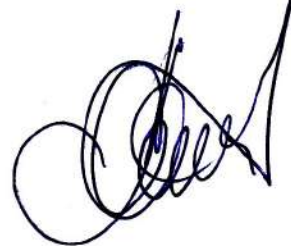


На правах рукописи



Ананко Анатолий Михайлович

**ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ,
МОДИФИЦИРОВАННЫХ МИКРОКАПСУЛАМИ
СО СМАЗОЧНЫМ МАТЕРИАЛОМ**

Специальность 2.5.3 – Трение и износ в машинах

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Ростов-на-Дону

2026

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

**Научный
руководитель:**

доктор физико-математических наук, доцент
Беляк Ольга Александровна
(ФГБОУ ВО РГУПС НИЧ
кафедра «Теоретическая механика»,
ведущий научный сотрудник).

**Официальные
оппоненты:**

доктор технических наук, профессор
Бурлакова Виктория Эдуардовна
(ФГБОУ ВО «Донской государственный
технический университет» кафедра «Химия»,
профессор),

кандидат технических наук, доцент
Зайцев Андрей Николаевич
(МГТУ им. Н.Э. Баумана кафедра МТ1
«Металлорежущие станки», доцент).

**Ведущая
организация:**

федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого» г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «25» декабря 2026 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 44.2.005.01 на базе ФГБОУ ВО РГУПС по адресу: 344038, Ростовская область, городской округ город Ростов-на-Дону, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2, конференц-зал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО РГУПС <http://www.rgups.ru>.

Автореферат разослан «___» ноября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 44.2.005.01
д.ф.-м.н., доцент

А. В. Сидашов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Требования к надежности, долговечности и эффективности тяжело нагруженных узлов трения растут. Такие узлы работают при переменных нагрузках, вибрациях и ограниченной подаче смазочного материала. В металлополимерных трибосопряжениях масляное голодание, динамические нагрузки и загрязнение контактных поверхностей увеличивают износ, сокращают ресурс оборудования и приводят к значительным экономическим потерям. Поэтому особый интерес представляют металлополимерные трибосопряжения, поскольку они обладают достаточной несущей способностью и могут работать в режиме граничного трения. Отметим, что традиционные подходы к повышению износостойкости узлов трения основаны на применении внешних смазочных материалов. Такие решения дороги, усложняют конструкцию и требуют более тщательного обслуживания. В ряде случаев потери смазочного материала и загрязнение окружающей среды накладывают на них экологические ограничения. В этой связи возникает необходимость разработки новых подходов к созданию функциональных композиционных материалов, способных к саморегулированию триботехнических свойств непосредственно в процессе эксплуатации. Основным направлением при этом является формирование такой микроструктуры композита и его механических свойств, которые будут ориентированы на создание на поверхности трибоконтакта вторичных структур, целенаправленно изменяющих интенсивность изнашивания и коэффициент трения. Вторичные поверхностные структуры, представляющие собой пленки, формируемые из продуктов износа полимерной матрицы, смазочного материала и дисперсных наполнителей, выполняют защитную функцию и обеспечивают устойчивую работу трибосистемы в режимах граничного и сухого трения. Особенность композитов, применяемых в металлополимерных узлах трения, заключается и в их способности образовывать активные продукты деструкции, накапливать трибоэлектрические заряды, что создает возможность для реализации качественно новых механизмов смазывания и самовосстановления. Отметим, что перспективный подход к созданию самосмазывающихся полимерных композитов основан на доставке смазочного материала в зону трибоконтакта с помощью микрокапсул, которые встраивают в полимерную матрицу. При трении оболочка капсулы разрушается под действием механического воздействия, высвобождая смазочный материал, что снижает износ на величину от 60 до 90 % по сравнению с немодифицированными композитами. Сочетание микрокапсул с дисперсными армирующими наполнителями позволяет синергетически улучшить прочностные характеристики полимерных композиционных материалов, уменьшить их реологические свойства и способствует формированию вторичных структур на поверхности контртела.

Вместе с тем остаются недостаточно изученными вопросы формирования композитов с определенными механическими свойствами, адаптированными под конкретные условия эксплуатации, взаимодействие высвобождаемого из микрокапсул смазочного материала с продуктами износа и наполнителями на поверхности трения, химический состав формируемых вторичных структур,

а также влияние трибоэлектрических явлений на процессы формирования и разрушения пленок смазочных материалов.

Результаты настоящей диссертационной работы были получены в рамках реализации научно-исследовательской работы, поддержанной Российским научным фондом, грант № 21-19-00288 «Разработка принципов конструирования и методов создания высокоэффективных функциональных полимерных материалов и покрытий триботехнического назначения модифицированных микрокапсулами со смазочным материалом».

Степень разработанности проблемы. Теоретические и экспериментальные исследования в области повышения износостойкости, надежности и долговечности металлополимерных трибосистем ведутся на протяжении последних десятилетий как в России, так и за рубежом. Фундаментальный вклад в развитие триботехники и физики прочности полимерных композиционных материалов внесли российские научные школы И. Г. Горячевой, В. И. Колесникова, В. Е. Панина. В Республике Беларусь фундаментальные исследования в области трибологии полимеров проводились школами В. А. Белого, Н. К. Мышкина, А. И. Свириденка.

Современное представление фрикционного контактного взаимодействия в металлополимерных трибосопряжениях сформировалось на фундаментальной основе, заложенной Г. М. Бартеневым, М. Н. Добычиным, И. В. Крагельским, И. А. Солдатенковым, Е. В. Торской, F. P. Bowden, B. J. Briscoe, J. K. Lancaster, A. Schallamach, D. Tabor и др. Поиск путей самоорганизации при трении на основе формирования вторичных поверхностных структур изложен в классических работах Л. И. Бершадского, Н. А. Буше, Д. Н. Гаркунова, Б. И. Костецкого, А. А. Кутькова, заложивших теоретические основы понимания механизмов образования трибопленок и их роли в снижении износа. Механизмы трения и износа полимерных композитов различной природы, трибохимические процессы и эволюции поверхностей трения при различных режимах нагружения исследовали Д. Т. Авдеев, А. Ю. Албагачиев, В. Э. Бурлакова, В. И. Бутенко, И. А. Буяновский, И. С. Гершман, Г. А. Гороховский, Ю. Г. Дорофеев, О. Ю. Елагина, А. С. Кужаров, Ю. К. Машков, С. А. Поляков, С. В. Федоров, G. Fuks-Rabinovich, M. J. Furey, M. Khonsari, B. E. Klamecki, M. Nosonovsky и др.

В настоящее время ведущие российские научные коллективы активно разрабатывают новые полимерные композиционные материалы с улучшенными триботехническими характеристиками, адаптируя их под специфические и часто экстремальные условия эксплуатации. Значительный вклад в развитие трибологии тяжелонагруженных узлов трения внесли ученые ИФПМ СО РАН (г. Томск) – член-корреспондент РАН С. В. Панин и др., в Институте машиностроения, материалов и транспорта СПбПУ (г. Санкт-Петербург) – М. А. Скотникова, Т. Е. Суханова и др., в ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН» – А. А. Охлопкова, П. Н. Петрова, М. А. Маркова и др.

Несмотря на известные исследования по отдельным аспектам проблемы фрикционного взаимодействия в металлополимерных трибосопряжениях, отсутствует комплексный подход к изучению триботехнических свойств

усовершенствованных материалов, рассматриваемых в диссертации в условиях сухого и граничного трения скольжения.

Цель работы состоит в повышении износостойкости тяжело нагруженных металлополимерных узлов трения, работающих в условиях граничного и сухого трения, путем разработки эпоксифенольного композиционного материала, модифицированного микрокапсулированными смазочными материалами и дисперсными армирующими наполнителями, установление закономерностей формирования его структуры, механических и трибологических свойств.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные **задачи**:

1. Разработать метод синтеза полиэфирных микрокапсул, содержащих смазочные материалы, и технологию получения эпоксифенольных композиционных материалов, включающую введение армирующих наполнителей и микрокапсул с их магнитной ориентацией в полимерной матрице.

2. Оценить влияние концентрации гибридных наполнителей на механические свойства и трибологические характеристики композиционных материалов.

3. Выявить механизм формирования вторичных поверхностных структур в металлополимерных трибосопряжениях.

4. Установить взаимосвязь между трибоэлектрическими явлениями (трибоЭДС, ток электризации) и процессами формирования и разрушения вторичных структур в зоне трения.

5. Провести промышленные испытания разработанных композитов, оценить их эксплуатационную эффективность в реальных узлах трения и разработать рекомендации по их применению.

Объект исследования – металлополимерные трибосопряжения типа «сталь – эпоксифенольный композиционный материал», работающие в условиях граничного трения и масляного голодания.

Предмет исследования – закономерности формирования структуры, механических и трибологических свойств эпоксифенольных композиционных материалов, содержащих микрокапсулированные смазочные материалы и дисперсные армирующие наполнители, а также механизмы их трения, изнашивания и формирования вторичного трибослоя.

Научная новизна работы заключается в следующих основных результатах:

1. Разработан и реализован подход к формированию эпоксифенольных композиционных материалов, сочетающих механическое упрочнение оксидным наполнителем (MgO) и самосмазывание за счет смазочного материала, заключенного в микрокапсулы, обеспечивающий снижение износа и коэффициента трения.

2. Показано, что введение 1 мас. % MgO и 1 мас. % микрокапсул с индустриальным маслом И-40 в эпоксидную матрицу обеспечивает существенное снижение интенсивности изнашивания и коэффициента трения по сравнению с немодифицированной эпоксидной смолой.

3. Выявлено влияние наполнителей на реологические свойства материалов на основе метода идентификации вязкоупругих свойств полимерных композитных материалов с учетом экспериментальных данных индентирования.

4. Установлено, что механизм формирования вторичных поверхностных структур в металлополимерном трибосопряжении с композитом, содержащим 1 мас. % MgO и 1 мас. % микрокапсулированного И-40, носит трехстадийный характер с циклическим обновлением трибослоя, что подтверждено данными ИК-НПВО, РЭМ/ЭДС и РФЭС.

5. Выявлена корреляция между характером трибоэлектрических сигналов (трибоЭДС) и стадиями формирования и разрушения вторичных структур и показана возможность использования трибоЭДС в качестве информативного параметра состояния граничного слоя в металлополимерном контакте.

Теоретическая значимость диссертационной работы:

1. Установлено влияние концентрации и состава гибридных наполнителей на вязкоупругие свойства полимерных композиционных материалов, прогнозирование их релаксационной микротвердости при постоянной нагрузке с течением времени на основе аналитического решения контактной задачи и применения гибридного вычислительного алгоритма при использовании данных индентирования.

2. Методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии и ИК Фурье-спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения проведен анализ процессов формирования вторичных структур.

Практическая значимость диссертационной работы:

1. Разработаны технологические подходы к внедрению микрокапсулированных смазок в эпоксидную матрицу с локализацией их у контактной поверхности детали.

2. Установлены закономерности образования вторичных структур и их влияние на величину коэффициента трения и интенсивности изнашивания модифицированных композитов на основании проведенных экспериментальных исследований, а также подтверждена применимость трибоэлектрических методов контроля для мониторинга состояния граничного смазочного слоя.

3. Промышленная апробация предложенного композита, из которого были изготовлены накладки направляющих горизонтально-расточного станка, проведенная в ООО «РостИнТех», подтвердила эффективность предложенного материала и возможность его практического использования.

Методы исследования. Для решения поставленных в работе задач использовался комплексный междисциплинарный подход, основанный на фундаментальных положениях триботехники и механики. Такой подход продиктован необходимостью всестороннего исследования состава, структуры, механических и трибологических свойств разработанных композиционных материалов, а также механизма формирования вторичных поверхностных структур в металлополимерной паре трения.

Для исследования морфологии и размерно-структурных характеристик микрокапсул и композиционных материалов применялись методы растровой электронной микроскопии (РЭМ) на сканирующих электронных микроскопах

ZEISS EVO MA 18. Элементный состав поверхностей трения и вторичных структур определялся методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии с применением детекторов EDAX модели X-Max 50N. Для изучения химического состава на поверхностях трения использовались современные методы спектроскопии: рентгеноэлектронная спектроскопия (РФЭС) на системе анализа поверхности Specs, инфракрасная Фурье-спектроскопия с нарушенным полным внутренним отражением (НПВО) на спектрометре Nicolet Series. Эти методы обеспечили идентификацию функциональных групп, продуктов трибохимических реакций и компонентов смазочного материала в составе вторичных структур.

Механические свойства композитов исследовались методами индентирования на многофункциональной платформе NanoTest 600. Теоретический метод определения вязкоупругих характеристик композитов для анализа и оценки релаксационных процессов композитов, а также прогнозирования их микротвердости при постоянной нагрузке, реализован в рамках решения контактной задачи и комбинированного вычислительного алгоритма (генетический алгоритм, метод Нелдера – Мида).

Трибологические испытания проводились на машинах трения ИИ 5018 и СМТ в контактной паре «сталь – полимер» при различных нагрузках и скоростях скольжения с определением коэффициента трения и интенсивности изнашивания. Планирование экспериментов по оценке влияния нагрузки и скорости скольжения на трибологические характеристики материалов осуществлялось с использованием методов математического планирования эксперимента. Для исследования трибоэлектрических явлений была разработана специальная методика измерения трибоэлектродвижущей силы (трибоЭДС) и тока электризации в процессе трения, позволяющая установить взаимосвязь между электрическими сигналами и процессами формирования и разрушения вторичных структур.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Комплексный подход к созданию эпоксифенольных композиционных материалов, сочетающих механическое упрочнение и самосмазывание за счет микрокапсулированных смазочных материалов в матрице, обеспечивающий синергетическое снижение износа и коэффициента трения.

2. Экспериментально установленные зависимости триботехнических свойств созданных композиционных материалов от состава и концентрации наполнителей.

3. Теоретико-экспериментальный метод идентификации вязкоупругих характеристик композитов и установленные зависимости этих свойств от состава и концентрации наполнителей на основе данных инструментального индентирования.

4. Результаты экспериментальных исследований перспективного композита, позволившие получить нелинейную закономерность изменения коэффициента трения и интенсивности изнашивания от нагрузки и скорости при сухом и граничном трении, выявить механизм формирования вторичных поверхностных структур в металлополимерных трибосопряжениях и установить

взаимосвязь между трибоэлектрическими явлениями и процессами формирования и разрушения вторичных структур в зоне трения.

Достоверность и обоснованность научных результатов обеспечиваются применением современного высокоточного оборудования и методов исследования, использованием комплекса взаимодополняющих экспериментальных методик, соблюдением стандартизированных процедур испытаний, обработкой результатов с применением методов математической статистики, согласованностью экспериментальных и теоретических данных, полученных в рамках моделей механики контактного взаимодействия, а также подтверждением результатов в ходе промышленных испытаний разработанного композиционного материала.

Апробация работы. Результаты по теме диссертационной работы были представлены на Международной научно-практической конференции «Транспорт: наука, образование, производство» (г. Ростов-на-Дону, 2012, 2020 гг.), научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития транспорта, промышленности и экономики России» (ТрансПромЭк-2018), (г. Ростов-на-Дону), Международной научно-технической конференции «Полимерные композиты и трибология» (Поликомтриб-2025) (г. Гомель, Беларусь), семинарах лаборатории «Транспорт, композиционные материалы и конструкции» Южного научного центра РАН.

Публикации. Основное содержание работы и результаты исследований опубликованы в 14 научных публикациях (общим объемом 5,69 п.л., лично автору принадлежат 2,11 п.л.), из них 6 публикаций – в изданиях, входящих в Перечень ВАК Минобрнауки России, в том числе 5 – по научной специальности 2.5.3, 3 публикации – в изданиях, индексируемых в Scopus и/или Web of Science, получен 1 патент Российской Федерации на изобретение, 4 публикации представлены в иных научных изданиях и сборниках.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов, библиографического списка из 172 наименований. Общий объем работы составляет 159 страниц, включает 41 рисунок и 17 таблиц.

Соответствие паспорту научной специальности. По теме и содержанию материалов исследования диссертационная работа соответствует научной специальности 2.5.3 – Трение и износ в машинах и соответствует пунктам паспорта специальности, а именно, п. 2 «Механика и физика контактного взаимодействия при трении покоя, трении скольжения, трении качения и качения с проскальзыванием с учетом строения, качества и свойств поверхностных слоев», п. 4 «Смазочное действие: гидро- и газодинамическая смазка, гидро- и газостатическая смазка, эластогидродинамическая смазка, смешанная смазка, граничная смазка», п. 7 «Триботехнические свойства материалов, покрытий и модифицированных поверхностных слоев» и п. 16 «Материалы трибологического назначения. Исследования и разработка».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, охарактеризована степень разработанности проблемы, определены объект, предмет, цель и задачи,

сформулированы научная новизна и положения, выносимые на защиту. Приведены сведения о методах, достоверности, практической значимости, апробации и публикациях по результатам диссертационного исследования.

В первой главе рассмотрено современное состояние исследований полимерных материалов триботехнического назначения. Приведен обзор научных трудов российских и зарубежных исследователей, посвященных полимерным композиционным материалам с различными типами наполнителей (частицы армирующих наполнителей, твердых смазочных материалов, капсулы). Проанализированы существующие механизмы физико-механических процессов в узле трения, явления электризации и трибоэлектрические эффекты в полимерных трибосистемах. Исследованы механизмы граничного трения, формирование вторичных структур в металлополимерных контактах. Проведенный анализ позволил установить актуальность и перспективность выбранной темы, определить дальнейшие научные направления и сформулировать цель и задачи диссертационной работы.

Во второй главе представлены методы исследований триботехнических свойств материалов, описана разработанная последовательность получения композитов с различными наполнителями, режимы проведения испытаний и материалы, выбранные для исследований. Структурная схема исследований диссертационной работы приведена на рисунке 1.

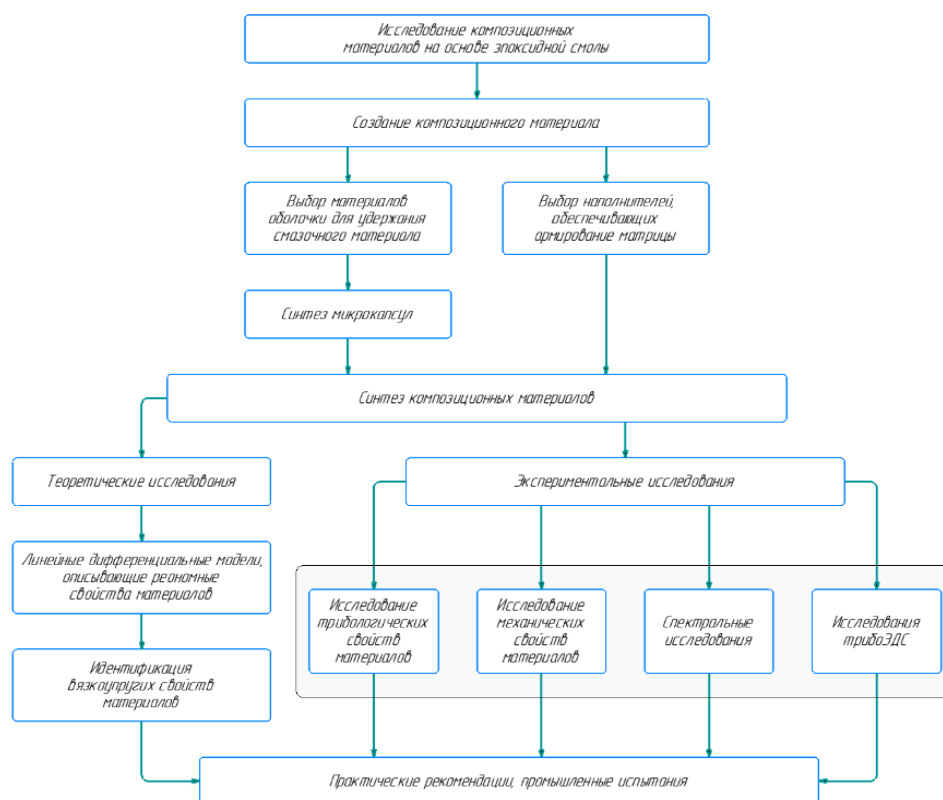


Рисунок 1 – Структурная схема исследований

На первом этапе создания композитов реализован синтез полиэфирных микрокапсул методом межфазной поликонденсации, содержащих смазочный материал (И-40 (А237), ДОС (А481), растительное масло (А241)),

ферромагнитные частицы) со средним характерным размером 7–15 мкм и толщиной оболочки 0,4–1,2 мкм. Далее, были подготовлены дисперсные наполнители В, В₄С, SiC и MgO, измельченные в планетарной мельнице, средним характерным размером 20–60 мкм. На заключительном этапе происходило формирование композита с заданной микроструктурой на основе эпоксидно-диановой смолы марки ЭД-20 (ГОСТ 10587-84) и отвердителем (полиэтиленполиамин). Полимеризация композита, содержащего микрокапсулы осуществлялась в магнитном поле при комнатной температуре. Концентрация микрокапсул составляла 1 мас. %, а частиц – варьировалась в диапазоне 1–5 мас. %.

Механические характеристики композитов были получены в рамках инструментального индентирования (комплекс NanoTest 600) при локальном нагружении образцов сфероконическим алмазным индентором с углом конусности 120° и радиусом скругления 100 мкм. Максимальная нагрузка составила 0,5 Н, скорость нагружения и разгрузки совпадали, время выдержки индентора при максимальной нагрузке составляло 5 с. Серия уколов (10) реализовывалась в различные точки на поверхности материала (протокол исследований I). В протоколе II время выдержки индентора при постоянной нагрузке варьировалось $t_b = [10 \text{ с}; 30 \text{ с}; 90 \text{ с}; 180 \text{ с}; 900 \text{ с}]$ при прочих равных условиях.

Трибологические испытания были реализованы по схемам «вал – штифт», «вал – частичный вкладыш». Для первой схемы сравнительные испытания проводились при скорости вращения контртела (ролик диаметром 40 мм из стали марки 45 с твердостью 45–50 HRC, шероховатость поверхности $R_a = 0,1 \text{ мкм}$) 90 об/мин и нормальной нагрузке 55 Н, путь трения составлял 2200 м. Вторая схема испытаний была реализована при изменении значений нормальной нагрузки и скорости, которые были определены планом эксперимента. Нормальная нагрузка изменялась в диапазоне 50–200 Н, скорость скольжения 0,05–0,2 м/с. Окончанием испытания являлся пройденный путь, который составлял 720 м. В процессе экспериментов фиксировалось среднее значение коэффициента трения (μ) и интенсивность изнашивания (I). Значения коэффициента трения были определены при стационарном режиме трения. Интенсивность изнашивания определялась как частное значений массового износа и пройденного пути, при этом учитывалась величина общего износа образца за приработочный и стационарный периоды.

Такой комплекс экспериментов позволил перейти от выбора состава гибридного наполнителя к статистической оценке нагрузочно-скоростного режима определенного перспективного образца, а затем сопоставить триботехнические характеристики с составом образовавшихся вторичных поверхностных структур. С этой целью был выполнен трибологический эксперимент на торцевой машине трения по типу «плоский диск – палец». Три образца композиционного материала были расположены под углом 120° на диаметре 70 мм вращающегося диска из стали 45. Нормальное давление составило 0,3 МПа, угловая скорость вращения образцов – 136,4 об/мин при общей длительности испытания 180 минут. Особенностью этой методики является

разрыв трибосопряжения каждые 30 минут для анализа поверхности контртела методами ИК НПВО-спектроскопии.

Третья глава посвящена исследованию триботехнических свойств композиционных материалов с матрицей ЭД-20 и наполнителями различной концентрации в рамках методик комплексного подхода, приведенного в главе 2.

Механические характеристики композитов (таблица 1) были получены в рамках инструментального индентирования по протоколу I.

Получены значения микротвердости H и приведенного модуля упругости E_r и СКО этих величин σ_H , σ_{Er} в рамках сферического анализа (программное обеспечение комплекса NanoTest 600). Вычислены характеристики H/E_r , H^3/E_r^2 , которые часто связывают с прогнозированием триботехнического поведения полимерных композитов.

Таблица 1 – Механические свойства композиционных материалов с наполнителями

Шифр образца	Образец	H , ГПа	σ_H , ГПа	E_r , ГПа	σ_{Er} , ГПа	H/E_r	H^3/E_r^2 , МПа
106	ЭД-20	0,279	0,005	5,82	0,12	0,048	0,641
107	ЭД-20 + 1%B	0,245	0,006	5,37	0,135	0,046	0,514
108	ЭД-20 + 3%B	0,181	0,008	5,86	0,354	0,031	0,174
109	ЭД-20 + 5%B	0,200	0,01	6,18	0,232	0,032	0,209
110	ЭД-20 + 1%B ₄ C	0,255	0,004	6,31	0,34	0,04	0,416
111	ЭД-20 + 3%B ₄ C	0,249	0,01	6,38	0,25	0,039	0,379
112	ЭД-20 + 5%B ₄ C	0,221	0,009	6,32	0,43	0,035	0,270
113	ЭД-20 + 1%SiC	0,280	0,004	5,68	0,033	0,049	0,679
114	ЭД-20 + 3%SiC	0,236	0,01	5,69	0,141	0,041	0,406
115	ЭД-20 + 5%SiC	0,249	0,007	5,56	0,153	0,045	0,499
116	ЭД-20 + 1%MgO	0,286	0,008	5,93	0,2	0,048	0,665
117	ЭД-20 + 3%MgO	0,242	0,01	6,28	0,06	0,039	0,359
118	ЭД-20 + 5%MgO	0,235	0,011	6,18	0,23	0,038	0,340
134	ЭД-20 + 1% A237	0,296	0,009	5,95	0,188	0,05	0,733
135	ЭД-20 + 1% A241	0,296	0,008	6,11	0,082	0,049	0,698
139	ЭД-20 + 1% A481	0,284	0,009	5,94	0,135	0,048	0,646
142	ЭД-20 + 1%MgO + 1% A237	0,308	0,008	6,29	0,227	0,049	0,743
143	ЭД-20 + 1% MgO + 1% A241	0,300	0,009	6,26	0,099	0,048	0,694
144	ЭД-20 + 1% MgO + 1% A481	0,306	0,007	6,24	0,122	0,049	0,727
145	ЭД-20 + 1% MgO + 1% A237 + + 0,5% Fe	0,313	0,006	6,07	0,111	0,052	0,842
146	ЭД-20 + 1% MgO + 1% A241 + + 0,5% Fe	0,323	0,012	6,58	0,134	0,049	0,777
147	ЭД-20 + 1%MgO + 1% A481 + + 0,5% Fe	0,319	0,002	6,37	0,087	0,050	0,803

Наполнители В, В₄С для всех рассмотренных концентраций снижали микротвердость композитов по сравнению с базовой матрицей (№ 106). Образцы композитов, модифицированных карбидом кремния (№ 113) и оксидом магния (№ 116), имели микротвердость выше, чем у исходного образца из эпоксидно-диановой смолы (№ 106). Введение частиц MgO 1 мас. % приводит к увеличению микротвердости (2,5 %) и модуля упругости (1,9 %), что свидетельствует об армирующем действии твердых ультрадисперсных частиц при малых концентрациях. Добавление в исходную матрицу микрокапсул со смазочным материалом (образцы № 134, № 135, № 139) привело к увеличению значений *H* (до 6 %) и *Er* (до 5 %) (см. таблицу 1).

Сравнительные трибологические испытания (схема «вал – штифт»), результаты которых приведены в таблице 2 подтвердили различие механизмов действия наполнителей.

Таблица 2 – Трибологические характеристики композиционных материалов с гибридными наполнителями

№	Образец	I, мг/м	μ
106	ЭД-20	0,0251	0,4
107	ЭД-20 + 1 % В	0,0386	0,38
108	ЭД-20 + 3 % В	0,0478	0,38
109	ЭД-20 + 5 % В	образец разрушился	0,54
110	ЭД-20 + 1 % В ₄ С	образец разрушился	0,7
111	ЭД-20 + 3 % В ₄ С	образец разрушился	0,65
112	ЭД-20 + 5 % В ₄ С	образец разрушился	0,59
113	ЭД-20 + 1 % SiC	0,0157	0,27
114	ЭД-20 + 3 % SiC	0,0288	0,38
115	ЭД-20 + 5 % SiC	0,0272	0,34
116	ЭД-20 + 1 % MgO	0,00923	0,4
117	ЭД-20 + 3 % MgO	0,019	0,45
118	ЭД-20 + 5 % MgO	0,0194	0,37
134	ЭД-20 + 1 % A237	0,00632	0,22
135	ЭД-20 + 1 % A241	0,0164	0,27
139	ЭД-20 + 1 % A481	0,0145	0,24
142	ЭД-20 + 1 % MgO + 1 % A237	0,00464	0,23
143	ЭД-20 + 1 % MgO + 1 % A241	0,0133	0,27
144	ЭД-20 + 1 % MgO + 1 % A481	0,00918	0,26
145	ЭД-20 + 1 % MgO + 1 % A237 + 0,5 % Fe	0,0053	0,27
146	ЭД-20 + 1 % MgO + 1 % A241 + 0,5 % Fe	0,0134	0,34
147	ЭД-20 + 1 % MgO + 1 % A481 + 0,5 % Fe	0,0117	0,38

Наилучший результат среди однокомпонентных наполнителей продемонстрировал MgO. Введение 1 мас. % MgO снизило интенсивность

изнашивания на 63 %, сохранив коэффициент трения на уровне его значения для базовой матрицы 0,40 (см. таблицу 2).

Снижение интенсивности износа (см. таблицу 2) линейки образцов № 116–118 соответствует закономерности изменения индикатора износостойкости H^3/Er^2 (см. таблицу 1) в рамках этой линейки. Добавка 1 мас. % микрокапсул A237 уменьшила интенсивность изнашивания на 75 %, с 0,0251 до 0,00632 мг/м (см. таблицу 2), и коэффициент трения на 45 %, с 0,40 до 0,22 (см. таблицу 2). Совместное введение этих компонентов было реализовано в образце № 142, показавшем наилучший результат – интенсивность изнашивания снизилась на 82 %, до 0,00464 мг/м, а коэффициент трения – на 42,5 %, до 0,23. Полученный результат превышает эффект каждого компонента, взятого отдельно, и указывает на их совместное действие.

Результаты анализа поверхности трения стального контртела после испытаний с образцом № 142 (ЭД-20 + 1 мас.% MgO + 1 мас. % микрокапсул A237), выполненного методом сканирующей электронной микроскопии с энергодисперсионной спектроскопией (СЭМ-ЭДС), представлены на рисунке 2. На контактной поверхности контртела были обнаружены участки вторичных структур, в составе которых определены C, O, N, Mg, Fe (см. рисунок 2, а). Преобладание C, O и N (см. рисунок 2, б), а также наличие Mg свидетельствуют о том, что вторичные структуры сформированы преимущественно продуктами переноса и трибодеструкции полимерного композита.

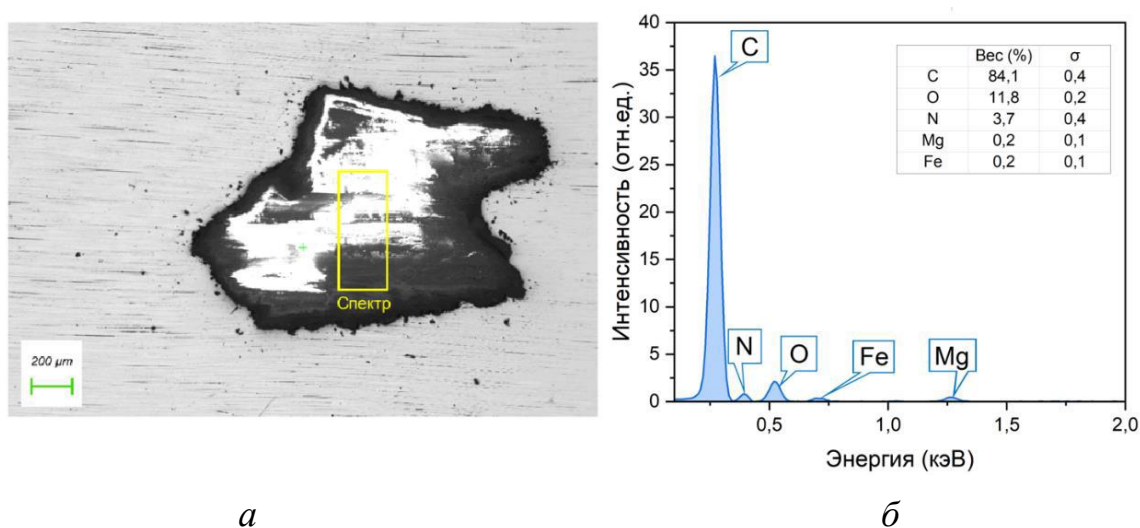


Рисунок 2 – Результаты энергодисперсионного анализа элементного состава участка поверхности трения: а – изображение участка с выделенной областью регистрации спектра; б – энергодисперсионный спектр выделенной области и результаты количественного элементного анализа

Эти выводы были подтверждены и данными, полученными в рамках метода рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии на системе анализа SPECS. РФЭС-спектры поверхности образцов приведены на рисунке 3. На обзорном спектре идентифицируются линии Mg 1s, Fe 2p, O 1s и C 1s, свидетельствующие о присутствии в составе трибослоя частиц оксида магния,

продуктов износа стального контртела и органических компонентов полимерной матрицы и смазочного материала. Исследование продуктов трибохимических превращений методом РФЭС по спектрам C 1s, O 1s и Fe 2p показало, что атомы железа, судя по форме и положению уровня Fe 2p_{3/2,1/2}, находятся в металлическом и преимущественно окисленном состоянии, C 1s содержит две компоненты C–C (с энергией связи 285 эВ) и Me–C (283 эВ).

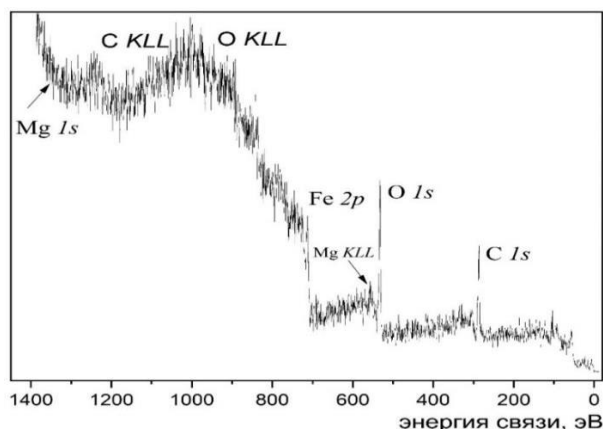


Рисунок 3 – Обзорный рентгеноэлектронный спектр поверхности трибосопряжения после ионного травления

Спектр O 1s состоит из двух компонент А (532 эВ), В (530,5 эВ). Компонента с меньшей энергией связи относится к кислороду оксидов поверхности стали. Компонента с большей энергией связи соответствует гидроксильным группам слабосвязанного молекулярного кислорода, адсорбированного на поверхности металла, а также кислороду в сложных молекулах, которые имеют ковалентный характер связи.

Серии ИК-спектров поверхности стального диска, полученных с временным шагом 30 минут в процессе трения образца № 142 с оптимальным составом гибридного наполнителя приведены на рисунке 4.

Триада полос 1503, 1025 и 827 см⁻¹ соответствует полосам эталонного спектра DGEBA (1510, 1036 и 831 см⁻¹) подтверждая наличие частиц эпоксидной матрицы в составе трибослоя. Отсутствие в спектрах полосы 916 см⁻¹ (деформационное колебание оксиранового цикла, присутствующее в эталоне неотвержденного DGEBA) свидетельствует о полном отверждении базовой матрицы. Группа полос 2922, 2853, 1743 и 1160 см⁻¹ воспроизводит спектр диоктилсебацата (2929, 2857, 1738 и 1172 см⁻¹). Синхронный рост полос 1743 и 1160 см⁻¹ подтверждает вскрытие микрокапсул при фрикционном взаимодействии и перенос в зону трения сложноэфирных фрагментов разрушенных оболочек микрокапсул совместно с маслом. На начальном этапе испытаний (спектр после 30 минут трения) доминируют полосы функциональных групп эпоксидной матрицы (827, 1025, 1503 см⁻¹), что свидетельствует о накоплении на контактной поверхности продуктов износа полимера. К 60-й минуте интенсивность этих полос снижается, но вместе с этим

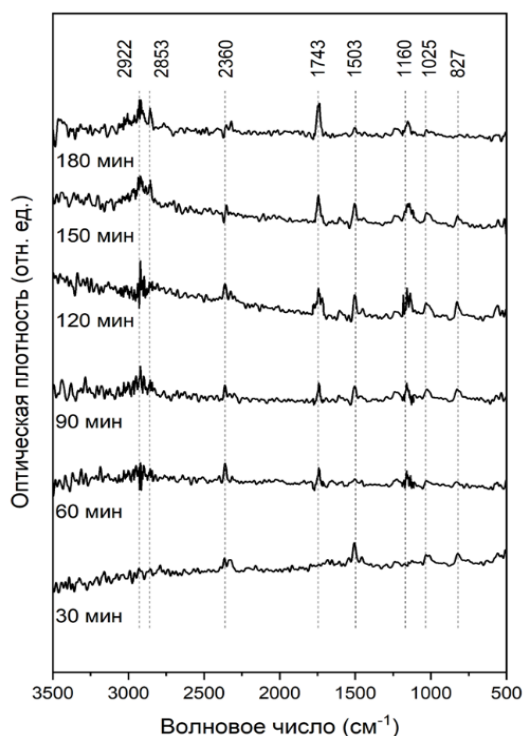


Рисунок 4 – ИК-спектры вторичных структур с поверхности контртела

растет вклад полос смазочного компонента (И-40) и сложноэфирных фрагментов оболочек микрокапсул (1160, 1743, 2853, 2922 см^{-1}), что соответствует увеличению доли смазочного материала в граничном слое. На более поздних стадиях испытаний наблюдаются периодические изменения интенсивности указанных полос. Таким образом, можно сделать вывод о стадийности процесса образования вторичных структур при трении материала (№ 142) и металлического контртела.

Трибоэлектрические измерения дополнили эту картину. Для ненаполненной ЭД-20 ток электризации периодически возрастал до 350 мА, тогда как введение микрокапсул уменьшало его максимум до 80 мА. У состава с 1 мас. % MgO и 1 мас. % A237 после начального роста

до 300 мА ток снижался до 10 мА и затем оставался практически неизменным более 60 мин. Одновременно уменьшалась и стабилизировалась трибоЭДС, а изменения сигнала совпадали со стадиями образования и частичного разрушения поверхностной пленки (рисунок 5).

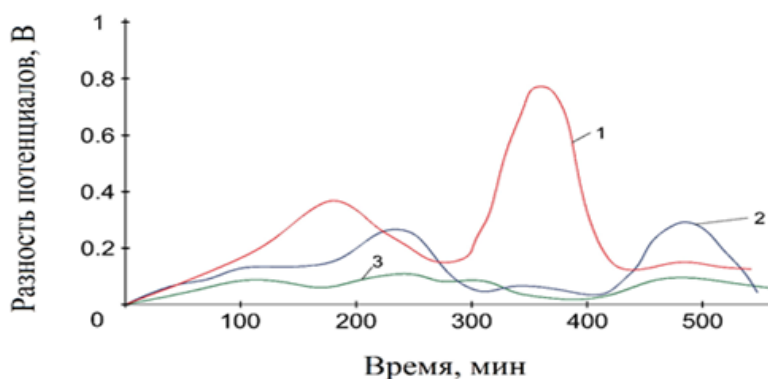


Рисунок 5 – Изменение величины трибоЭДС во времени при испытаниях эпоксидно-диановых композитов:

- 1 – базовый материал ЭД-20; 2 – композит ЭД-20 + 1 % оксида магния;
3 – композит ЭД-20 + 1 % оксида магния + 1 % капсул A237

В виду наличия смазки на границе раздела поверхностей трения фиксируется незначительная электростатическая ЭДС (меньше 0,1 В). Это объясняется как разделением трущихся поверхностей, так и поляризацией электрически нейтрального масла в электростатическом поле, что позволило

не только зафиксировать значение потенциала электризации композита при трении о сталь при наличии масляных капсул порядка 0,15–0,25 мВ, но и наблюдать инверсию знака трибоЭДС при повышении удельной нагрузки. Это дало основание использовать трибоЭДС для оценки состояния граничного смазочного слоя.

Для оценки влияния нагрузочно-скоростных режимов на процессы трения образца № 142 был использован статистический метод планирования эксперимента с применением ортогонального центрального плана второго порядка. В качестве исследуемой функции отклика выбран массовый износ ($\hat{M}$) и коэффициент трения ($\hat{\mu}$) образцов, а в качестве варьируемых факторов – нормальная нагрузка (X_1) и скорость скольжения (X_2). Согласно плану эксперимента было проведено девять опытов, каждый из которых проводился трижды в случайном порядке для уменьшения погрешностей. Уравнения регрессии в натуральных значениях факторов имеют вид:

$$\hat{\mu}(P, V) = 0,013 + 2,818 \cdot 10^{-3} P + 1,02V - 2,563 \cdot 10^{-3} P \cdot V - 7,23 \cdot 10^{-6} P^2 - 2,904V^2, \quad (1)$$

$$\hat{M}(P, V) = 3,315 + 4,72 \cdot 10^{-3} P - 2,562V + 7,597 \cdot 10^{-2} P \cdot V. \quad (2)$$

Проверка предложенных моделей проводилась по критерию Кохрена (воспроизводимость опытов), адекватность уравнений регрессии (1–2) подтверждена по критерию Фишера.

На рисунке 6 представлена поверхность, описывающая изменение коэффициента трения в зависимости от нагрузки и скорости (см. рисунок 6, а), проекция поверхности на плоскость PV (см. рисунок 6, б) и средние значения коэффициента трения, полученные в рамках лабораторного эксперимента для трех уровней факторов (см. рисунок 6, в).

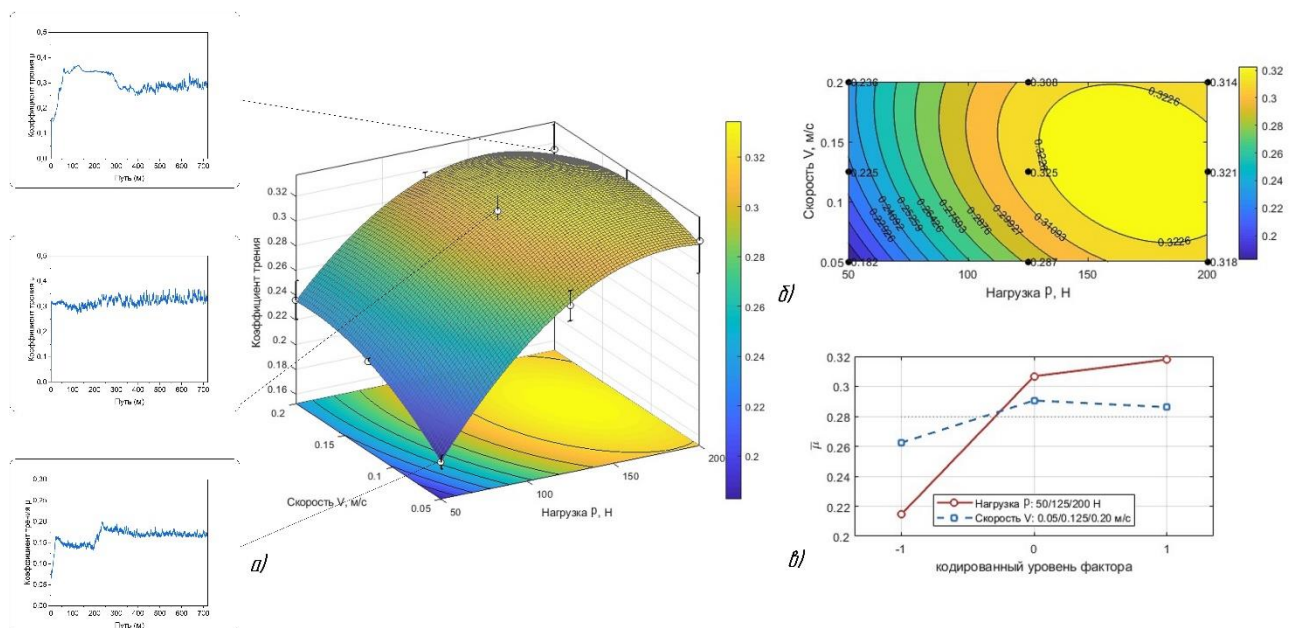


Рисунок 6 – Изменение величины коэффициента трения μ от нагрузки и скорости: а – поверхность отклика; б – проекция поверхности отклика на плоскость факторов; в – средние значения отклика для различных значений уровней фактора

На рисунке 7 представлена поверхность, описывающая изменение массового износа исследуемого композиционного материала (№ 142) в зависимости от нагрузки и скорости (см. рисунок 7, а), проекция поверхности на плоскость PV (см. рисунок 7, б) и средние значения отклика, полученные в рамках лабораторного эксперимента для трех уровней факторов (см. рисунок 7, в).

На основании проведенного дисперсионного анализа (ANOVA) установлено, что для массового износа (образец № 142, ЭД-20 + 1 мас.% MgO + 1 мас. % микрокапсул А237) значимы оба главных фактора и их взаимодействие, при этом нагрузка является доминирующим фактором (68 % общей изменчивости), а скорость – второй по значимости фактор (17 %), при этом их взаимодействие небольшое, но статистически значимое (8 %).

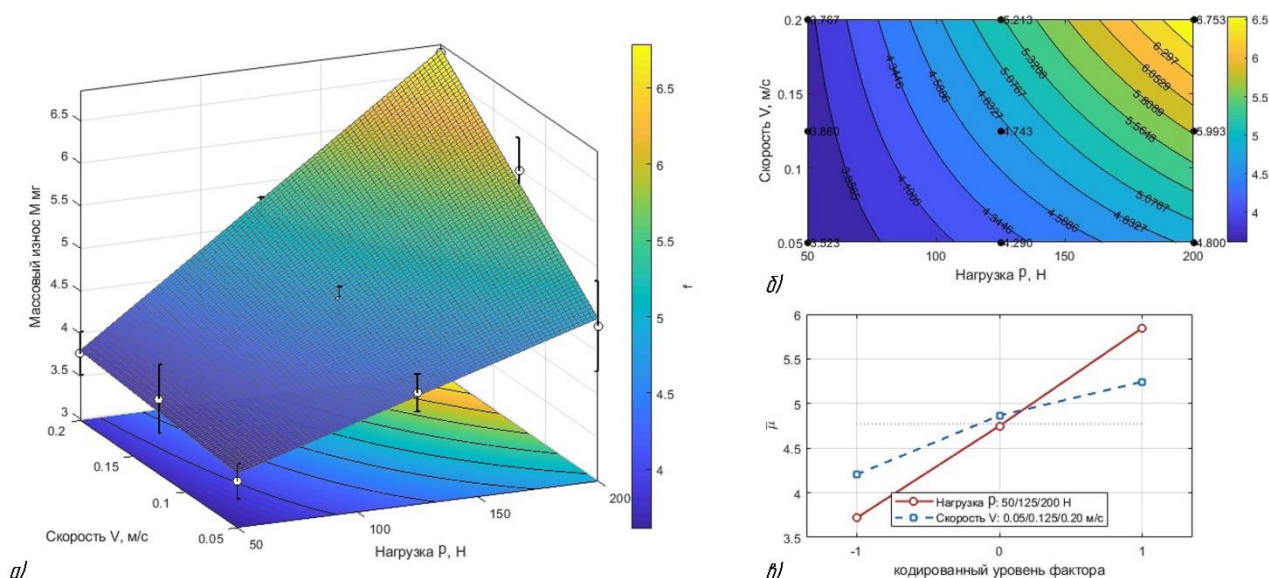


Рисунок 7 – Изменение величины массового износа M от нагрузки и скорости:
 а – поверхность отклика; б – проекция поверхности отклика на плоскость факторов; в – средние значения отклика для различных значений уровней фактора

При увеличении нагрузки от 50 до 200 Н массовый износ возрастал с 3,53–3,87 до 4,80–6,77 мг в зависимости от скорости скольжения. Коэффициент трения в исследуемом диапазоне изменения факторов изменялся в пределах 0,20–0,32 и адекватно описывался квадратичным полиномом (см. рисунок 6).

Цифровой анализ изображений контактной поверхности по завершению трибологического испытания представлен на рисунке 8 для композиционного материала № 142, $P = 200$ Н, $V = 0,2$ м/с, $L = 720$ м.

Экстраполяция полученных результатов на номинальную площадь контакта образца по завершению трибологического эксперимента позволила рассчитать среднее давление – 3,1 МПа, что соответствовало нормальной нагрузке 200 Н. Оценка площади фактического контакта при прочих равных до трибологического испытания установило среднее давление 45,1 МПа.

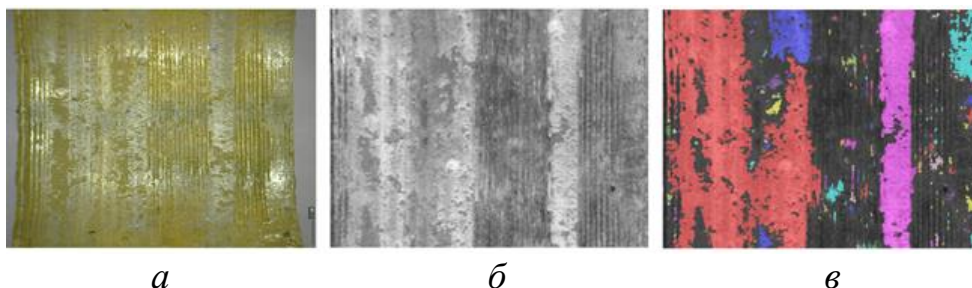


Рисунок 8 – Фрагмент контактной поверхности композита после трибологического испытания:

a – исходная контактная поверхность (микрофотография);

б – контактная поверхность после цветовой коррекции;

в – фактическая область контакта

Отметим, что влияние скорости скольжения на коэффициент трения и массовый износ может быть связан и с вязкоупругими свойствами композита, кроме того, разрушение образцов № 109–112 в результате трибологического эксперимента не объясняет качественный индикатор износостойкости H^3/Er^2 .

В четвертой главе разработан подход к определению вязкоупругих свойств композитов по кривым внедрения индентора при постоянной нагрузке. В основу положено аналитическое решение контактной задачи о внедрении жесткой сферы в упругую среду. В рамках принципа соответствия приведенный модуль упругости в классических Герцевских соотношениях между нормальным контактным давлением, глубиной вдавливания и радиусом контактной области заменяется на соответствующий вязкоупругий оператор. Рассматривается изотропная форма вязкоупругих соотношений между деформациями и напряжениями. Вязкоупругая среда описывалась двухзвенной обобщенной моделью Кельвина, при этом функция ползучести $J(t) = C_0 + \sum_{i=1}^M C_i (1 - e^{-t/\tau_i^\epsilon})$,

где C_0 соответствует мгновенной упругой реакции материала при мгновенно приложенной нагрузке, которая после остается постоянной, параметры C_i, τ_i^ϵ , $i = 1, 2$ описывают зависящие от времени реакции материала на приложенное напряжение.

Полученное решение (3) описывает процесс внедрения индентора с монотонно возрастающей со временем площадью контакта, поскольку в этом случае не происходит смена граничных условий, $u(t)$ – перемещение вязкоупругого полупространства в проекции центра штампа.

$$u^{3/2} = \begin{cases} \frac{3(1-\nu)P_{\max}}{8\sqrt{R}} \left[\frac{C_0 t}{t^*} - \frac{C_1 \tau_1^\epsilon}{t^*} (1 - e^{-t/\tau_1^\epsilon}) - \frac{C_2 \tau_2^\epsilon}{t^*} (1 - e^{-t/\tau_2^\epsilon}) \right], & 0 < t < t^*, \\ \frac{3(1-\nu)P_{\max}}{8\sqrt{R}} \left[C_0 - \frac{C_1 \tau_1^\epsilon}{t^*} e^{-t/\tau_1^\epsilon} (e^{t^*/\tau_1^\epsilon} - 1) - \frac{C_2 \tau_2^\epsilon}{t^*} e^{-t/\tau_2^\epsilon} (e^{t^*/\tau_2^\epsilon} - 1) \right], & t \geq t^*, \end{cases} \quad (3)$$

где t^* – время этапа нагружения индентора. На основании соотношения (3) производилась идентификация параметров модели $C_0, C_i, \tau_i^\varepsilon$ $i = \overline{1, M}$ для случая $M = 1$ (стандартное вязкоупругое тело), $M = 2$. В качестве входных данных использовалась зависимость $u(t)$ на этапе выдержки индентора при постоянной нагрузке, полученная в рамках индентирования по протоколу II. Наибольший интерес представляло изменение твердости композита от времени действия постоянной нагрузки (рисунок 9). Для ненаполненной ЭД-20 снижение твердости за исследованный интервал составило 12 %, для состава с 1 мас. % MgO – 10 %. Композит № 142 (1 мас. % MgO и 1 мас. % A237) сохранял более стабильный механический отклик (снижение твердости – 3 %), что согласуется с его поведением при продолжительном фрикционном нагружении.

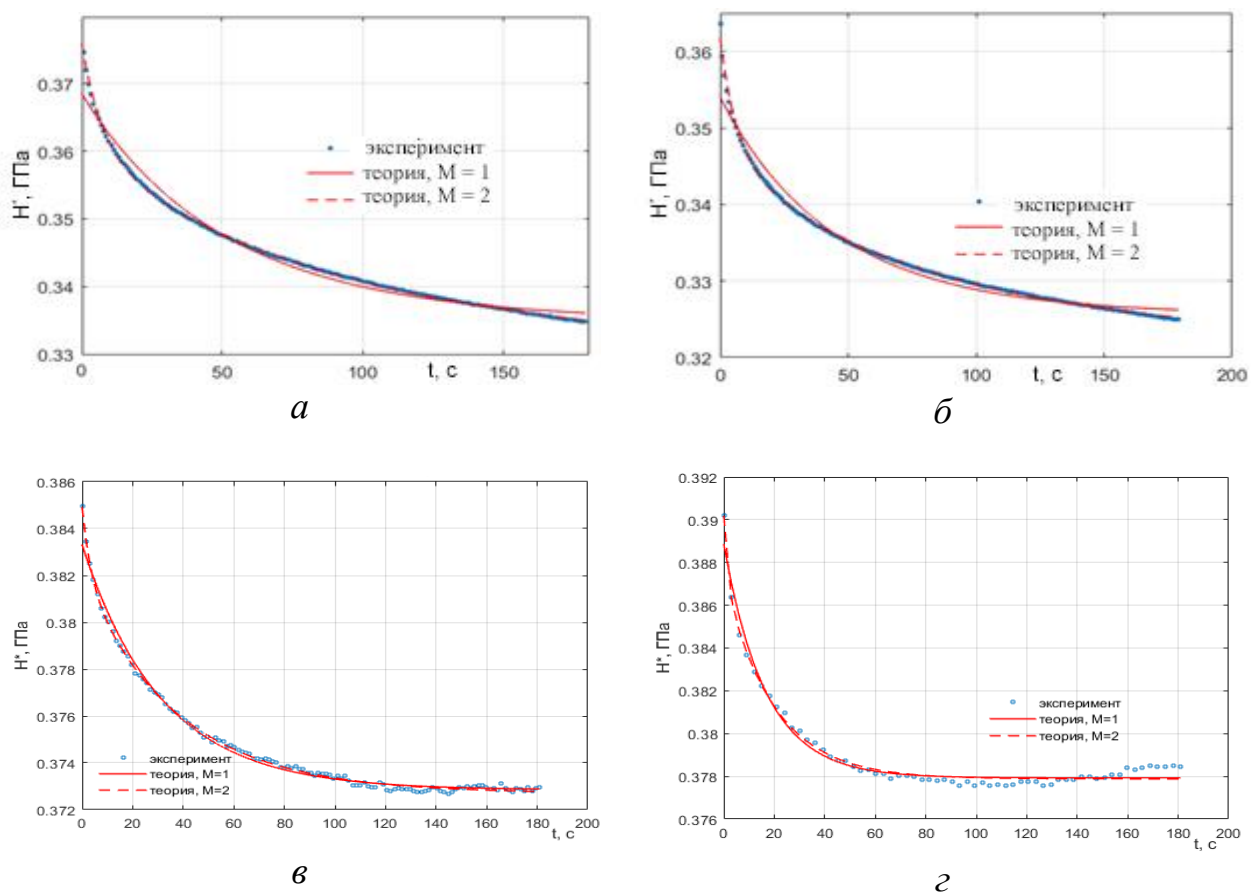


Рисунок 9 – Влияние времени выдержки индентора при постоянной нагрузке на твердость $H^*(t)$ для образцов: а – ЭД-20; б – ЭД-20 + 1 % MgO; в – ЭД-20 + 1 % MgO + 1 % A237; з – ЭД-20 + 1 % MgO + 1 % A237 + 0,5 % Fe

Наибольшее влияние на $H^*(t)$ среди всех представленных в работе материалов оказывали частицы B_4C (1 и 3 мас. %) и В (5 мас. %). Для этих образцов было зафиксировано значительное уменьшение твердости $\frac{H^*(0) - H^*(180)}{H^*(180)} \cdot 100\%$ за рассмотренный интервал выдержки (от 15 до 22 %),

что соответствовало наблюдаемому разрушению этих образцов в процессе трибологического эксперимента.

В пятой главе приведены результаты промышленной проверки материала ЭД-20 + 1 мас. % MgO + 1 мас. % A237 (№ 142). Изготовлены накладки направляющих горизонтально-расточного станка 2А620 (рисунок 10), испытанные в ООО «РостИнТех» в течение шести месяцев. Условия эксплуатации включали переменные нагрузки, вибрации, температурные колебания, загрязнение контакта продуктами изнашивания и нестабильное смазывание, то есть отличались от контролируемого лабораторного режима.

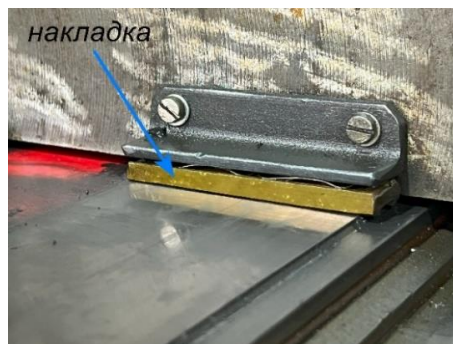


Рисунок 10 – Фотографии направляющих и расположения композиционных накладок

После испытаний поверхности накладок сохранили целостность. Рабочие поверхности испытуемого образца имеют равномерный матовый блеск, риски и следы приработки расположены в направлении рабочего перемещения, выраженных участков задиров, интенсивного изнашивания, сколов и выраженной деградации полимерной матрицы не выявлено.

Износ опорных поверхностей направляющих снизился на 11–15 % по сравнению со штатным материалом при сопоставимых условиях. Технический акт с результатами промышленных испытаний представлен в приложении А к диссертации. Различие между снижением интенсивности изнашивания в лабораторном опыте и результатом промышленной проверки объясняется масштабом контакта, переменностью нагружения, вибрациями, температурными колебаниями и абразивными загрязнениями. Полученные данные подтверждают применимость выбранного состава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработан метод синтеза полиэфирных микрокапсул (5–30 мкм), содержащих различные смазочные материалы (индустриальное масло И-40, подсолнечное масло, диоктилсебагинат) и технология получения эпоксидных композитов на основе ЭД-20 с введением дисперсных наполнителей (В, В₄С, SiC, MgO; размер частиц 20–60 мкм) и микрокапсул со смазочными материалами, включающая операции ультразвуковой обработки, дегазации и магнитной ориентации ферромагнитных микрокапсул.

2. На основе комплексных исследований, многопараметрической оптимизации и частных критериев установлен оптимальный состав полимерного композиционного материала на основе эпоксидной смолы ЭД-20, отверждаемого при комнатной температуре, содержащего 1 масс. % MgO и 1 масс. % микрокапсул А237 (со смазочным материалом И-40), повышающий триботехнические свойства металлополимерного трибосопряжения:

– показано, что модификация матрицы 1 % масс. MgO и 1 % масс. микрокапсул А 237 приводит к увеличению твердости композита относительно ненаполненной ЭД-20 на 10,4 %, снижение твердости при постоянной нагрузке с течением времени для вязкоупругого композиционного материала, составило 3 %, для базовой матрицы – 12 %, что обеспечивало стабильность трибологических свойств при длительном фрикционном нагружении;

– результаты фрикционных испытаний полученного композита позволили установить основные закономерности влияния нагрузочно-скоростных режимов на величину массового износа и коэффициента трения: снижение коэффициента трения на 42,5 % (до 0,23) и интенсивности изнашивания в 5,4 раза.

3. Выявлен механизм формирования вторичных поверхностных структур в металлополимерном трибосопряжении с использованием методов ИК Фурье-спектроскопии с НПВО и СЭМ/ЭДС, показано, что формируемые вторичные структуры включают продукты износа эпоксидной матрицы, смазочный материал и частицы MgO, совместное действие которых способствует формированию граничного смазочного трибослоя и снижению коэффициента трения и интенсивности изнашивания композита.

4. Установлено, что введение микрокапсул со смазкой и MgO приводит к снижению амплитуды и стабилизации трибоЭДС во времени, а также выявлена связь изменений трибоЭДС и тока электризации с этапами формирования и разрушения вторичных структур, что позволяет использовать трибоЭДС в качестве диагностического параметра для оценки состояния граничного смазочного слоя.

5. Проведены шестимесячные промышленные испытания композиционного материала ЭД-20 + 1 масс. % MgO + 1 масс. % микрокапсул А237 в качестве материала накладок направляющих горизонтально-расточного станка 2А620. Установлено, что применение разработанных накладок обеспечило снижение износа опорных поверхностей направляющих на 11–15 % по сравнению со штатным материалом при сопоставимых условиях эксплуатации.

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме данной работы

Для изготовления накладок направляющих станков класса 2А620 рекомендуется применять композиционный материал ЭД-20 + 1 мас. % MgO + 1 мас. % микрокапсул А237. Дальнейшие исследования целесообразно направить на испытания композитов при высоких температурах и в агрессивных средах, оптимизацию состава микрокапсул и наполнителей, а также разработку методов непрерывного трибоэлектрического мониторинга состояния металлополимерных трибосопряжений.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК РФ:

1. **Ананко, А. М.** Повышение износостойкости эпоксидных композитов введением микрокапсулированных смазочных материалов и частиц оксида магния / А. М. Ананко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 1 (101). – С. 151–160. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_1_151.

2. **Ананко, А. М.** Трибологические свойства полимерных композитов, модифицированных гибридным наполнителем / А. М. Ананко // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2026. – № 3 (103). – С. 8–15. – DOI 10.46973/0201-727X_2026_3_8.

3. Применение маслonaполненных микрокапсул для улучшения трибологических характеристик эпоксидных композитов / П. Г. Иваночкин, О. А. Беляк, А. А. Бичеров, **А. М. Ананко** // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2023. – № 4 (92). – С. 8–15. – DOI 10.46973/0201-727X_2023_4_8.

4. Локальная упругая энергия в полимерных композитах, модифицированных микрокапсулами со смазочным материалом и наночастицами магнетита / В. И. Колесников, В. В. Бардушкин, И. В. Лавров, А. П. Сычев, В. Б. Яковлев, **А. М. Ананко** // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2023. – № 10. – С. 451–457. – DOI 10.36652/0202-3350-2023-24-10-451-457.

5. Локальные упругие характеристики полимерных композиций, модифицированных микрокапсулами со смазочным материалом и наночастицами магнетита / В. И. Колесников, В. В. Бардушкин, И. В. Лавров, А. П. Сычев, В. Б. Яковлев, **А. М. Ананко** // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2023. – № 8. – С. 361–368. – DOI 10.36652/0202-3350-2023-24-8-361-368.

6. Моделирование предельных прочностных показателей полимерных композиций, модифицированных микрокапсулами со смазочным материалом и наночастицами магнетита / В. И. Колесников, В. В. Бардушкин, И. В. Лавров, А. П. Сычев, В. Б. Яковлев, **А. М. Ананко** // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. – 2023. – Т. 20, № 3. – С. 57–65. – DOI 10.31429/vestnik-20-3-57-65.

*Публикации в изданиях, индексируемых в базах данных
Scopus и/или Web of Science*

7. Identification of viscoelastic properties of epoxy composites with magnesium oxide and boron carbide additives / O. A. Belyak, T. V. Suvorova, D. S. Manturov, **A. M. Ananko** // Mechanics of Composite Materials. – 2025. – Vol. 61, No. 2. – P. 257–268. – DOI 10.1007/s11029-025-10274-x.

8. Operational elastic characteristics of polymer composites modified with microcapsules containing lubricant and magnetite nanoparticles / V. I. Kolesnikov, V. V. Bardushkin, I. V. Kolesnikov, A. P. Sychev, **A. M. Ananko** // Russian

Engineering Research. – 2023. – Vol. 43, No. 11. – P. 1416–1420. – DOI 10.3103/S1068798X23110175.

9. Investigation of the relationship between electrification and tribochemical reactions in metal–polymer systems / M. V. Boiko, V. V. Avilov, A. A. Bichеров, **A. M. Ananko**, T. G. Boiko // Journal of Friction and Wear. – 2022. – Vol. 43, No. 3. – P. 197–202. – DOI: 10.3103/S1068366622030035.

Патенты Российской Федерации на изобретение

10. Патент RU 2841228 C2. Способ получения микрокапсул с биоразлагаемым смазочным материалом и частицами ферромагнетика / Колесников В. И., Сычев А. П., Колесников И. В., Беляк О. А., Бичеров А. А., **Ананко А. М.**, Мантуров Д. С., Новиков Е. С. – Заявл. 24.11.2023 ; опубл. 04.06.2025.

Публикации в иных научных изданиях и сборниках

11. Повышение износостойкости эпоксидно-диановых композитов армированием ультрадисперсными частицами оксидов-гидроксидов переходных металлов / М. В. Бойко, А. А. Бичеров, **A. М. Ананко**, Т. Г. Бойко // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвузовский сборник научных трудов. – Тверь : ТвГТУ, 2022. – Вып. 15. – С. 59–65.

12. Структура и свойства композиционных материалов, модифицированных частицами оксида магния и карбида бора / О. А. Беляк, **A. М. Ананко**, А. Д. Захаров, К. А. Лещев // Полимерные композиты и трибология (ПОЛИКОМТРИБ-2025) : тезисы докладов Международной научно-технической конференции. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2025.

13. Влияние добавок-модификаторов Al_2O_3 на вязкоупругие и трибологические свойства полимерного композиционного материала / М. М. Четверик, К. Н. Политыко, **A. М. Ананко**, Н. А. Черпаков // Материалы школы молодых ученых. – Ростов-на-Дону : РГУПС, 2025.

14. Влияние концентрации наполнителя на механические и трибологические свойства композиционного полимерного материала / В. И. Колесников, Д. С. Мантуров, К. И. Карпенко, **A. М. Ананко** // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 4 (53). – С. 56–60.

Личный вклад соискателя. Основные положения и результаты исследований получены автором самостоятельно. Личный вклад автора в работах, опубликованных в соавторстве, заключается в следующем: работа [1] – постановка задач исследования, планирование экспериментальных исследований, разработка состава и технологии получения эпоксидных композиционных материалов, модифицированных микрокапсулами со смазочным материалом и оксидом магния, изготовление экспериментальных образцов, проведение трибологических испытаний, исследование механических свойств и анализ механизма формирования вторичных структур, обработка, анализ и обобщение полученных результатов, подготовка рукописи статьи (единоличная работа).

Работа [2] – планирование и проведение трибологических испытаний, статистическая обработка результатов, построение регрессионных моделей коэффициента трения и массового износа, подготовка рукописи статьи (единоличная работа). Работа [7] – создание эпоксидных композитов, проведение эксперимента по индентированию, численный эксперимент по идентификации вязкоупругих характеристик композитов по результатам индентирования, обработка, анализ и интерпретация результатов. Работа [4–6, 8] – обзор и обоснование актуальности исследований, разработка составов композиционных материалов, изготовление образцов, проведение экспериментальных исследований механических свойств, обработка, анализ и интерпретация результатов экспериментов. Работа [3] – разработка методики введения маслонаполненных микрокапсул в эпоксидную матрицу, изготовление композиционных материалов, проведение комплекса трибологических исследований, исследование поверхностей трения методами РЭМ/ЭДС и ИК Фурье-спектроскопии с НПВО, обработка, анализ и интерпретация полученных результатов. Работа [9] – обоснование актуальности темы, разработка методики исследования взаимосвязи между электризацией и трибохимическими реакциями в металлополимерных системах, проведение экспериментов, обработка и анализ результатов. Работа [10] – разработка способа получения микрокапсул с биоразлагаемым смазочным материалом и частицами ферромагнетика, формулирование технических решений, разработка технологии изготовления микрокапсул, участие в подготовке заявки на изобретение и материалов патентования. Работы [11–14] – создание эпоксидных композитов, проведение экспериментов по индентированию, трибологических испытаний, обработка и анализ результатов.

Ананко Анатолий Михайлович

**ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ,
МОДИФИЦИРОВАННЫХ МИКРОКАПСУЛАМИ
СО СМАЗОЧНЫМ МАТЕРИАЛОМ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 20.10.2026. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,39.
Тираж 100 экз. Заказ № _____.

Редакционно-издательский центр ФГБОУ ВО РГУПС.

Адрес университета: 344038, Ростовская область, г. о. город Ростов-на-Дону,
г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка
Народного Ополчения, зд. 2, www.rgups.ru