in Mechanical Engineering. – 2020. – 571 p. – ISBN 978-3-030-60123-2.
2. The Effect of the Stress State, Testing Temperature, and Hardener Composition on the Strength of an AlMg5/Epoxy Metal-Polymer Joint / S. Smirnov, D. Kononov, D. Vichuzhanin [et al.] // Materials. – 2022. – Vol. 15, No 20. – 14 p. – DOI 10.3390/ma15207326.
3. Костецкий, Б. И. О роли вторичных структур в формировании механизмов трения, смазочного действия и изнашивания / Б. И. Костецкий // Трение и износ. – 1980. – Т. 1, № 4. – С. 622–637. – ISSN 0202-4977.
4. Гороховский, Г. А. Поверхностное диспергирование динамически контактирующих полимеров и металлов / Г. А. Гороховский. – Киев : Наукова думка, 1972. – 152 с.
5. Белый, В. А. Проблема создания композиционных материалов и управления их фрикционными свойствами / В. А. Белый // Трение и износ. – 1982. – Т. 3, № 3. – С. 389–395. – ISSN 0202-4977.
6. Костецкий, Б. И. О явлении саморегулирования при износе металлов / Б. И. Костецкий, Л. И. Бершадский, Е. Н. Чукреев // Докл. АН СССР. – 1970. – Т. 191, № 6. – С. 1339–1342.
7. Ребиндер, П. А. Взаимодействие поверхностей – адгезия и деформация поверхностных слоев при трении / П. А. Ребиндер. – Минск : Наука и техника, 1969. – 208 с.
8. Бершадский Л. И. О самоорганизации и концепции износостойкости трибосистем / Л. И. Бершадский // Трение и износ. – 1992. – № 6. – С. 1078–1094.
9. К вопросу выяснения природы структурных превращений фторопласта-4 в зоне фрикционного контакта / С. С. Пелищенко, О. В. Демченко, Л. И. Безрук [и др.] // Трение и износ. – 1983. – Т. 4, № 4. – С. 733–737. – ISSN 0202-4977.

10. Свириденко, А. И. Исследование молекулярных характеристик продуктов переноса полиэтилена на сталь в период приработки металлополимерного узла трения / А. И. Свириденко, В. В. Невзоров, Ю. Е. Кирпиченко // Трение и износ. – 1984. – Т. 5, № 3. – С. 417–423.

11. Bowers, R. G. Frictional Properties of Plastics / R. G. Bowers, W. C. Clinton, W. A. Zisman // Modern Plastics. – 1954. – Vol. 321, No. 6. – P. 131–144.

12. Холодилов, О. В. Влияние скорости скольжения на особенности термопластов / О. В. Холодилов // Трение и износ. – 1984. – Т. 5, № 3. – С. 431–437. – ISSN 0202-4977.

13. Влияние температуры трения на строение поверхностного слоя и износостойкость АСП на основе поливинилхиноксалина / В. В. Коршак, И. А. Грибора, А. П. Краснов [и др.] // Трение и износ. – 1986. – Т. 7, № 1. – С. 16–20. – ISSN 0202-4977.

14. Бакли, Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Д. Бакли. – Москва : Мир, 1986. – 294 с.

15. Ланкастер, У. К. Образование третьего тела и износ сухих подшипников на основе ПТФЭ-волокон / У. К. Ланкастер // Проблемы трения и смазки. – 1980. – № 2. – С. 114–124.

16. Белый, В. А. О роли и механизме влияния полимерных наполнителей на несущую способность смазочного слоя / В. А. Белый, Н. Н. Михневич, В. А. Смуругов // Трение и износ. – 1986. – Т. 7, № 3. – С. 408–413. – ISSN 0202-4977.

17. Масс-спектрометрические исследования фрикционного переноса при трении металл – полимер / В. С. Дубровский, А. И. Свириденко, В. А. Смуругов [и др.] // Известия Академии наук БССР. Серия физико-технических наук. – 1975. – № 2. – С. 126–127.

18. Jain, V. K. Surface Topography Changes in Polymer-Metal Sliding / V. K. Jain, S. Bahadur // Proceedings of the International Conference on Wear of Materials. – New York, 1999. – P. 581–588.

19. Jain, V. K. Material Transfer in Polymer-Polymer Sliding / V. K. Jain, S. Bahadur // Wear. – 1998. – Vol. 46, No. 1. – P. 177–188.

20. Belyi, V. A. A.o. methods of Decreasing Wear in Metal-Polymer Contacts / V. A. Belyi, I. V. Kragelski, V. G. Savkin // Proceedings of the International Conference on Wear of Materials. – New York, 2004. – P. 532–537.

21. Машков, Ю. К. Структурно-энергетическая самоорганизация в процессах синтеза и трения композитов на основе политетрафторэтилена / Ю. К. Машков, О. Л. Манаев, В. И. Суриков // Трение и износ. – 2002. – Т. 23, № 6. – С. 661–665. – ISSN 0202-4977.

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

23. Химические превращения при трении наполненного полимера фенолформальдегидного типа / В. В. Коршак, И. А. Грибова, А. П. Краснов [и др.] // Трение и износ. – 1985. – Т. 5, № 5. – С. 784–789. – ISSN 0202-4977.

24. Айнбиндер, С. Б. Антифрикционные свойства композиций на основе полимерных материалов, наполненных относительно твердыми наполнителями / С. Б. Айнбиндер // Трение и износ. – 1982. – Т. 3, № 4. – С. 610–620. – ISSN 0202-4977.

25. Холодилов, О. В. Роль эксплуатационного режима в механизме изнашивания и фрикционного переноса полимеров / О. В. Холодилов // Трение и износ. – 1984. – Т. 5, № 4. – С. 637–643. – ISSN 0202-4977.

26. Белый, В. А. Деформация и адгезия при трении полимеров / В. А. Белый, А. И. Свириденко // Теория трения, износа и проблемы стандартизации : материалы Всесоюзной научной конференции. – Брянск : Приокское книжное издательство. Брянское отделение, 1978. – С. 28–44.

27. Белый, В. А. О регулировании фрикционных свойств композиционных материалов / В. А. Белый, А. И. Свириденко, В. С. Дубровский // Доклады Академии наук СССР. – 1974. – Т. 2, № 3 – С. 97–111.

28. Горячева, И. Г. Механика фрикционного взаимодействия / И. Г. Горячева. – Москва : Наука, 2001. – 478 с. – ISBN 5-02-002567-4.

29. Многоцелевой подход в задачах компьютерного конструирования композиционных полимерных материалов / С. В. Панин [и др.] // Механика и

наномеханика структурно-сложных и гетерогенных сред: успехи, проблемы, перспективы : труды Всероссийской конференции, г. Москва, 30 ноября – 2 декабря 2009 г. – Москва : АльянсТрансАтом, 2010. – С. 133–140.

30. Колесников, В. И. Теплофизические процессы в металлополимерных трибосистемах / В. И. Колесников ; РГУПС. – Москва : Наука, 2003. – 279 с. – ISBN 5-02-002843-6 : 1000.

31. Кохановский, В. А. Антифрикционные полимерные композиты для тяжело нагруженных пар трения : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.02.04 / Кохановский Вадим Алексеевич. – Ростов-на-Дону : ДГТУ, 1995. – 388 с.

32. Elges, Ina Gelenklager, Gelenkkopfe. Makatalog K227D / I. Elges, Ju. Ausgabe. – 1980. – 103 p.

33. 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 / редактор Г. Г. Матишов. – Ростов-на-Дону : ЮНЦ РАН, 2007. – Т. 2 : Физика. Механика. Техника. – С. 9–20.

34. Аскадский, А. А. Введение в физико-химию полимеров / А. А. Аскадский, А. Р. Хохлов. – Москва : Научный мир, 2009. – 384 с. – ISBN 978-5-91522-064-4 (в пер.).

35. Бартенев, Г. М. Физика и механика полимеров : учебное пособие для вузов / Г. М. Бартенев, Ю. В. Зеленев. – Москва : Высшая школа, 1983. – 393 с.

36. Ферри, Дж. Вязкоупругие свойства полимеров / Дж. Ферри ; под редакцией В. Е. Гуля. – Москва : Издательство иностранной литературы, 1963. – 535 с.

37. Кислова, Ю. Российский рынок эпоксидных смол / Ю. Кислова // Композитный мир. – 2009. – № 12. – С. 20–21. – ISSN 2222-5439.

38. Разработка базальтонаполненных эпоксидных композитов с повышенным комплексом свойств / Ю. А. Кадыкова, С. В. Улегин, К. Д. Лурье,

С. Е. Артеменко // Дизайн. Материалы. Технология. – 2012. – № 5 (25). – С. 124–128. – ISSN 1990-8997.

39. Лапицкая, Т. В. Эпоксидные материалы / Т. В. Лапицкая, В. А. Лапицкий // Композитный мир. – 2006. – № 7. – С. 16–17. – ISSN 2222-5439.

40. Полимерные нанокомпозиты / под редакцией Ю-Винг Май, Жонг-Жен Ю ; перевод с английского А. Е. Грахова. – Москва : Техносфера, 2011. – 687 с. – ISBN 978-5-94836-203-8 (в пер.).

41. Васильева, А. А. Повышение прочностных характеристик однонаправленных базальтопластиков модификацией эпоксидного связующего силикатными наночастицами : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.17.06 / Васильева Алина Анатольевна. – Барнаул, 2013. – 137 с.

42. Mohanty, A. Effect of Alumina Nanoparticles on the Enhancement of Impact and Flexural Properties of the Short Glass/Carbon Fiber Reinforced Epoxy Based Composites / Akash Mohanty, V.K. Srivastava // Fibers and Polymers. – 2015. – Vol. 16, No.1. – P. 188–195.

43. Татаринцева, О. С. Влияние модификации на технологические и механические свойства эпоксиангидридного связующего / О. С. Татаринцева, Д. Е. Зимин, В. В. Самойленко // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2015. – Т. 21, № 4. – С. 489–500.

44. Влагодперенос в базальтопластиках на основе модифицированного силикатными наночастицами эпоксиангидридного связующего / Д. Е. Зимин, Н. Н. Ходакова, Т. К. Углова [и др.] // Ползуновский вестник. – 2015. – № 3. – С. 8–11. – ISSN 2072-8921.

45. Физико-механические свойства дисперсно-наполненных эпоксидов / Р. А. Корохин, В. И. Солодилов, Ю. А. Горбаткина, А. В. Отегов // Пластические массы. – 2013. – № 4. – С. 37–41. – ISSN 0554-2901.

46. Эпоксидные и полиуретановые строительные композиты / А. Н. Бобрышев, Д. Е. Жарин, Е. В. Кондратьева [и др.]. – Саратов : Саратовский государственный технический университет, 2005. – 159 с. – ISBN 5-7433-1566-3.

47. Кондратьев, В. В. Новый отвердитель эпоксидных смол / В. В. Кондратьев, О. В. Бобырь // Пластические массы. – 2007. – № 5. – С. 42–43. – ISSN 0554-2901.

48. Новый отвердитель эпоксидных смол / А. Н. Бобрышев [и др.] // Пластические массы. – 1998. – № 2. – С. 30–32. – ISSN 0554-2901.

49. Асланов, Т. А. Отверждение эпоксидных смол дигидразином / Т. А. Асланов // Пластические массы. – 1989. – № 5. – С. 48–49. – ISSN 0554-2901.

50. Изучение процесса отверждения связующего на основе бифункционального эпоксидного олигомера в смеси с тетра- и полиглицидиловыми модификаторами различными методами / А. С. Волков [и др.] // Пластические массы. – 2008. – № 10. – С. 7–10. – ISSN 0554-2901.

51. Зиновьева, Е. Г. Комплексы кислот Льюиса с трис(галоген)-алкилфосфатами – новые отвердители эпоксидных смол / Е. Г. Зиновьева, В. А. Ефимов, Н. И. Кольцов // Пластические массы. – 2008. – № 2. – С. 35–36. – ISSN 0554-2901.

52. Makhovskaya, Y. Y. Modeling of soft phase transfer to the surface of multicomponent aluminum alloy in friction / Y. Y. Makhovskaya, I. G. Goryacheva // Physical Mesomechanics. – 2016. – Vol. 19, No. 3. – P. 239–247. – DOI 10.1134/s1029959916030024.

53. Bushe, N. A. Effect of aluminum-alloy composition on self-lubrication of frictional surfaces / N. A. Bushe, I. G. Goryacheva, Y. Y. Makhovskaya // Wear. – 2003. – Vol. 254, No. 12. – P. 1276–1280. – DOI 10.1016/s0043-1648(03)00110-8.

54. Godet, M. The third-body approach: a mechanical view of wear / M. Godet // Wear. – 1984. – Vol. 100. – P. 437–452. – DOI 10.1016/0043-1648(84)90025-5.

55. Shimizu, Y. The influence of Aluminum-Silicon Alloy on ZDDP Tribofilm Formation on the Counter-surface / Y. Shimizu and H. A. Spikes // Tribology letters. – 2017. – Vol. 65, No. 4. – Article no. 137. – DOI 10.1007/s11249-017-0915-8.

56. Коростелева, Е. Н. Влияние добавок FeAl₃ и графита на триботехнические свойства спеченной алюминиевой бронзы : научное издание /

Е. Н. Коростелева, А. П. Савицкий, Н. М. Русин // Перспективные материалы. – 1999. – № 4. – С. 58–62. – ISSN 1028-978X.

57. Исследование механизмов взаимодействия шунгита с поверхностями трения в процессе высокоэнергетического размола / С. Ф. Ломаева [и др.] // Трение и износ. – 2018. – Т. 39, № 4. – С. 400–408. – ISSN 0202-4977.

58. Исследование трибологических свойств говяжьего жира, модифицированного графеном и терморасширенным графитом / Э. И. Джонс, Ю. Падгуркас, А. Жунда [и др.] // Трение и износ. – 2018. – Т. 39, № 4. – С. 428–432. – ISSN 0202-4977.

59. Анализ конструктивных решений при проектировании высоконагруженных подшипников скольжения с жидким смазочным материалом / А. С. Пискарев, О. Б. Сильченко, В. В. Курицына, М. В. Силуянова // Вестник машиностроения. – 2018. – № 5. – С. 37–43. – ISSN 0042-4633.

60. Скоренцев, А. Л. Разработка и исследование структуры механических и трибологических свойств спеченных и подвергнутых равноканальному угловому прессованию композитов Al-Sn : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.16.09 / Скоренцев Александр Леонидович. – Томск, 2016. – 156 с.

61. Radhika, N. Experimental investigation on abrasive wear behavior of functionally graded aluminum composite / N. Radhika, R. Raghu // Journal of Tribology. – Vol. 137, Iss. 3. – Article no. 031606. – DOI 10.1115/1.4029941.

62. Pramanik, A. Effects of reinforcement on wear resistance of aluminum matrix composites / A. Pramanik // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. – 2016. – Vol. 26, Iss. 2. – P. 348–358. – DOI 10.1016/s1003-6326(16)64125-0.

63. Self-Organization during Friction of Slide Bearing Antifriction Materials / I.S. Gershman, G. Fox-Rabinovich, A. Mironov, S. Veldhuis // Entropy. – 2015. – Vol. 17, No. 12. – P. 7967–7978. – DOI 10.3390/e17127855.

64. Nakayama, K. Tribochemical reactions at and in the vicinity of a sliding contact / K. Nakayama, J.-M. Martin // Wear. – 2006. – Vol. 261 (3-4). – P. 235–240. – DOI 10.1016/j.wear.2005.10.012.

65. Трение и модифицирование материалов трибосистем / Ю. К. Машков, К. Н. Полещенко, С. Н. Поворознюк, П. В. Орлов. – Москва : Наука, 2000. – 280 с. – ISBN 5-02-002491-0.
66. Крагельский, И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : Машиностроение, 1968. – 480 с.
67. Гаркунов, Д. Н. Избирательный перенос в узлах трения / Д. Н. Гаркунов, И. В. Крагельский, А. А. Поляков. – Москва : Транспорт 1969. – 104 с.
68. Гаркунов, Д. Н. Структурная приспособляемость и избирательный перенос II / Д. Н. Гаркунов, А. А. Поляков // Долговечность трущихся деталей машин : сборник статей. – 1990. – Вып. 5. – С. 21–30.
69. Кужаров, А. А. Триботехнические свойства нанометричных кластеров меди : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.02.04 / Кужаров Андрей Александрович. – Ростов-на-Дону, 2004. – 174 с.
70. Кужаров, А. С. Концепция безызносности в современной трибологии / А. С. Кужаров // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. – 2014. – №. 2. – С. 23–31. – ISSN 0321-2653.
71. Поляков, С. А. О взаимосвязи явлений самоорганизации и безопасности при трении / С. А. Поляков // Трение и износ. – 2006. – Т. 27, № 5. – С. 558–566. – ISSN 0202-4977.
72. Гленсдорф, П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций / П. Гленсдорф, И. Пригожин. – Москва : Мир, 1973. – 280 с.
73. Bershadsky, L. I. On self-organizing and concept of tribosystem self-organizing / L. I. Bershadsky // Journal of Friction and Wear. – 1992. – Vol. 13 – P. 101–114.
74. Бершадский, Л. И. Структурная термодинамика трибосистем / Л. И. Бершадский. – Киев : Общество «Знание» УССР, 1990. – 29 с.
75. Хрущов, М. М. Исследование изнашивания металлов / М. М. Хрущов, М. А. Бабичев. – Москва : Издательство Академии наук СССР, 1960. – 351 с.
76. Боуден, Ф. П. Трение и смазка твердых тел / Ф. П. Боуден, Д. Тейбор. – Москва : Машиностроение, 1968. – 543 с.

77. Гершман, И. С. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах / И. С. Гершман, Н. А. Буше // Трение и износ. – 1995. – Т. 16, № 1. – С. 61–70. – ISSN 0202-4977.

78. Гершман, И. С. Синергетика процессов трения / И. С. Гершман // Трение, износ, смазка. – 2006. – Т. 8, № 4 (29). – С. 71–80.

79. Mironov, A. E. Secondary Structures as Self-Organization Processes and Finishing Treatment of Friction Surfaces of Slide Bearings and Shafts / A. E. Mironov, P. A. Podrabinnik, E. V. Kuznetsova // Materials Today : Proceedings. – 2019. – Vol. 11. – P. 197–202.

80. Klamecki, B. E. A thermodynamic model of friction / B. E. Klamecki // Wear. – 1980. – Vol. 63. – P. 113–120.

81. Klamecki, B.E. Energy dissipation in sliding / B. E. Klamecki // Wear. – 1982. – Vol. 77, No. 3. – P. 115–128.

82. Klamecki, B. E. Wear – entropy production model / B. E. Klamecki // Wear. – 1980. – Vol. 58, No. 2. – P. 325–330.

83. Nosonovsky, M. Thermodynamics of surface degradation, self-organization and selfhealing for biomimetic surfaces / M. Nosonovsky; B. Bhushan // Phil. Trans. R. Soc. A. – 2009. – Vol. 367 – P. 1607–1627.

84. Nosonovsky, M. Physical chemistry of self-organization and self-healing in metals. / M. Nosonovsky [et al.] // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2009. – Vol. 11. – P. 9530–9536.

85. Nosonovsky, M. Surface Self-Organization: from Wear to Self-Healing in Biological and Technical Surfaces / M. Nosonovsky // Appl. Surf. Sci. – 2010. – Vol. 256. – P. 3982–3987.

86. Nakayama, K. Tribochemical reactions at and in the vicinity of a sliding contact / K. Nakayama, J.M. Martin // Wear. – 2006. – Vol. 261. – P. 235–240.

87. Friction reduction by metal sulfides in boundary lubrication, studied by XPS and XANES analyses / M. I. de Barros, J. Bouchet, I. Raoult [et al.] // Wear. – 2003. – Vol. 254. – P. 863–870.

88. Машков, Ю. К. Трибофизика металлов и полимеров : монография / Ю. К. Машков. – Омск : ОмГТУ, 2013. – 240 с. – ISBN 978-5-8149-1458-3.

89. Сравнение эффективности модифицирования СВМПЭ нановолокнами (C, Al₂O₃) и наночастицами (Cu, SiO₂) при получении антифрикционных композитов / С. В. Панин, Л. А. Корниенко, С. Ваннастри [и др.] // Трение и износ. – 2010. – Т. 31, № 6. – С. 603–611. – ISSN 0202-4977.

90. Тимошенко, В. В. Дисперсные наполнители для термопластов / В. В. Тимошенко, В. М. Шаповалов, М. Г. Таврогинская // Материалы. Технологии. Инструменты : Международный научно-технический журнал. – 2007. – Т. 12, № 3. – С. 16–26.

91. Перспективы применения композиционных материалов в подвижных сопряжениях рельсовых экипажей / А. И. Буря [и др.] // Вісник СНУ ім В. Даля. Науковий журнал. – 2006. – № 8. – С. 102.

92. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. Структурная модификация / Ю. К. Машков, З. Н. Овчар, В. И. Суриков, Л. Ф. Калистратова. – Москва : Машиностроение, 2005. – 240 с. – ISBN 5-217-03288-X.

93. Композиционные материалы на основе совмещенных матриц для защитных покрытий : монография / Л. В. Ахмадиева [и др.] ; под научной редакцией В. А. Струка. – Гродно : ГГАУ, 2009. – 532 с.

94. Gershman, I. S. Elements of Thermodynamics and Self-Organization during Friction / I. S. Gershman, N. A. Bushe // Self-Organization During Friction. Advanced Surface Engineered Materials and Systems Designed. Taylor & Francis Group. – Boca Raton – London – New York, 2006. – Ch. 2. – P. 13–58.

95. Gershman, I. S. Formation of Secondary Structures and the Self-Organization Process of Tribosystems during Friction with the Collection of Electric Current / I. S. Gershman // Self-Organization During Friction. Advanced Surface Engineered Materials and Systems Designed. Taylor & Francis Group. – Boca Raton. – London – New York, 2006. – Ch. 8. – P. 197–230.

96. Fox-Rabinovich, G. S. Thin-Film PVD Coating Metamaterials Exhibiting Similarities to Natural Processes under Extreme Tribological Conditions / G. S. Fox-

Rabinovich, I. S. Gershman, S. Veldhuis // *Nanomaterials*. – 2020. – Vol. 10. – Article no. 1720. – DOI 10.3390/nano10091720.

97. Relationship of Secondary Structures and Wear Resistance of Antifriction Aluminium Alloys for Journal Bearings from the Point of View of Self-Organization During Friction / I. Gershman, A. Mironov, P. Podrabinnik [et al.] // *Entropy*. – 2019. – Vol. 21. – Article no. 1048.

98. Серафимович, В. В. Влияние плазмохимической обработки наполнителей в среде фторсодержащих газов на их поверхностные свойства / В. В. Серафимович, В. А. Шелестова, П. Н. Гракович // *Полимерные композиты, покрытия, пленки : тезисы Международной научной конференции*. – Гомель, 2003. – С. 107–108.

99. Влияние нагрузки на коэффициент трения полиэтилена высокой плотности, облученного на воздухе / В. В. Смирнов, Ю. М. Плескачевский, В. Н. Адери́ха [и др.] // *О природе трения твердых тел : тезисы докладов Международного симпозиума*. – Гомель, 2003. – С. 93–94.

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

101. Кужаров, А. С. Композиционные антифрикционные покрытия на основе волокон политетрафторэтилена / А. С. Кужаров, В. Г. Рядченко // *Безызносность : межвузовский сборник научных трудов*. – Ростов-на-Дону : РИСХМ, 1992. – Вып. 2. – С. 149–147.

102. Рядченко, В. Г. Структура и свойства износостойких покрытий тяжело-нагруженных подшипников на основе волокон политетрафторэтилена и комплексных соединений меди : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / В. Г. Рядченко. – Новочеркасск, 1988. – 167 с.

103. Pat. 3.250.556 USA. Ball joint and sleeve means / H. J. Couch, R. E. Geller (USA). – 164, 098 ; filed.03.06.62 ; publ. 10.05.66 ; HKU. – 237-90. – 8 p.

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

105. Бартенев, Г. М. Трение и износ полимеров / Г. М. Бартенев, В. В. Лаврентьев. – Ленинград : Химия, 1972. – 237 с.

106. Кохановский, В. А. Физико-механические параметры покрытий из антифрикционных самосмазывающихся волокнитов / В. А. Кохановский // Прогрессивные полимерные материалы, технология их переработки и применение : тезисы докладов научно-технической конференции, 13–15 сентября 1988 г. – Таганрог : ДНТП, 1988. – С. 32–33.

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

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

109. Basaran, C. 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. – DOI 10.1106/HLB3-MJC8-JVYL-9A9P.

110. Свойства и применение фторуглеродных пластиков (Обзор зарубежных данных) / составитель З. С. Цаллагова ; редакторы А. И. Ельяшевич, Д. Д. Чегодаев. – Ленинград : Химия, 1967. – 94 с.

111. Ищенко, А. А. Технологические основы восстановления промышленного оборудования современными полимерными материалами / А. А. Ищенко. – Москва : Инфра-Инженерия, 2022. – 208 с. – ISBN 978-5-9729-0776-2.

112. Александров, В. М. Введение в механику контактных взаимодействий / В. М. Александров, М. И. Чебаков. – 2-е изд., испр. и доп. – Ростов-на-Дону : ООО «ЦВВР», 2007. – 114 с. – ISBN 5-94153-089-7.

113. Александров, В. М. Взаимодействие покрытий тел с учетом деформируемости, износа и тепловыделения от трения / В. М. Александров, Г. К. Аннакулова // Трение и износ. – 1992. – Т. 13, № 1. – С. 154–160. – ISSN 0202-4977.

114. Александров, В. М. Контактные задачи в машиностроении / В. М. Александров, Б. Л. Ромалис. – Москва : Машиностроение, 1986. – 176 с.

115. Богатин, О. Б. Особенности динамического контакта при больших значениях износа / О. Б. Богатин, И. Н. Черский, Л. Г. Сокольникова // Трение и износ. – 1987. – Т. 8, № 5. – С. 837–844. – ISSN 0202-4977.

116. Арутюнян, Н. Х. Контактные задачи механики растущих тел / Н. Х. Арутюнян, А. В. Манжирова, В. Э. Наумов. – Москва : Наука, 1991. – 176 с. – ISBN 5-02-006752-0 : 2 р. 40 к.

117. Горячева, И. Г. Контактные задачи в трибологии / И. Г. Горячева, М. Н. Добычин. – Москва : Машиностроение, 1988. – 254 с.

118. Торская, Е. В. Анализ влияния трения на сопряженное состояние тел с покрытиями / Е. В. Торская // Трение и износ. – 2002. – Т. 23, № 2. – С. 130–138. – ISSN 0202-4977.

119. Воронин, Н. А. Закономерности контактного взаимодействия твердых топокомполитов с жестким сферическим штампом / Н. А. Воронин // Трение, износ и смазка. – 2006. – Т. 8, № 4 (29) – С. 1–10.

120. Колесников, В. И. Двухслойные композиции триботехнического назначения для тяжело нагруженных узлов трения : монография / В. И. Колесников, П. Г. Иваночкин. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2009. – 124 с. – ISBN 978-5-88814-242-4.

121. Коровчинский, М. В. Плоская контактная задача термоупругости при стационарном тепловыделении на поверхностях соприкасания / М. В. Коровчинский // Контактная прочность машиностроительных материалов. Москва : Наука, 1964. – С. 5–24.

122. Коровчинский, М. В. Локальный термический контакт при квазистационарном тепловыделении в процессе трения / М. В. Коровчинский // Теория трения и износа. – Москва : Наука, 1965. – С. 73–81.

123. Коровчинский, М. В. Основы теории термического контакта при локальном трении Ч. 1 / М. В. Коровчинский // Новое в теории трения. – Москва : Наука, 1966. – С. 98–145.

124. Коровчинский, М. В. Основы теории термического контакта при локальном трении Ч. 2 / М. В. Коровчинский // Вопросы трения и проблемы смазки. – Москва : Наука, 1968. – С. 5–72.

125. Азоян, А. И. Постановка плоской контактной задачи для двухслойной полосы при учете тепловыделения в зоне контакта / А. И. Азоян // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов. Т. 4 : Технические и естественные науки / Рост. гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2016. – С. 196–199.

126. Горячева, И. Г. Моделирование накопления контактно-усталостных повреждений в поверхностных слоях деформируемых тел в условиях фрикционного взаимодействия / И. Г. Горячева // Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии : тезисы докладов научно-технической конференции, 06–10 сентября 2021 г. – Томск : НИТГУ, 2021. – С. 526–527.

127. Андрианов, И. В. Асимптотическая математика и синергетика: путь к целостной простоте / И. В. Андрианов, Р. Г. Баранцев, Л. И. Маневич. – Москва : Едиториал УРСС, 2004. – 304 с.

128. Александров, В. М. Методы решения контактных задач термоупругости с учетом износа взаимодействующих поверхностей / В. М. Александров, У. В. Коваленко // Прикладная механика и техническая физика. – 1985. – № 3. – С. 129–131. – ISSN 0869-5032.

129. Азоян, А. И. Асимптотическое решение плоской контактной задачи для двухслойной упругой полосы при учете тепловыделения в зоне контакта / А. И. Азоян // Транспорт: наука, образование, производство : сборник научных трудов. Т. 4 : Технические и естественные науки / Рост. гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону, 2018. – С. 54–58.

130. Азоян, А. И. Аналитическое представление вырожденного решения плоской контактной задачи для двухслойной полосы при учете тепловыделения в зоне контакта / А. И. Азоян // Современное развитие науки и техники : сборник научных трудов. – Ростов-на-Дону : Наука, 2017. – С. 189–191.

131. Азоян, А. И. Плоская контактная задача для тонкой двухслойной упругой полосы при неполном сцеплении слоев с учетом тепловыделения в зоне контакта / А. И. Азоян, П. Г. Иваночкин // Современные проблемы механики сплошной среды : труды XVIII Международной конференции (Ростов-на-Дону, 7–10 ноября 2016 г.) : в 2 т. – Ростов-на-Дону : Издательство Южного федерального университета, 2016. – С. 19–24.

132. Евтушенко, А. А. Плоская контактная задача термоупругости при квазистационарном теплообразовании от трения / А. А. Евтушенко. О. М. Уханская // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 1993. – № 5. – С. 37–45. – ISSN 1026-3519.

133. Ворович, И. И. Задача термоупругости о движущемся штампе при учете тепловыделения от трения / И. И. Ворович, Д. А. Пожарский, М. И. Чебаков // Прикладная математика и механика. – 1994. – Т. 58. – Вып. 3. – С. 161–166. – ISSN 0032-8235.

134. Краснюк, П. П. Контактное взаимодействие жесткого теплопроводного штампа с упругим слоем при нестационарном фрикционном теплообразовании / П.П. Краснюк // Прикладная механика. – 2005. – Т. 41, № 12. – С. 35–46. – ISSN 0032-8243.

135. Басов, К. А. ANSYS справочник пользователя / К. А. Басов. – Москва : ДМК Пресс, 2005. – 640 с. – ISBN 5-94074-108-8.

136. Жидков, А. В. Применение системы ANSYS решению задач геометрического и конечно-элементного моделирования / А. В. Жидков. – Нижний Новгород : ННГУ, 2006. – 115 с.

137. Наседкин, А. В. Модели и численные методы решения связанных физико-механических задач / А. В. Наседкин. – Ростов-на-Дону, 2010. – 259 с.

138. Азоян, А. И. Моделирование контактного взаимодействия жесткого штампа с двухслойным покрытием при учете тепловыделения в зоне контакта / А. И. Азоян, П. Г. Иваночкин // Трибология – машиностроению : труды XI Международной научно-технической конференции. – Москва : Институт компьютерных исследований, 2016. – С. 6–8.

139. Азоян, А. И. Моделирование взаимодействия жесткого штампа с упругим шероховатым двойным слоем при тепловыделении в зоне контакта / А. И. Азоян, П. Г. Иваночкин // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. Научно-технический журнал. – 2017. – № 3 (36). – С. 5–8. – ISSN 1818-5509.

140. Berry, G. A. Division of Frictional Heat: Guide to the Nature of Sliding Contact / G. A. Berry, J. R. Barber // Journal of Tribology. – 1984. – Vol. 106. – P. 405–415.

141. Bowden, F. P. The Surface Temperature of Sliding Solids / F. P. Bowden, P. H. Thomas // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. – 1954. – Vol. 223. – P. 29–40.

142. Бленд, Д. Теория линейной вязкоупругости / Д. Бленд ; перевод с английского под редакцией Э. И. Григолюка. – Москва : МИР, 1965. – 204 с.

143. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология / М. Л. Кербер, В. М. Виноградов, Г. С. Головкин [и др.]; под редакцией А. А. Берлина. – Санкт-Петербург : Профессия, 2008. – 560 с.

144. Effect of curing agent molecular structures on the tribological and corrosion behaviors of epoxy resin coatings / D. Liu, W. Zhao, F. Wu [et al.] // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. – 2015. – Vol. 472. – P. 85–91. – DOI 10.1016/j.colsurfa.2015.02.036.

145. Модифицированные полимерные композиционные материалы на основе эпоксиэфирных смол и определение их упругопрочностных и трибологических свойств / П. Г. Иваночкин, О. А. Бемяк, Д. С. Мантуров [и др.] // Механика и трибология транспортных систем : сборник статей Международной научной конференции, Ростов-на-Дону, 09–10 ноября 2021 года. – Ростов-на-Дону: РГУПС, 2021. – С. 266–270. – DOI 10.46973/978-5-907295-52-0_2021_266.

146. Липатов, Ю. С. Физико-химические основы наполнения полимеров / Ю. С. Липатов. – Москва : Химия, 1991. – 260 с. – ISBN 5-7245-0453-7.

147. Preparation and Properties of Polymers Derived from Epoxy Resins and Oligochelatotitanophenylsiloxanes / A. L. Suvorov, L. D. Dul'tseva, G. I.

Ovchinnikova [et al.] // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2003. – Vol. 76, No. 3. – P. 1844–1849. – DOI 10.1023/B:RJAC.0000018697.76047.67.

148. Hoebbel, D. On the influence of metal alkoxides on the epoxide ring-opening and condensation reactions of 3glycidoxypropyltrimethoxysilane / D. Hoebbel, M. Nacken, H. Schidt // Journal of Sol-Gel Science and Technology. – 2001. – Vol. 21, No. 3. – P. 178–187. – DOI 10.1023/A:1011274301896.

149. Обоснование методики определения твердости полимерных дисперсных композиционных материалов / А. М. Михальченков, А. А. Тюрева, Ю. И. Филин, Е. И. Панова // Вестник Брянской государственной сельскохозяйственной академии. – 2020. – № 1. – С. 55–58. – ISSN 2500-2651.

150. Studying the viscoelastic properties of an epoxy resin strengthened with silicon dioxide nanoparticles by instrumented microindentation / S. V. Smirnov, I. A. Veretennikova, V. M. Fomin [et al.] // Mechanics of Composite Materials. – 2019. – Vol. 55, No. 3. – P. 337–347 – DOI 10.1007/s11029-019-09816-x.

151. ГОСТ Р 8.748-2011 (ИСО 14577-1:2002). Металлы и сплавы. измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний : национальный стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 декабря 2011 г. № 1071-ст. – Москва : Стандартинформ, 2013. – 24 с.

152. Nanoindentation in polymer nanocomposites / Ana M. Diez-Pascual, Marián A. Gómez-Fatou, Fernando Ania, Araceli Flores // Progress in Materials Science. – 2015. – No. 67. P. 1-94. – DOI 10.1016/j.pmatsci.2014.06.002.

153. The use of nano- and micro-instrumented indentation tests to evaluate viscoelastic behavior of poly (vinylidene fluoride) (PVDF) / G. L. Oliveira, C. A. Costa, S. C. S. Teixeira, M. F. Costa // Polymer Testing. – 2014. – No. 34. – P. 10–16. – DOI 10.1016/j.polymertesting.2013.12.006.

154. Characterization of the elastic and viscoelastic properties of dentin by a nanoindentation creep test / S.-F. Chuang, S.-Y. Lin, P.-J. Wei [et al.] // Journal of

Biomechanics. – 2015. – Vol. 48, Iss. 10. – P. 2155–2161. – DOI 10.1016/j.jbiomech.2015.01.034.

155. Исследование вязкоупругих свойств композиционных материалов на основе метода индентирования / В. И. Колесников, О. А. Беляк, Т. В. Суворова [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 4. – С. 25–33. – DOI 10.46973/0201–727X_2023_4_25.

156. Chyasnayichyus, M. Probing of polymer surfaces in the viscoelastic regime / M. Chyasnayichyus, S. L. Young, V. V. Tsukruk // Langmuir. – 2014. – Vol. 30, No. 35. – P. 10566–10582. – DOI 10.1021/la404925h.

157. Parvini, C. H. Extracting viscoelastic material parameters using an atomic force microscope and static force spectroscopy / C. H. Parvini, M. A. S. R. Saadi, S. D. Solares // Beilstein Journal of Nanotechnology. – 2020. – Vol. 11. – P. 922–937. – DOI 10.3762/bjnano.11.77.

158. Головин, Ю. И. Наноиндентирование и его возможности / Ю. И. Головин. – Москва : Машиностроение, 2009. – 312 с. – ISBN 978-5-94275-476-1 (в пер.).

159. Исследование методом микроиндентирования образцов эпоксидной смолы, упрочненной наночастицами диоксида кремния / С. В. Смирнов, Е. О. Смирнова, И. А. Веретенникова [и др.] // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. – 2017. – Iss. 1. – P. 24–35. – DOI 10.17804/2410-9908.2017.1.024-035.

160. An overview of microscale indentation fatigue: Composites, thin films, coatings, and ceramics / Md. M. Islam, S. I. Shakil, N. M. Shaheen [et al.] // Micron. – 2021. – Vol. 148, No. 18 – 22 p. – DOI 10.1016/j.micron.2021.103110.

161. Stan, F. Analysis of viscoelastic behavior of polypropylene/carbon nanotube nanocomposites by instrumented indentation / F. Stan, A.M. Turcanu, C. Fetecau // Polymers. – 2020. – Vol. 12, No. 11. – 2535 p. – DOI 10.3390/polym12112535.

162. Studying the Mechanical Properties of Epoxy Adhesive Coatings by Instrumented Indentation / S. V. Smirnov, I. A. Veretennikova¹, E. O. Smirnova [et al.]

// Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures (MRDMS-2019). – 2019. – 22 p. – DOI 10.1063/1.5135120.

163. Belyak, O. A. Predicting the Mechanical Properties of Antifriction Composite Materials / O. A. Belyak, T. V. Suvorova // Mechanics of Composite Materials. – 2021. – Vol. 57, No. 5. – P. 647–656. – DOI: 10.1007/s11029-021-09986-7.

164. Наноструктурные покрытия / под редакцией А. Кавалейро, Д. Де Хоссона. – Москва : Техносфера, 2011. – 752 с. – ISBN 978-5-94836-182-6.

165. Структура и свойства нанокомпозитных, гибридных и полимерных покрытий / А. Д. Погребняк, А. А. Лозован, Г. В. Кирик [и др.]. – Москва : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. – 344 с.

166. Menczel, J. D. Thermal Analysis of Polymers: Fundamentals and Applications / J. D. Mencze, R. B. Prime // John Wiley & Sons, Incorporated. – 2014. – 2009. – 698 p. – DOI 10.1007/s10973-010-1071-7.

167. Исследование зависимости свойств модифицированных полиуретанов от температуры методом индентирования / Е. В. Торская, А. А. Яковенко, И. В. Шкалей [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2023. – Т. 26, № 3. – С. 29–38. – DOI 10.55652/1683-805X_2023_26_3_29.

168. Брусенцева, Т. А. Исследование влияния природы наполнителя на механические характеристики эпоксидной смолы DER-330 / Т. А. Брусенцева, Е. О. Смирнова, И. А. Веретенникова // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2018. – Iss. 6. – P. 27–36. – DOI 10.17804/2410-9908.2018.6.027-036.

169. Effect of different nanoparticles on thermal decomposition of poly (propylene sebacate)/nanocomposites: Evaluation of mechanisms using TGA, and TG-FTIR-GC/MS / K. Chrissafisa, E. Roumelia, K. M. Paraskevopoulou, N. Nianiasb, D. N. Bikiaris // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2012. – Iss. 96. – P. 92–99. – DOI 10.1016/j.jaap.2012.03.010.

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

171. Исследование комплексно-дифференцированного влияния основных режимов на трение и износ металлополимерных сопряжений / Ю. А. Евдокимов, В. И. Колесников, А. И. Тетерин, Г. И. Рассохин // В кн.: Применение новых материалов в сельскохозяйственном машиностроении. – Ростов-на-Дону, 1975. – С. 116–125.

172. Зуев, А. М. О природе температурного максимума коэффициента сухого трения в воздухе / А. М. Зуев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 1960. – Т. 5. – 53 с.

173. Чертавских, А. К. Трение и смазка при обработке металлов / А. К. Чертавских. – 2-е изд., доп. и перераб. – Москва : Metallurgizdat, 1955. – 176 с.

174. King, R. The effect of temperature on the mechanical properties and the friction of plastics / R. King, D. Tabor // Proceedings of the Physical Society Section B. – 1953. – Vol. 66, No. 405. – P. 728–736.

175. Митрович, В. П. Исследование трения полимеров по стали / В. П. Митрович. – Москва : Издательство Академии наук СССР, 1963. – 96 с.

176. Мейнстер, П. Г. Определение механических свойств полимерных материалов / П. Г. Мейнстер, А. Д. Курицина // Определение механических свойств полимерных материалов. – Москва : ЦИНТИАМ, 1962. – 28 с.

177. Крагельский, И. В. О влиянии природы твердых тел на внешнее трение и о соотношении между адгезионной и объемной составляющими / И. В. Крагельский, Н. М. Михин // В кн.: Теория трения и износа. – Москва : Наука, 1965. – С. 30–34.

178. Евдокимов, Ю. А. Трение и износ пластмасс по металлу при граничной смазке : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Евдокимов Юрий Андреевич ; Новочеркасский политехнический институт. – Новочеркасск, 1970. – 51 с.

179. Евдокимов, Ю. А. Применение методов моделирования при решении задач трения и износа в машинах / Ю. А. Евдокимов / Труды РИИЖТ. – 1972. – № 84. – С. 53–62.

180. Рыбалов, Л. С. Об износе резины при трении по металлической поверхности / Л. С. Рыбалов, И.В. Крагельский // *Механика полимеров*. – 1965. – № 6. – С. 120–126.

181. Чичинадзе, А. В. Расчет и исследование внешнего трения при торможении / А. В. Чичинадзе. – Москва : Наука, 1967. – 232 с.

182. Щедров, В. С. Влияние температурного поля на фрикционные характеристики и моделирование процесса трения / В. С. Щедров, А. В. Чичинадзе, Г. И. Трояновская // *Сухое и граничное трение. Фрикционные материалы : труды III Всесоюзной конференции по трению и износу*. – Москва : Издательство Академии наук СССР, 1960. – С. 245–262.

183. Евдокимов, Ю. А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю. А. Евдокимов, В. И. Колесников, А. И. Тетерин. – Москва : Наука, 1980. – 228 с.

184. Oliver, W. C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver, G. M. Pharr // *Journal materials research*. – 1992. – Vol. 7, No. 6. – P. 1564–1583. – DOI 10.1557/JMR.1992.1564.

185. Effect of the Nature of Oxide Nanofillers on Changes in the Mechanical Properties of Epoxy Coatings under Thermal Cycling / S. V. Smirnov, I. A. Veretennikova, A. V. Pestov [et al.] // *Mechanics of Advanced Composite Structures*. – 2023. – No. 10. – P. 195–204. – DOI 10.22075/macs.2022.26989.1399.

186. The effect of nanosilica on mechanical, thermal and morphological properties of epoxy coating / A. Allahverdi, M. Ehsani, H. Janpour, Sh. Ahmadi // *Progress in Organic Coatings*. – 2012. – No. 75. – P. 543–548. – DOI 10.1016/j.porgcoat.2012.05.013.

187. Belyak, O. A. Modelling stress deformed state upon contact with the bodies of two-phase microstructure / O. A. Belyak, T. V. Suvorova // *Solid State Phenomena*. – 2020. – Vol. 299. – P. 124–129. – DOI 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.124.

188. Oyen, M. L. Analytical techniques for indentation of viscoelastic materials / M. L. Oyen // *Philosophical Magazine*. – 2006. – Vol. 86, No. 21. – P. 33–35. – DOI 10.1080/14786430600740666.

189. Studying the Mechanical Properties of Epoxy Adhesive Coatings by Instrumented Indentation / S. V. Smirnov¹, I. A. Veretennikova, E. O. Smirnova, A. V. Pestov // *Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures*. – 2019. – P. 20008-1–20008-4. – DOI 10.1063/1.5135120.

190. Структурная релаксация в нанокompозитах полипропилен/углеродные нанотрубки / Г. Е. Заиков, Т. Р. Дебердеев, Н. В. Улитин [и др.] // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2012. – Т. 20, № 21. – С. 64–68.

191. Ivanochkin, P. G. The influence of antifriction fillers on the mechanical and thermal characteristics of metal polymer tribosystems / P. G. Ivanochkin, S. A. Danilchenko // *Advanced Materials: Manufacturing, Physics, Mechanics and Applications. Springer Proceedings in Physics*. – 2016. – Vol. 175. – P. 539–550. – DOI 10.1007/978-3-319-26324-3_38.

192. Исследование упругих свойств твердых полимерных материалов методом индентирования / С. Ш. Рехвиашвили, Д. С. Гаев, С. Ю. Хаширова, М. М. Ошхунов // *Письма в Журнал технической физики*. – 2022. – Т. 49, № 5. – С. 3–5. – DOI 10.21883/PJTF.2023.05.54660.19381.

193. Оценка влияния отвердителя на механические свойства эпоксидных покрытий на основе смолы ЭД-20 / С. В. Смирнов, И. А. Веретеникова, Д. А. Коновалов [и др.] // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2023. – No. 1. – С. 6–16. – DOI 10.17804/2410-9908.2023.1.006-016.

194. Исследования эпоксидной смолы, модифицированной наноразмерной шпинелью железа / П. Г. Иваночкин, С. А. Данильченко, Д. С. Мантуров [и др.] // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2022. – № 3. – С. 6–17. – DOI 10.46973/0201–727X_2022_3_6.

195. Казицина, Л. А. Применение УФ-, ИК- и ЯМР-спектроскопии в органической химии / Л. А. Казицина, Н. Б. Куплетская. – Москва : Высшая школа, 1971. – 264 с.

196. Raman and near infrared studies of an epoxy resin / K. E. Chike, M. L. Myrick, R. E. Lyon, S. M. Angel // *Applied Spectroscopy*. – 1993. – Vol. 47. – P. 1631–1635.

197. González, M.G. Applications of FTIR on epoxy resins – identification, monitoring the curing process, phase separation and water uptake / M. G. González, J. C. Cabanelas, J. Baselga // *Infrared Spectroscopy – Materials Science, Engineering and Technology*. – 2013. – Vol. 13. – P. 262–284. – DOI 10.5772/36323.

198. The weakly negative permittivity with low-frequency-dispersion behavior in percolative carbon nanotubes/epoxy nanocomposites at radio-frequency range / M. Liu, H. Wu, Y. Wu [et al.] // *Advanced Composites and Hybrid Materials*. – 2022. – DOI 10.1007/s42114-022-00541-z.

199. Hybridization effect of functionalized microcrystalline cellulose and liquid acrylonitrile butadiene rubber on epoxy / R. M. Neves, E. F. Kerche, A. J. Zattera, S. C. Amico // *Journal of Composite Materials*. – 2022. – Vol. 56 (18). – P. 2867–2877. – DOI 10.1177/00219983221107096.

200. Купцов, А. Х. Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров / А. Х. Купцов, Г. Н. Жижин. – Москва : Техносфера, 2013. – 696 с. – ISBN 978-5-94836-360-8.

201. ИК спектроскопическое исследование структуры эпоксидной композиции, модифицированной медь/углеродным наноккомпозитом, и процессов, связанных с ее модификацией / М. А. Чашкин, В. В. Тринеева, М. А. Вахрушина [и др.] // *Химическая физика и мезоскопия*. – 2012. – Т. 14, № 2. – С. 223–230. – ISSN 1727-0227.

202. Контроль отверждения эпоксидной смолы по содержанию свободного бисфенола А методом ТСХ / О. Б. Рудаков, Е. А. Хорохордина, С. С. Глазков [и др.] // *Аналитика и контроль*. – 2017. – Т. 21, № 2. – С. 135–143. – DOI 10.15826/analitika.2017.21.2.004.

203. Исследование структуры полимерного композиционного материала на основе смолы ЭД-20 и нанодисперсии сополимера стирола и акриловой кислоты / Д. М. Мордасов, П. В. Макеев, Д. Л. Полушкин, М. Д. Мордасов // *Вестник*

Тамбовского государственного технического университета. – 2019. – Т. 25 (1). – С. 136–141. – DOI 10.17277/vestnik.2019.01.pp.136-141.

204. Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения / Б. А. Люкшин, С. В. Шилько, С. В. Панин [и др.]. – Новосибирск : Сибирское отделение РАН, 2017. – 311 с. – ISBN 978-5-7692-1546-9.

205. Paluvai, N. R. Synthesis and modifications of epoxy resins and their composites: A review / N. R. Paluvai, S. Mohanty, S. K. Nayak // *Polymer-Plastics Technology and Engineering*. – 2014. – Vol. 53, No 16. – P. 1723–1758.

206. Исследование кинетики и механизма формирования вторичных структур модифицированной эпоксидной смолы / Д. С. Мантуров, П. Г. Иваночкин, А. И. Азоян [и др.] // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. – 2022. – № 4. – С. 41–51. – DOI 10.46973/0201–727X_2022_4_41.

207. Acidic and basic sites in NaX and NaY faujasites investigated by NH₃, CO₂ and CO molecular probes / G. Martra, S. Coluccia, P. Davit [et al.] // *Research on Chemical Intermediates*. – 1999. – Vol. 25. – P. 77–93. – DOI 10.1163/156856799X00392.

208. Adsorption kinetics for CO₂ on highly selective zeolites NaKA and nano-NaKA / O. Cheung, Z. Vacsik, Q. Liu [et al.] // *Applied Energy*. – 2013. – Vol. 112. – P. 1326–1336. – DOI 10.1016/J.APENERGY.2013.01.017.

209. Nakamoto, K. *Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds* / K. Nakamoto. – 6th ed. – New York : John Wiley Sons, 2009. – 418 p.

210. Инфракрасная спектроскопия полимеров / И. Дехант, Р. Данц, В. Киммер, Р. Шмольке. – Москва: Химия, 1976. – 472 с.

211. Zolotarev, V. M. Optical constants of industrial polymers in the IR region / V. M. Zolotarev, B. Z. Volchek, E. N. Vlasova // *Optics and Spectroscopy*. – 2006. – Vol. 101. – P. 716–723. – DOI 10.1134/S0030400X06110105.

212. Исследование процессов осаждения тонких тефлоноподобных пленок газоструйным методом / М. Н. Андреев, А. К. Ребров, А. И. Сафонов, Н. И.

Тимошенко // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. – 2007. – Т. 2 (4). – С. 55–62. – ISSN 1818-7994.

213. Investigation of changes in the properties of diamond-like films under friction by the XPS method / A.V. Sidashov, M. V. Boiko, E.I. Luneva, A.M. Popov // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 2131(5). – DOI 10.1088/1742-6596/2131/5/052038.

214. Surface Modification Features of Tool Steels by Laser Radiation / A. V. Sidashov, A. T. Kozakov, V. I. Kolesnikov [et al.] // Journal of Friction and Wear. – 2020. – Vol. 41(6). – P. 549–553. – DOI 10.3103/S1068366620060185.

215. Сидашов, А. В. Электронное строение, элементный состав и прочностные свойства модифицированных лазерным излучением поверхностей сталей, алмазных и графеновых пленок для трибологических применений : диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук : 01.04.07 / Сидашов Андрей Вячеславович. – Ростов-на-Дону, 2022. – 409 с.

216. Phase Composition and Tribological Characteristics of the Surface Layers of Carbon Tool Steels after Laser Processing in Air / A. V. Sidashov, A. T. Kozakov, S. I. Yaresko [et al.] // Journal of Surface Investigation. – 2021. – Vol. 15(2). – P. 350–360. – DOI 10.1134/S1027451021010316.

217. The mechanism of formation of boundary lubricating films during friction in a medium of di(2-ethylhexyl) sebacate / M. V. Boiko, A. V. Sidashov, T. G. Boiko [et al.] // Tribology International. – 2022. – Vol. 165. – P. 107–222. – DOI 10.1016/j.triboint.2021.107222.

218. Influence of the Structure of Salicylic Acid Analogue Molecules on the Formation of Tribofilms in Di(2-ethylhexyl) sebacate / M. V. Boiko, A. V. Sidashov, A. A. Bicherov [et al.] // Tribology Letters. – 2022. – Vol. 70, No. 1. – DOI 10.1007/s11249-022-01561-y.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Акты об использовании результатов диссертационного исследования

УТВЕРЖДАЮ:

Генеральный директор

ООО «РостИнТех»

Щебет В.В.


«12» _____ 2024 г.



ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ ИСПЫТАНИЙ

Комиссия в составе:

- исполнительного директора ООО «РостИнТех» к.т.н. Д.В. Плаксиенко;
- зам. гл. конструктора ООО «РостИнТех» В.А. Быкова;
- начальника производства ООО «РостИнТех» Д.А. Злобина;
- профессора кафедры «Теоретическая механика» ФГБОУ ВО РГУПС, д.т.н. профессора П.Г. Иваночкина;
- заведующего лабораторией кафедры «Теоретическая механика» ФГБОУ ВО РГУПС, к.т.н Д.С. Мантурова;
- специалиста УМР ИЦНПС ФГБОУ ВО РГУПС А.И. Азоян

составила настоящий акт в том, что в результате совместных научно-исследовательских работ разработаны и прошли промышленные испытания накладок направляющих покрытых антифрикционным композиционным материалом на основе модифицированного полимера. Данные накладки устанавливались в узле направляющих Горизонтально-расточного станка модели 2А622. Накладки имеют прямоугольную форму и совершают возвратно-поступательное движение.

Результаты испытания показали, что накладки направляющих с применением полимерного композиционного материала на основе эпоксифенольной смолы марки ЭД-20 с наполнителями и наноразмерными добавками, разработанного А.И. Азоян под руководством доктора технических наук, профессора П.Г. Иваночкина в сравнении с традиционным подходом, обладают демпфирующими свойствами и повышенной долговечностью.

В результате проверки выявлены следующие положения:

- Рабочая поверхность накладок показала сглаженную структуру, что свидетельствует о равномерном распределении нагрузок и отсутствии локальных повреждений.
- Не обнаружены следы нарушения целостности или отслоения композиционного слоя, что подтверждает высокое качество нанесенного покрытия и его адгезию к основанию.

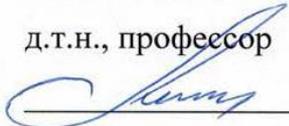
Наблюдается уменьшение износа опорных поверхностей, направляющих на 14-16%.

Разработанный материал рекомендуется к внедрению при модернизации Горизонтально-расточного станка модели 2А622.

Профессор кафедры
«Теоретическая механика»

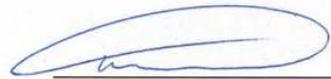
ФГБОУ ВО РГУПС

д.т.н., профессор

 П.Г. Иваночкин

Исполнительный директор

ООО «РостИнТех» к.т.н.

 Д.В. Плаксиенко

Заведующий лабораторией
кафедры «Теоретическая механика»

ФГБОУ ВО РГУПС

 Д.С. Мантуров

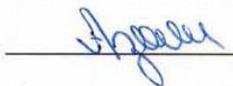
Зам. гл. конструктора

ООО «РостИнТех»

 В.А. Быков

Специалист УМР ИЦНПС

ФГБОУ ВО РГУПС

 А.И. Азоян

Начальник производства

ООО «РостИнТех»

 Д.А. Злобин

УТВЕРЖДАЮ:
 Директор ООО «Торгово-
 производственная компания СХТ»

Долгопятов А.Б.


 (подпись) М.П.
 «24» декабря 2023 г.

ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ ИСПЫТАНИЙ

Комиссия в составе директора по производству Долгопятова Дениса Борисовича, инженера-конструктора Ященко Александра Владимировича, профессора кафедры «Теоретическая механика» ФГБОУ ВО РГУПС, д.т.н. профессора П.Г. Иваночкина, заведующего лабораторией кафедры «Теоретическая механика», к.т.н Д.С. Мантурова, специалиста УМР ИЦНПС ФГБОУ ВО РГУПС А.И. Азоян составила настоящий акт в том, что в результате научно-исследовательских работ разработаны и прошли промышленные испытания направляющие ползуна покрытые антифрикционным композиционным материалом на основе модифицированного полимера. Направляющие устанавливались в механизме дыропробивного ползуна Универсальных пресс-ножниц. Ползун пресса имеет прямоугольную форму и совершает возвратно-поступательное движение.

Результаты испытания показали, что узел дыропробивного ползуна с применением полимерного композиционного материала на основе эпоксифенольной смолы марки ЭД-20 с наполнителями и наноразмерными добавками, разработанного в ФГБОУ ВО РГУПС и представленного для испытаний, в сравнении с применяемым смазочным материалом, обладает демпфирующими свойствами и наблюдается уменьшение износа опорных поверхностей направляющих, что свидетельствует о повышении долговечности полузуна.

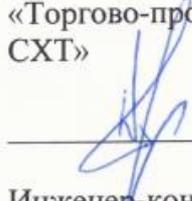
Разработанный материал рекомендуется к внедрению при модернизации Универсальных пресс-ножниц.

Профессор кафедры
 «Теоретическая механика»
 ФГБОУ ВО РГУПС
 д.т.н., профессор
 П.Г. Иваночкин

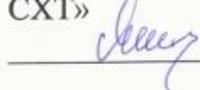
Заведующий лабораторией
 кафедры «Теоретическая механика»
 ФГБОУ ВО РГУПС
 Д.С. Мантуров

Специалист УМР ИЦНПС
 ФГБОУ ВО РГУПС
 А.И. Азоян

Директор по производству ООО
 «Торгово-производственная компания
 СХТ»

 Д.Б. Долгопятов

Инженер-конструктор ООО
 «Торгово-производственная компания
 СХТ»

 А.В. Ященко



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

пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, д. 2, г. Ростов-на-Дону, 344038
 Тел. (863) 245-06-13, ж.д. 5-88-01, Факс (863) 255-32-83, 245-06-13, E-mail: up_del@dep.rgups.ru
 ОКПО 01116006, ОГРН 1026103709499, ИНН/КПП 6165009334/616501001



Утверждаю:

Проректор по научной работе
 ФГБОУ ВО РГУПС,
 д.т.н., профессор

А.Н. Гуда

2024 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы
 на соискание ученой степени кандидата технических наук
 Азоян Анаид Иосиповны

Комиссия в составе: председатель – директор НИЧ, к.т.н. Носков В.Н.; члены комиссии – декан Электромеханического факультета, д.т.н., профессор Яицков И.А.; зав. кафедрой «Проектирование и технологии производства машин», д.т.н., доцент Харламов П.В., зав. лабораторией кафедры «Теоретическая механика», к.т.н. Мантуров Д.С. составили настоящий акт о том, что результаты диссертации Азоян А.И. на соискание ученой степени кандидата наук были использованы при выполнении грантов:

Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ)

№ 20-08-00614 А «Разработка способов получения модифицированных полимерных композиционных материалов и методов прогнозирования упруго-прочностных и трибологических свойств создаваемых композитов»;

№ 18-58-00026 Бел_а «Исследование механизмов повышения несущей способности трибосистем при реализации в зоне трения граничных смазочных слоев, модифицированных жидкокристаллическими и наноразмерными наполнителями».

Российского научного фонда (РНФ)

№ 14-29-00116 П «Исследование механизма формирования и функционирования поверхностных структур на трибоконтате для

создания антифрикционного слоя с заданными трибофизическими характеристиками».

Азоян А.И. были получены следующие научные результаты при выполнении указанных грантов:

1. Разработаны методы модифицирования полимеров различными армирующими и антифрикционными компонентами. Введение в полимерную матрицу смолы марки ЭД-20 модификаторов – политетрафторэтилена марки Ф4МБ и мелкодисперсной шпинели металлов (Mn, Mg, Fe) – в определенном процентом соотношении массы значительно повышает износостойкость и способствует снижению коэффициента трения.

2. Экспериментально доказано, что использование рассматриваемых наноразмерных добавок при увеличении времени выдержки способствует подавлению релаксационных процессов.

3. Установлен механизм формирования вторичных структур в процессе трибосопряжения «металл-полимер» и, на основе этого, сформулированы рекомендации модифицирования основы композита наполнителями и наноразмерными добавками.

Перечисленные результаты являются перспективной основой их применения в тяжело нагруженных узлах трения строительных, подъемно-транспортных и других машин.

Председатель комиссии:

 В.Н. Носков

Члены комиссии:

 И.А. Яицков

 П.В. Харламов

 Д.С. Мантуров

«18» 09 2024 г.