

На правах рукописи



Азоян Анаид Иосиповна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА
ПУТЕМ ЕГО МОДИФИКАЦИИ**

Специальность 2.5.3. Трение и износ в машинах

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ростов-на-Дону

2024

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

Научный руководитель: **Иваночкин Павел Григорьевич,**
доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая механика» ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»

Официальные оппоненты: **Елагина Оксана Юрьевна,**
доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Трибология и технология ремонта нефтегазового оборудования» ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина», г. Москва

Бурлакова Виктория Эдуардовна,
доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Химия» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», г. Ростов-на-Дону

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Российский государственный политехнический университет имени М. И. Платова», г. Новочеркасск

Защита состоится «12» марта 2025 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 44.2.005.01 на базе ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС) по адресу: 344038, Ростовская область, городской округ город Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2 (главный корпус, читальный зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО РГУПС по адресу: 344038, Ростовская область, городской округ город Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2 и на сайте <http://www.rgups.ru>.

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 44.2.005.01
доктор технических наук, профессор



П. Н. Щербак

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 определяются возникновением надмолекулярных структур, которые характеризуют процесс 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 В. И. Бутенко, Г. А. Гороховского, Г. В. Козлова, В. А. Кохановского, Ю. К. Машкова, 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, D. C. Evans, G. Fuks-Rabinovich, В. Klamecki, K. Krawczyk, J. K. Lancaster, M. Nosonovsky, A. Sugibuchi 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 В. Klamecki, M. Nosonovsky, Л. И. Бершадский, Н. А. Буше, Д. Н. Гаркунов, Б. И. Костецкий, И. В. Крагельский 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 наноуровень. 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 состояния 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 состояний 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 монмельница 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, индентирования, 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, отмечены основные направления ее развития в мировой науке. Сформулированы общая цель и задачи работы, обозначены объект и предмет исследования, приведена научная новизна, показана теоретическая и практическая ценность, достоверность результатов научных исследований.

В первой главе представлен аналитический обзор работ российских и зарубежных ученых в области применения композиционных материалов, устанавливающих закономерности физико-механических процессов в узле трения. Наиболее активные исследования в данном направлении ведутся в Китае, США, Японии, России и Белоруссии. Анализ изученного материала показал актуальность и перспективность выбранной темы диссертационной работы, позволил определить дальнейшие научные направления и сформулировать общую цель исследований.

Вторая глава посвящена разработке расчетной модели контактной задачи и определению напряженно-деформированного и теплового состояний узла трения. 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.

Так как исследуемый материал предполагается использовать для восстановления накладок горизонтально-расточного станка, то с механической точки зрения силовое взаимодействие в рассматриваемом узле трения обратимо. Поэтому в качестве математической модели рассматривается контактная задача теории упругости о действии жесткого штампа на изотропный упругий двойной слой (рис. 1).

Штамп прижимается вертикальной силой P и движется в направлении перпендикулярном плоскости чертежа с постоянной скоростью V . Зона штампа и полосы ограничена $|x| \leq a$. Толщина слоя мала по сравнению с размером зоны контакта ($h \ll 2a$, $h = h_1 + h_2$). Нижний слой полосы представляет собой тонкий слой нанесенного на подложку адгезива для обеспечения сцепления между осно-

ванием и верхним слоем. Верхний слой – покрытие из рассматриваемого модифицированного полимерного композита. Рассматривается установившийся квазистационарный режим:

$$\int_{-a}^a q(x)dx = P, \quad (1)$$

где $q(x)$ – контактное давление.

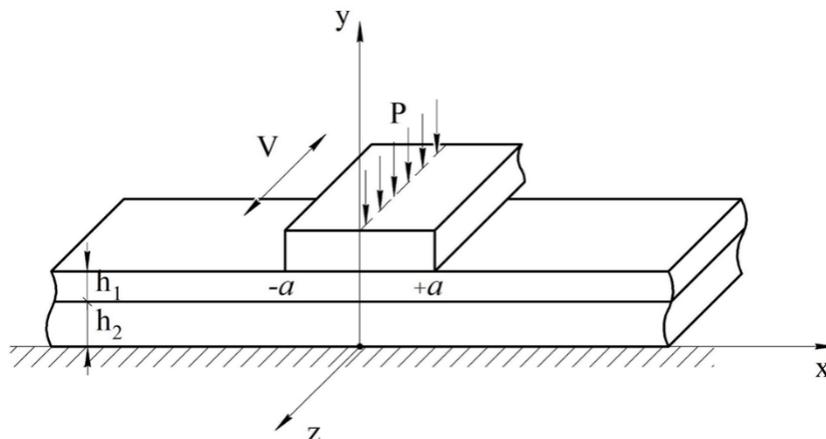


Рис. 1. Контактное взаимодействие жесткого штампа и изотропного упругого двойного слоя

В зоне контакта возникают силы трения $\tau_{yz}(x)$, часть работы которых ($A_f = \eta_1 A$) идет на образование тепловых потоков ($Q_l(x), Q_u(x)$), 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:

$$\tau_{yz}(x) = f \cdot q(x), \quad (2)$$

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

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

$$\begin{aligned} (\lambda_i + \mu_i) \frac{\partial \theta_i}{\partial x_i} + \mu_i \Delta U_i - k_i \alpha_{Ti} \frac{\partial T_i}{\partial x_i} &= 0, \\ (\lambda_i + \mu_i) \frac{\partial \theta_i}{\partial y_i} + \mu_i \Delta V_i - k_i \alpha_{Ti} \frac{\partial T_i}{\partial y_i} &= 0, \\ \frac{\partial^2 T_i}{\partial x_i^2} + \frac{\partial^2 T_i}{\partial y_i^2} &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

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.

Граничные условия рассматриваемой задачи:

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

$$U_2 = V_2 = 0, \quad \lambda_2 \cdot \frac{\partial T_2}{\partial y_2} + \alpha_{T_2} (T_2 - T_{2*}) = 0. \quad (4)$$

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

$$U_1 = U_2, \quad V_1 = V_2, \quad \tau_{yz}^1 = \tau_{yz}^2, \quad \sigma_y^1 = \sigma_y^2, \quad T_1 = T_2, \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial y_1} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial y_2}. \quad (5)$$

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

$$V_1 = -\delta, \quad \tau_{xz}^1 = 0, \quad \frac{\partial T_1}{\partial y_1} = -\eta_1 \cdot Q_1(x), \quad (6)$$

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

$$\tau_{yz}^1 = \sigma_y^1 = 0, \quad \lambda_1 \cdot \frac{\partial T_1}{\partial y_1} + \alpha_{T_1} (T_1 - T_{1*}) = 0. \quad (7)$$

В силу предположения о малости толщины полосы построено вырожденное решение контактной задачи.

Двухслойное основание в рамках рассмотренной модели ведет себя как основание Фусса – Винклера с добавлением температурных членов. Окончательное выражение, связывающее упругие перемещения под металлическим контролем с нанесенным упругим двухслойным покрытием с контактным давлением, может быть представлено в виде:

$$V_1(x, y) = - \left[\frac{\lambda_1}{\alpha_2} (\gamma_1 + \gamma_2) + \frac{\alpha_2}{\lambda_2} (\gamma_1 h_1 \lambda_2 - \gamma_2 h_2 \lambda_1) \right] \eta_1 q(x) + \left[\frac{h_1 (1 - 2\nu_1)}{2\lambda_1 (1 - \nu_1)} + \frac{h_2 (1 - 2\nu_2)}{2\lambda_2 (1 + \nu_2)} \right] q(x) - \Phi(x) (\gamma_1 + \gamma_2), \quad (8)$$

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

$$\gamma_i = \frac{1 + \nu_i}{1 - \nu_i} \cdot \alpha_{T_i} h_i.$$

Так как упругие перемещения зависят от осадки штампа, то распределение контактного давления легко вычисляется.

Численное решение контактной задачи осуществлено на основе программы, написанной на макроязыке APDL ANSYS, результаты расчета которой представлены в главе 5.

В третьей главе описана методика выполненных исследований, приведена их структурная схема (рис. 2), а также дана характеристика применяемого оборудования и инструментов.



Рис. 2. Структурная схема исследований

Раздел экспериментальных исследований состоит из двух блоков. В первой части описан синтез композиционных материалов на основе эпоксидной смолы. Наполнители подвергались диспергированию с последующей седиментацией для определения размеров измельченных частиц. Для равномерного распределения добавок в полимерной матрице и процесса полимеризации композита использовалось специальное лабораторное оборудование. Второй этап посвящен оценке влияния эксплуатационных режимов модифицированного композиционного материала на триботехнические характеристики (коэффициент трения, температура трибоконтакта, интенсивность изнашивания и т. д.).

В четвертой главе представлены основные результаты исследований свойств композиционного материала на основе эпоксидной смолы.

На первом этапе определялась концентрация армирующих и антифрикционных наполнителей. Для этого 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 пределах: 0, 3, 6, 9, 12 и 15 % (табл. 1).

Таблица 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

При концентрации наполнителя свыше 6 % среднее значение твердости снижается, а среднеквадратическое отклонение и дисперсия повышаются при увеличении массовой доли шпинели металлов, что говорит о неоднородности структуры полученного композиционного материала.

Для оценки влияния концентрации антифрикционных добавок и нагрузочных режимов на процессы трения был использован статистический метод планирования эксперимента 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). Вращательное движение диска осуществлялось с линейной скоростью 0,1 м/с, усилие на штифте было выбрано 0,5, 1,0, 1,5 Н, а продолжительность испытания составила 250 м. Интервалы варьирования наполнителей равны 3, а усилия на инденторе – 0,5.

Согласно плану эксперимента, было проведено девять опытов, каждый из которых проводился трижды в случайном порядке для уменьшения погрешностей. Были получены уравнения регрессии:

1. Для образцов, содержащих различную концентрацию добавки шпинели:

$$\hat{Y}(\mu) = 0,65 + 0,05 \cdot X_3 + 0,08 \cdot X_1^2. \quad (9)$$

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

$$\hat{Y}(\mu) = 0,21 - 0,04 \cdot X_2 - 0,01 \cdot X_3 - 0,01 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,03 \cdot X_2^2. \quad (10)$$

Из анализа полиномов следует, что коэффициент трения зависит как от концентрации добавок, так и от нагрузки, причем кроме линейных эффектов факторов воздействия имеются квадратичные.

На основании полученных графиков регрессионной модели было установлено, что при увеличении нагрузки наименьшим значением коэффициента трения обладает образец с концентрацией наполнителей 6 % (рис. 3).

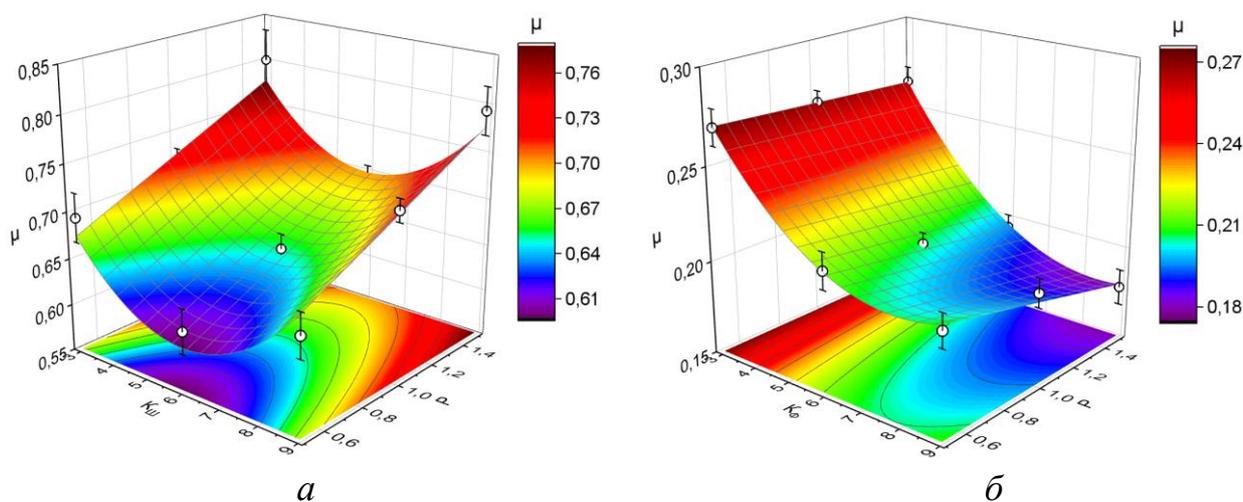


Рис. 3. Изменение коэффициента трения μ от нагрузки и концентрации добавки:
 а – для образцов, содержащих различную концентрацию добавки шпинели,
 б – для образцов, содержащих 6 % шпинели и различную концентрацию добавки фторопласта

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.

В результате трибологических испытаний установлено, что при контактном давлении 58,8...70,5 МПа применение 6 % шпинели металлов и 6 % фторопласта снижает коэффициент трения на 16,7 % (рис. 4, а), а при 74,1...88,8 МПа – на 28,6 % по сравнению с немодифицированным полимером (рис. 4, б).

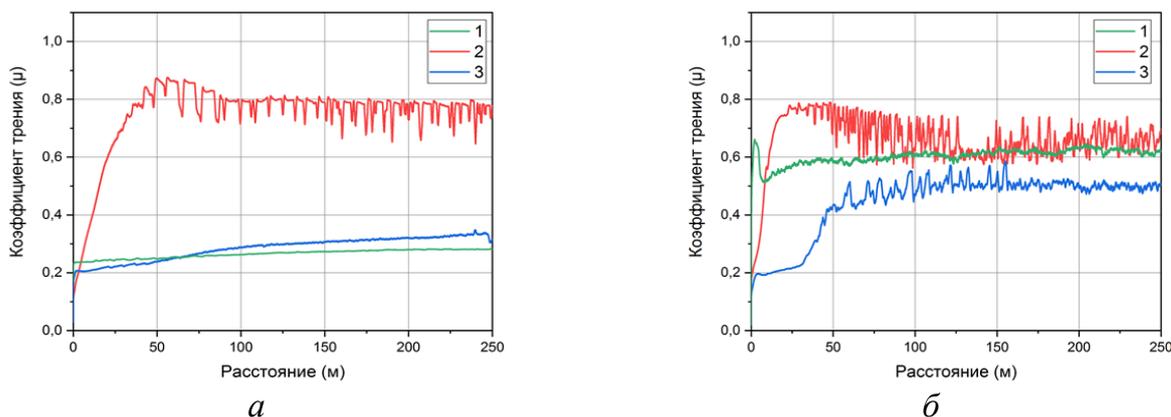


Рис. 4. Изменение коэффициента трения в процессе испытаний при нагрузке 0,5 Н (а) и 1 Н (б):
 кривая 1 – смола ЭД-20; кривая 2 – ЭД-20 + 6 % шпинели;
 кривая 3 – ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ

Для анализа физико-механических характеристик композита был использован метод инструментального индентирования с треугольным режимом нагружения. Диаграмма «нагрузка – глубина погружения» свидетельствует о том, что применение наполнителей способствует уменьшению рассматриваемых площадей за счет формирования областей с хорошей межфазной адгезией, что в результате улучшает механические свойства получаемых композиционных материалов и способствует снижению релаксационных процессов (рис. 5).

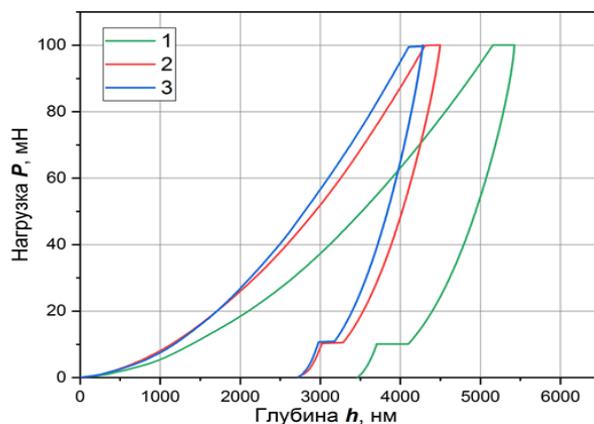


Рис. 5. Диаграммы «нагрузка – глубина погружения», полученные методом нормального индентирования:
 кривая 1 – смола ЭД-20; кривая 2 – ЭД-20 + 6 % шпинели;
 кривая 3 – ЭД-20 + 6 % шпинель + 6 % ПТФЭ

Степень ползучести материалов была определена трапецеидальным режимом нагружения при постоянной нагрузке $P = 200$ мН и скорости нагружения $V = 10$ мН/с. Время нагрузки и разгрузки всегда составляло 20 с. Значения времени выдержки задано t_B : 5, 30, 60, 90 и 120 с. Погружение индентора в исследуемый материал происходило линейно.

Аппроксимированные кривые микротвердости и приведенного модуля упругости показывают, что добавление шпинели металлов и фторопласта в полимерную матрицу приводит к уменьшению и стабилизации значений после выдержки материала $t_B = 90$ с. Это говорит о том, что вязкие свойства значительно уменьшаются и увеличиваются прочностные характеристики (рис. 6).

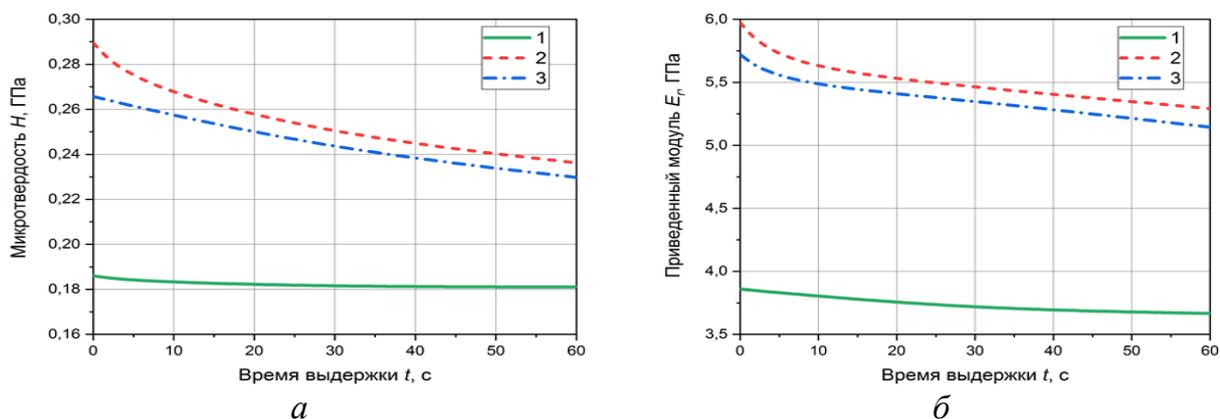


Рис. 6. Изменение микротвердости (а) и приведенного модуля упругости (б) в зависимости от времени выдержки: кривая 1 – смола ЭД-20; кривая 2 – ЭД-20 + 6 % шпинели; кривая 3 – ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ

Для оценки вязкоупругих свойств использовалось относительное изменение глубины индентирования S_{IT} под воздействием постоянной нагрузки с увеличением времени выдержки t_B .

Из аппроксимированных кривых видно, что при добавлении шпинели металлов и ПТФЭ в полимерную основу относительное изменение глубины индентирования варьируется незначительно (в пределах 4 %), что говорит о формировании прочной сетчатой надмолекулярной структуры (рис. 7).

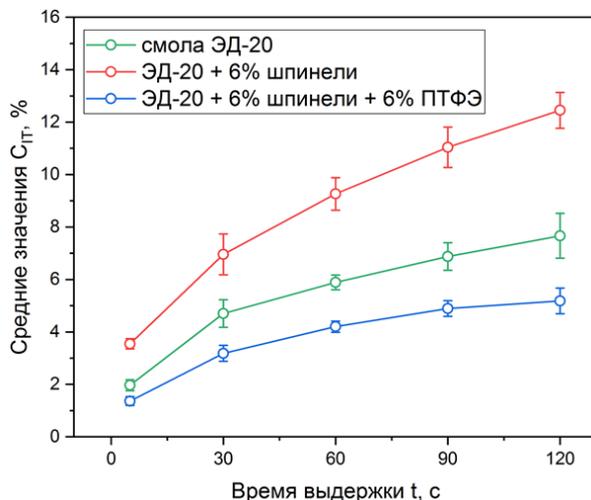


Рис. 7. Средние значения S_{IT} при разном времени выдержки t_B

Установившееся значение C_{IT} при увеличении времени выдержки свидетельствует о релаксационной твердости.

Анализ ИК-спектров модифицированного полимерного материала (ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ) показал формирование валентной группы C–F в диапазоне волновых чисел 1150–1250 см^{-1} , а также регистрацию полос C–O–C эпоксидной группы от 600 до 1500 см^{-1} (рис. 8).

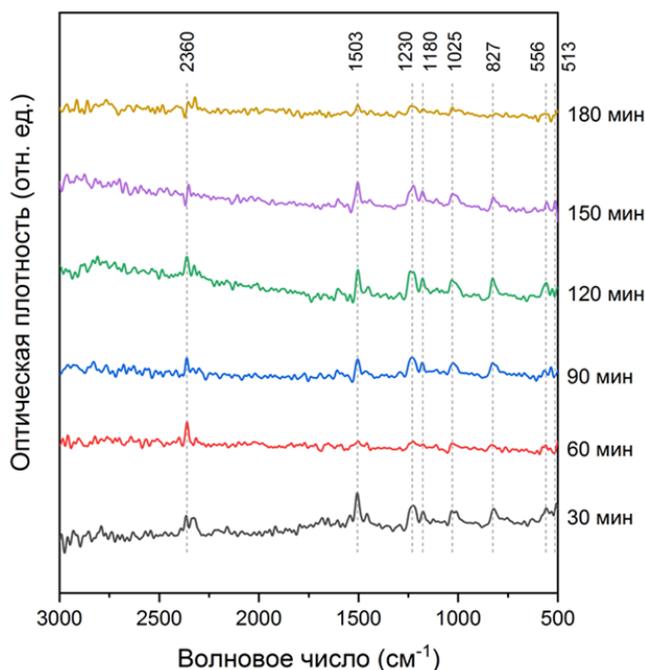


Рис. 8. ИК-Фурье спектры вторичных структур с поверхности контртела

При дальнейшем контактном взаимодействии интенсивность полос снижается, а затем стабилизируется. Можно сделать вывод: при трении данного материала и металлического контртела процесс образования вторичных структур и их последующего удаления цикличен.

Результатом оценки морфологии поверхности и анализа элементного состава образованных вторичных структур является общий вид сформированного образования на поверхности дорожки трения, а также характерный электронный спектр и концентрация перенесенных химических элементов в зоне дорожки трения на контртело (рис. 9).

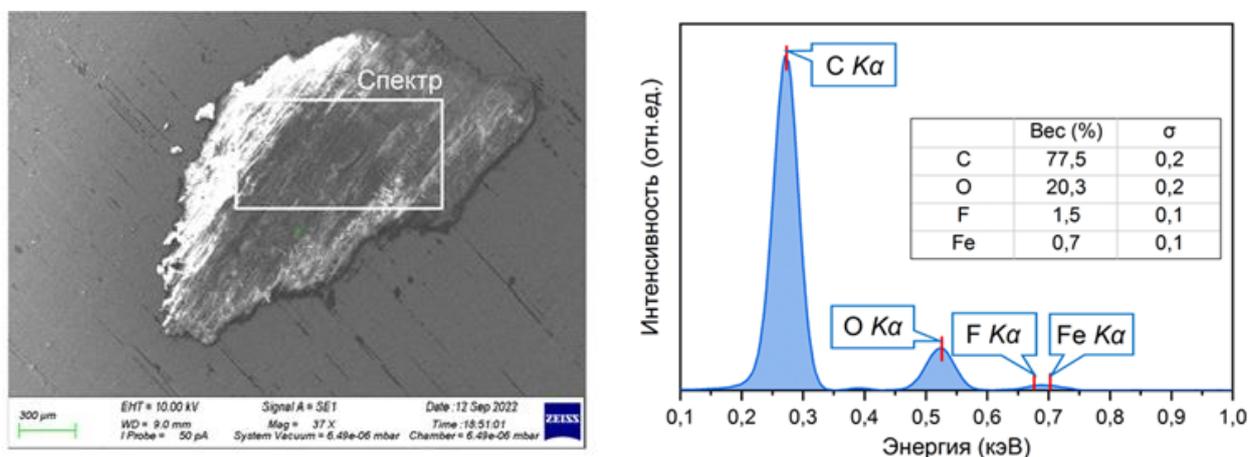


Рис. 9. Элементный состав вторичных структур в зоне дорожки трения

На спектре располагаются линии углерода с энергией 277 эВ, кислорода – 526 эВ, фтора – 677 эВ и железа (615, 703, 6404, 7058 эВ). Наличие в спектре фтора говорит о переносе ПТФЭ на подложку. При этом его весовое содержание составило 1,5 %. Таким образом, фрикционное взаимодействие рассматриваемого композиционного материала и стального контртела способствует формированию «островков» вторичных структур.

Для анализа процесса формирования вторичных структур применялся метод рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) на системе анализа SPECS. Регистрация спектра осуществлялась как в следе трения (спектр 1 на рис. 10), так и на границе «след трения – контртело» (спектр 2 на рис. 10).

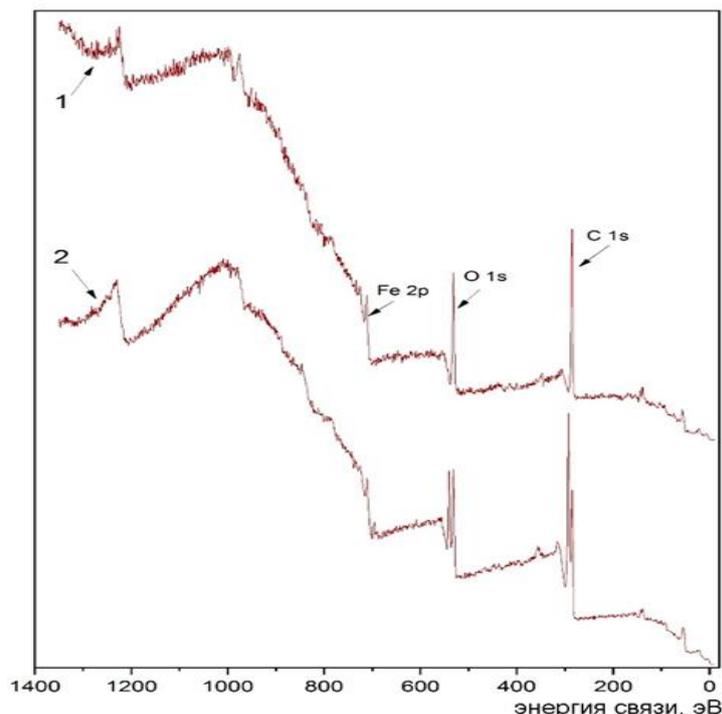


Рис. 10. Обзорные спектры РФЭС с поверхности «след трения» (1) и на границе «след трения – контртело» (2)

Наибольшей интенсивностью обладают линии кислорода (1 – 530 эВ, 2 – 532 эВ) и углерода (285 эВ). Содержание атомов углерода в продуктах фрикционного переноса говорит об углеводородных загрязнениях стали (1 – 67,4 ат. %, 2 – 74,5 ат. %), а наличие кислорода в следе трения – о взаимодействии с атомами железа (27,1 ат. %), на границе «след трения – контртело» он вступает в реакцию с водородом (22,2 ат. %). О наличии железа уровня 2p свидетельствует слабоинтенсивная «ступенька» в области энергий связи 710 эВ (1 – 5,5 ат. %, 2 – 3,3 ат. %).

Анализ химического состава продуктов фрикционного переноса по внутренним спектрам (C 1s, O 1s и Fe 2p) показал, что наложенные линии спектра 2 обладают меньшей интенсивностью, из чего следует вывод: съемка спектров осуществлялась из места, содержащего границу между материалом контртела и сформированными в процессе трения вторичными структурами (рис. 11).

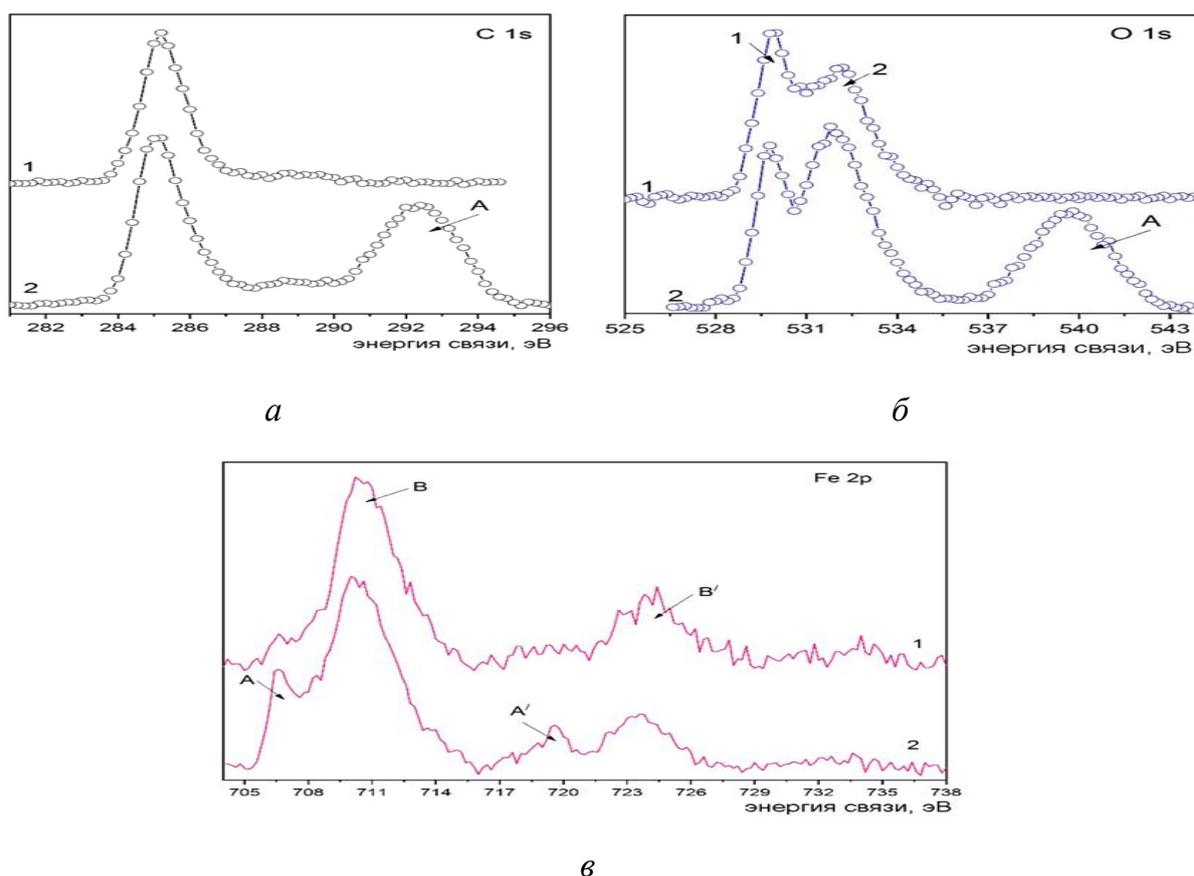


Рис. 11. Спектры РФЭС для линий C 1s, O 1s и Fe 2p с поверхности «след трения» (1) и на границе «след трения – контртелло» (2)

Исследование влияния наполнителя на термическую устойчивость композита проводилось по полученным термогравиметрическим кривым ТГ и дифференциальным термогравиметрическим кривым ДТГ на высокочувствительном дериватографе STA 449 F3 Jupiter.

На рис. 12 представлены результаты термического анализа композиционного полимерного материала ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ. Процесс термического разложения проходил в два эндотермических эффекта. Первая ступень разложения проходила 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 составила 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 %. Суммарная потеря массы за два эндотермических эффекта равна 63,28 %, что значительно меньше, чем для образцов ЭД-20 и ЭД-20 + 6 % шпинели. Обобщенные данные термического анализа для разных составов материала представлены в табл. 2.

На основании полученных данных термического анализа исследуемых образцов можно говорить о том, что добавление шпинели металлов и ПТФЭ в полимерную матрицу повышает устойчивость к термическому разложению.

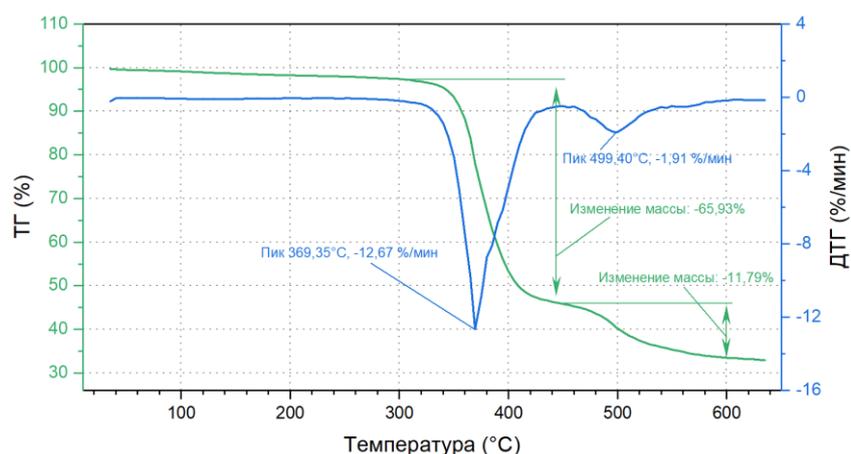


Рис. 12. Результаты термического анализа образца с сотавом: Смола ЭД-20 + 6 % шпинель + 6 % ПТФЭ

Таблица 2 – 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

Для определения влияния температуры на вязкоупругие свойства материала был выбран образец с наилучшими физико-механическими и термическими свойствами – ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ. Идентификация данных проводилась при температурах: 25, 60, 85 и 100 °С при времени выдержки t_B : 300, 900, 1800, 2700 и 3600 с (рис. 13).

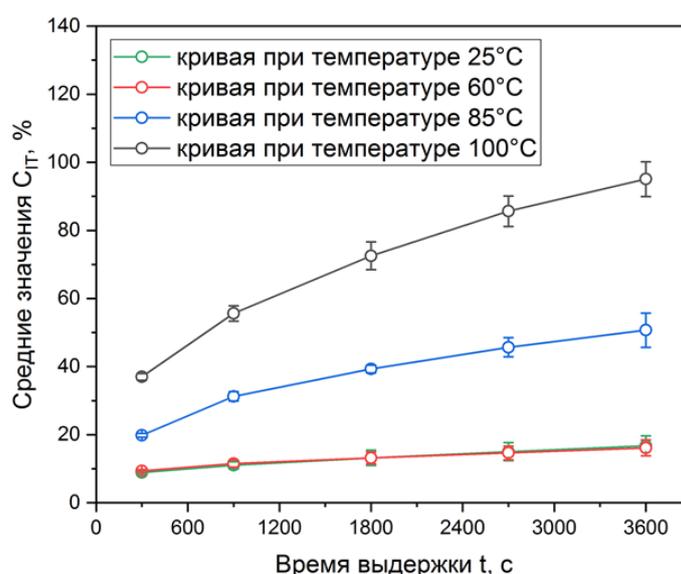


Рис. 13. Средние значения $S_{Г}$ для ЭД-20 + 6 % шпинели + 6 % ПТФЭ при разной температуре в зоне контакта

При температуре до 85 °С изменение глубины индентирования варьируется в пределах 8 %. 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.

В пятой главе представлены экспериментальные данные анализируемой трибологической системы в режиме трения скольжения, а также результаты промышленного тестирования разработанных материалов.

Анализ напряженно-деформированного и теплового состояний узла трения показал, что введение модификаторов в виде 6 % шпинели и 6 % ПТФЭ в полимерную матрицу способствует улучшению механических свойств и повышению устойчивости к термическому разложению (рис. 14).

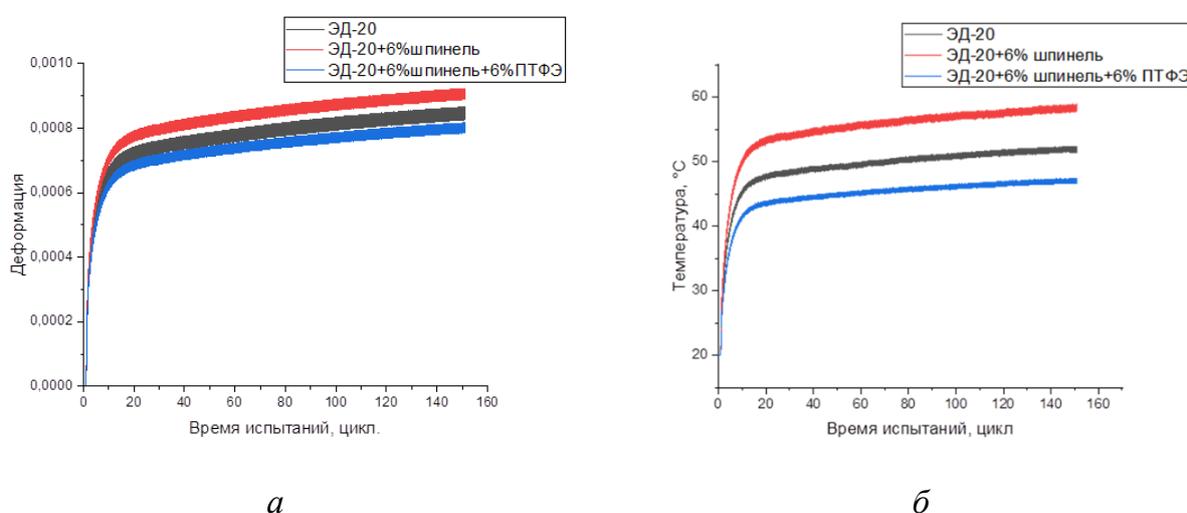


Рис. 14. Изменение деформации (а) и температуры (б) в течение 300 циклов по времени

Промышленные испытания накладок, обработанных композиционным покрытием, были осуществлены на предприятии ООО «РостИнТех». Установка накладок производилась в процессе осуществления регламентного технического ремонта станка типа 2А622. После полугодовой эксплуатации была проведена контрольная разборка накладок направляющих. В результате проверки состояния рабочей поверхности накладок 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.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

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

2. Установлен оптимальный 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 %.

Практические результаты работы включают проверку научных исследований по разработке нового композита с оптимальной концентрацией модификаторов с целью повышения эксплуатационного ресурса трибосопряжения.

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

Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме диссертации.

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

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в центральных изданиях, включенных в перечень периодических изданий ВАК РФ

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

2. 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.

3. Экспериментальное исследование влияния температуры на физико-механические свойства композиционного материала / **А. И. Азоян**, Д. С. Мантуров, Д. Н. Шишияну [и др.] // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2024. – № 1 (93). – С. 186–195. – DOI 10.46973/0201–727X_2024_1_186.

Публикации в других изданиях

4. **Азоян, А. И.** Термоупругие контактные задачи для тел с покрытиями / А. И. Азоян // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения: Научно-технический журнал. – 2015. – № 2(31). – С. 5–6.

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

6. **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.). Т. 2. – Ростов-на-Дону : Издательство Южного федерального университета. – 2016. – С. 19–24.

7. **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 : тезисы докладов XVIII Международной конференции (Ростов-на-Дону, 7–

10 ноября 2016 г.). – Ростов-на-Дону : Издательство Южного федерального университета. – 2016. – С. 7.

8. **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.

9. **Азоян, А. И.** Плоская контактная задача для двухслойного упругого слоя при неполном сцеплении в зоне контакта с учетом тепловыделения / А. И. Азоян, П. Г. Иваночкин // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения: Научно-технический журнал. – 2016. – № 2 (35). – С. 4–7.

10. **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 (Электромеханический факультет). – 2017. – № 3(36). – С. 5–7.

11. **Азоян, А. И.** Аналитическое представление вырожденного решения плоской контактной задачи для двухслойной полосы при учете тепловыделения в зоне контакта / А. И. Азоян // Сборник научных трудов «Современное развитие науки и техники» (Ростов-на-Дону, 28–30 сентября 2017 г.): Т. 1. – Рост. гос. ун-т. путей сообщения. – Ростов-на-Дону. – С. 189-191.

12. Лунева, Е. И. Моделирование неидеального теплового контакта в задачах тепловыделения от трения / Е. И. Лунева, **А. И. Азоян** // Современные проблемы механики сплошной среды : труды XIX Международной конференции (Ростов-на-Дону, 15–18 октября 2018 г.). Т. 2 / ответственные редакторы О. А. Ватульян [и др.] ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону : Издательство Южного федерального университета, 2018. – С. 148–152.

13. Лунева, Е. И. Моделирование неидеального теплового контакта в задачах тепловыделения от трения / Е. И. Лунева, **А. И. Азоян** // Современные проблемы механики сплошной среды: тезисы докладов XIX Международной конференции (Ростов-на-Дону, 15-18 октября 2018 г.). Т. 2 / ответственные редакторы О. А. Ватульян [и др.] ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону : Издательство Южного федерального университета, 2018. – С. 82.

14. Термоупругая контактная задача для полосы с тепловыделением в зоне контакта при условиях неидеального теплового контакта / Е. И. Лунева, **А. И. Азоян** // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения: Научно-технический журнал. – 2017. – № 4 (41). – С. 53–56.

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

16. Аникина, М. Д. Сравнительная оценка износостойкости композитов с наполнителями по результатам ресурсных испытаний / М. Д. Аникина, **А. И. Азоян** // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство».

– Т. 1. Технические науки. Рост. гос. ун-т. путей сообщения. – Ростов-на-Дону. – 2019. – С.256-259.

17. **Азоян, А. И.** Конечно-элементное моделирование контактного взаимодействия штампа с двухслойным покрытием при учете тепловыделения в зоне контакта / А.И. Азоян // Сборник научных трудов «Транспорт: наука, образование, производство». – Рост. гос. ун-т. путей сообщения. – Ростов-на-Дону. – 2019. – №3. – С. 159-163.

18. **Азоян, А. И.** Исследование влияния наполнителей на напряженно-деформированные и тепловые состояния тяжело нагруженного узла трения методом конечно-элементного моделирования / А. И. Азоян // Материалы Международной научно-практической конференции «Современные тенденции в науке и образовании: новый взгляд» (Нефтекамск, 19 сентября 2024 г.) / ответственный редактор А. И. Вострецов – Нефтекамск. – Издательство НИЦ «Мир науки». – 2024. – С. 13-20.

Личный вклад соискателя. Автором самостоятельно и полностью выполнен аналитический расчет напряженно-деформированного и теплового состояний узла трения с применением программы аналитических преобразований и конечно-элементного моделирования. Экспериментальные исследования проведены при непосредственном его участии и выполнены согласно структурной схеме испытаний.

В работах с соавторами личный вклад заключается в следующем: в работе [1] разработана методика проведения исследований кинетики и механизма формирования вторичных структур модифицированной эпоксидной смолы; [2, 16] участие в экспериментальных исследованиях, по результатам которых были определены физико-механические и трибологические характеристики композитов; [3] – проведена оценка степени ползучести и установлено влияние модификаторов на термическую устойчивость исследуемых композиционных материалов; [6–7] – выполнен аналитический расчет напряженно-деформированного состояния поставленной контактной задачи; [9, 14] – математическая постановка контактной задачи теории упругости; [8, 10, 12–13] – построение конечно-элементной модели задачи теории упругости в программном комплексе ANSYS.

Азоян Анаид Иосиповна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПОЛИМЕРНОГО МАТЕРИАЛА
ПУТЕМ ЕГО МОДИФИКАЦИИ**

Подписано в печать _____ 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, городской округ город Ростов-на-Дону,
г. Ростов-на-Дону пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, зд. 2.