

*На правах рукописи*



**ШКАЛЕЙ Иван Владимирович**

**ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
МОДИФИЦИРОВАННЫХ ВЯЗКОУПРУГИХ ПОЛИМЕРНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ С МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНЫМИ  
ПОВЕРХНОСТНЫМИ СЛОЯМИ**

Специальность 2.5.3. Трение и износ в машинах

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН).

Научный руководитель: **Торская Елена Владимировна**  
доктор физико-математических наук,  
профессор РАН, ведущий научный сотрудник  
лаборатории трибологии ИПМех РАН.

Официальные оппоненты: **Панин Сергей Викторович**  
доктор технических наук, член-корреспондент РАН,  
профессор, заведующий лабораторией механики  
полимерных композиционных материалов ФГБУН  
«Институт физики прочности и материаловедения  
СО РАН», г. Томск;

**Зайцев Андрей Николаевич**  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
МТ1 «Металлорежущие станки» ФГБОУ ВО  
«Московский государственный технический  
университет имени Н.Э. Баумана», г. Москва.

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное  
предприятие «Центральный научно-  
исследовательский институт конструкционных  
материалов «Прометей» имени И.В. Горынина  
Национального исследовательского центра  
«Курчатовский институт», г. Санкт-Петербург.

Защита состоится «05» июня 2026 г. в 11:00 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, конференц-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 «\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 44.2.005.01  
доктор физико-математических наук, доцент

А. В. Сидашов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Покрытия – один из наиболее распространенных способов модификации поверхностей, используемый с целью улучшения их характеристик. Поверхностные слои материалов, как правило, обладают свойствами, отличными от объемных. При нанесении тонких покрытий, которые находят все более широкое применение в технике и медицине, зачастую создаются новые материалы, не существующие в больших объемах. Это относится и к полимерным материалам, модификациям которых, в том числе для использования в узлах трения, посвящено большое количество работ в области трибологического материаловедения.

Разработка новых материалов для создания и усовершенствования машин, предназначенных для работы в северных регионах России, является важной проблемой. Эксплуатация техники показывает, что при длительном воздействии отрицательных температур ее производительность снижается примерно в 2 раза. При этом отказы техники часто связаны с неудовлетворительной работой узлов трения, изготовленных из высокоэластичных материалов, в частности, уплотнений. Причиной использования высокоэластичных материалов, чаще всего это резины, является необходимость герметизации и поглощения вибраций различной природы (в том числе, возникающих при трении). Нанесение покрытий является одним из основных методов модификации для обеспечения антифрикционных свойств, износостойкости, но в случае резин требования к этим покрытиям особенно высоки: помимо износостойкости и антифрикционных свойств – это способность выдерживать большие изгибные деформации и высокая степень сцепления на границе раздела. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) удовлетворяет вышеуказанным требованиям. Химическая технология соединения двух полимеров, очень отличающихся по свойствам, обеспечивает необходимую степень сцепления. Для представления области применения данного композита в ряду триботехнических материалов необходим полный цикл исследований с учетом влияния на трение технологических факторов (толщина покрытия), объемной температуры и старения полимеров. Возможность изменения толщины покрытия от десятков до сотен микрон ставит фундаментальную задачу оптимизации толщины покрытия. Важно также определение свойств материалов таким образом, чтобы их можно было использовать в моделях контактного и фрикционного взаимодействия.

Для оценки механических свойств поверхностных слоев или интегральных характеристик материалов применяется метод индентирования, преимуществом которого является реализация сложного напряженного состояния, которое имеет место и при фрикционном контакте. Поэтому актуальной является задача развития экспериментальных методик индентирования и расчетных моделей, описывающих этот процесс с учетом неоднородности материала и наличия реологических свойств, характерного для многих полимеров.

Ионно-плазменная поверхностная обработка полиуретана известна в качестве метода создания наноразмерных поверхностных слоев повышенной жесткости, образующихся из основного материала. Эти слои способствуют увеличению биосовместимости изделий медицинского применения. Контактное взаимодействие подобных изделий предполагает и наличие трения, поэтому актуальным является исследование фрикционного взаимодействия базовых и модифицированных полиуретанов с наноразмерными поверхностными слоями.

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

1. грант РФФИ № 18-19-00574 «Моделирование и экспериментальное исследование контактного и фрикционного взаимодействия деформируемых тел с наноразмерными поверхностными слоями»;
2. грант РФФИ № 23-19-00484 «Теоретико-экспериментальное исследование механических и трибологических свойств новых слоистых материалов на основе морозостойких резин».

**Степень разработанности темы.** Трибология полимеров является междисциплинарной областью науки, и вклад в ее развитие вносят исследователи из различных областей, в числе которых материаловедение, химия и механика. Изучению трибологии полимеров посвящено значительное количество работ с множеством направлений исследований: трение, износ, смазка, покрытия и композиты. Современное представление взаимодействий между полимером и жестким контртелом сформировалось благодаря фундаментальной основе, которая была заложена такими исследователями, как Крагельский И. В., Добычин М. Н., Горячева И. Г., Белый В. А., Бартенев Г. М., Гаркунов Д. Н., Bowden F. P., Tabor D., Shallamach A., Briscoe V. J., Lancaster J. K. и многие другие.

В настоящее время многие российские научные коллективы сосредоточены на исследованиях в области трения и износа полимеров, а также на разработке новых материалов с улучшенными трибологическими характеристиками: РГУПС (Ростов-на-Дону) – Колесников В. И. и др.; ЦНИИ КМ «Прометей» (Санкт-Петербург) – Бахарева В. Е., Николаев Г. И., Анисимов А. В. и др.; ИФПМ СО РАН – Панин С. В. и др., ИНЭОС РАН (Москва) – школа Краснова А. П.; ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН» (Якутск) – Петрова П. Н., Маркова М. А. и др.; ИПМаш РАН (Санкт-Петербург) – Седакова Е. Б., Козырев Ю. П. и др. Также можно отметить научные организации, которые занимаются исследованиями в области трибологии и материаловедения, включая полимерные материалы: ИМАШ РАН (Москва), ИВС РАН (Санкт-Петербург), МГУ (Москва), СПбПУ (Санкт-Петербург), КНИТУ (Казань) и ЮУрГУ (Челябинск).

Множество зарубежных университетов, научно-исследовательских институтов и производственных организаций специализируются на исследованиях трения и износа полимеров в целом или фокусируются на конкретных типах либо ограничиваются отдельной областью применения: ИММС НАН Беларуси, Штутгартский университет (Германия), Технический

университет Эйнховена (Нидерланды), Университет штата Пенсильвания (США), Empa (Швейцария), State Key Laboratory of Tribology (Китай), Department of Chemical Engineering, Indian Institute of Technology (Индия), DuPont (США), BASF (Германия), SKF (Швеция) и прочие.

Многие организации в России проводят исследования в области создания новых износостойких материалов на основе СВМПЭ и исследования физико-химических аспектов модификации для улучшения его свойств: СВФУ им. М. К. Аммосова, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Институт физики им. Л. В. Киренского СО РАН, Институт химии и химической технологии СО РАН, Институт высокомолекулярных соединений РАН, НИТУ «МИСиС», Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Основными зарубежными организациями, которые занимаются разработкой и исследованием полимерных материалов, включая СВМПЭ, являются Lulea University of Technology (Швеция), University of Leeds (Великобритания), DSM (Нидерланды), Tsinghua University, Beijing (Китай), University of Delaware (США).

Тенденции в исследованиях ионно-плазменной обработки полиуретана заключаются в улучшении адгезии к другим материалам, улучшении свойств поверхности (гидрофобность, биосовместимость), увеличение износостойкости, снижение проницаемости для газов и жидкостей, а также придания новых свойств (электропроводности, фотокаталитической активности). Исследования такого рода проводятся в ИМСС УрО РАН (Пермь), ИФПМ СО РАН (Томск), ИХХТ СО РАН (Красноярск), НИТУ «МИСиС» (Москва), МГУ (Москва) и ряде других. В последнее время существуют перспективные наработки на некоторых производствах в Ангиолайн, КОНМЕТ, МАТИ-Медтех. Исследования в области плазменной обработки и модификации поверхности полимеров за рубежом проводятся в University of Strathclyde (Великобритания), University of Minnesota (США), Tokyo Institute of Technology (Япония), Fraunhofer Institutes (Германия).

Триботехнические свойства усовершенствованных материалов, исследуемых в диссертации, ранее не рассматривались, поэтому необходимо изучить эти свойства в условиях сухого трения скольжения при изменении нагрузочно-скоростных параметров и температуры.

**Целью исследования** является изучение механизмов фрикционного взаимодействия перспективных поверхностно-модифицированных высокоэластичных полимерных материалов для выявления оптимальных модификаций, способствующих улучшению трибологических свойств сопряжений.

Для выполнения указанной цели были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. разработать метод для установления влияния толщины слоя СВМПЭ двухслойного композиционного полимера резина – СВМПЭ на характеристики трения с учетом фрикционного нагрева;
2. провести испытания двухслойного композита резина – СВМПЭ в условиях конформного контакта, характерного для уплотнений, и

определить влияние термического старения на характеристики трения при варьировании нагрузки, скорости скольжения и внешней температуры;

3. разработать теоретико-экспериментальный подход для определения механических свойств вязкоупругого материала в условиях сложного напряженного состояния и установить влияние наполнителей и температуры на жесткость и реологические свойства растворного полиуретана;
4. определить влияние поверхностной ионно-плазменной обработки литьевых полиуретанов на характеристики трения и выявить модификации, обеспечивающие наиболее стабильные фрикционные характеристики в рассматриваемом диапазоне нагрузок и скоростей.

**Объектом исследований** являются композиционные полимерные материалы: резина – сверхвысокомолекулярный полиэтилен как перспективный материал для уплотнений, работающих в условиях климата Севера, а также полиуретаны с поверхностной и объемной модификациями, направленными на обеспечение повышенных фрикционных характеристик.

**Научная новизна работы** представлена *впервые* полученными и значимыми результатами:

1. сочетание резины и СВМПЭ позволяет получить демпфирующий материал с поверхностным слоем, обеспечивающим антифрикционные свойства. Варьируя толщину покрытия и условия скольжения, для конкретных узлов трения можно обеспечить необходимое сочетание демпфирующих и антифрикционных свойств;
2. термическое старение не приводит к потере антифрикционных свойств композита резина – СВМПЭ, при этом демпфирующие свойства также остаются высокими (жесткость резины увеличивается не более, чем на 10 %);
3. предложена методика определения зависимости механических и реологических свойств вязкоупругих материалов от температуры по данным инструментального индентирования;
4. модификация полиуретана фуллеренами и углеродными нанотрубками приводит не только к изменению механических и реологических свойств материала, но и к появлению зависимости этих свойств от температуры в узком диапазоне от комнатной до повышенной температуры 45 °С (чего не наблюдается для немодифицированного растворного полиуретана);
5. обнаружено оптимальное сочетание типа литьевого полиуретана и режима поверхностной ионно-плазменной обработки, обеспечивающее стабильно высокое значение коэффициента трения в широком диапазоне нагрузок и скоростей.

**Теоретическая значимость работы** заключается в корректном научном обосновании, в том числе с привлечением результатов физико-математического моделирования, установленных экспериментально данных по коэффициенту

трения вязкоупругих полимерных материалов при скольжении без смазки и особенностей их изменений в зависимости от нагрузки, скорости и температуры.

**Практическая значимость работы:**

1. двухслойный композит резина – СВМПЭ обладает одновременно демпфирующими и антифрикционными свойствами. При его использовании в уплотнительном узле вместо резины коэффициент трения в среднем в 2 раза ниже, что делает его перспективным материалом для уплотнений. Разработана экспериментально-теоретическая методика определения толщины слоя СВМПЭ, оптимальной для выбранного типа фрикционного нагружения;
2. в отличие от климатического старения, термическое старение (100 °С, 72 часа) двухслойного композита резина – СВМПЭ не приводит к потере демпфирующих и антифрикционных свойств. Максимальный коэффициент трения состаренных образцов снижается на 15 % по сравнению с исходными, несмотря на увеличение жесткости полимеров на 10–13 %, поэтому ресурс материала в закрытом от излучения узле трения является высоким;
3. при прогнозе функционирования полиуретановых имплантатов следует учитывать, что при использовании углеродных наполнителей и поверхностной ионной обработке изменяются не только свойства материала, но и его чувствительность к температуре. В узком диапазоне от 24 до 45 °С длительный модуль упругости полиуретана, модифицированного нанотрубками, меняется от 3,5 до 2,8 МПа, а фуллеренами – от 1,7 до 1,4 МПа;
4. определена оптимальная комбинация жесткости (длительный приведенный модуль упругости 6,1 МПа, мгновенный – 8,8 МПа) и поверхностной ионно-плазменной обработки (флюенс  $10^{15}$  ионов/см<sup>2</sup>) полиуретана, которая обеспечивает его стабильно высокие фрикционные свойства (отношение касательной силы к нормальной варьируется от 1,82 до 2,44 при контакте с керамическим шаром) в широком диапазоне нагрузки (0,05 – 1 Н).

**Методы исследования.** При подготовке диссертационной работы использовалась современная инструментальная база, включающая такие лабораторные установки, как трибометр UMT-2 (Cetr, США) для исследования сухого трения скольжения по схеме кольцо – диск при изменении внешней температуры, трибометр UMT-3 (Cetr, США) для испытаний в режиме поступательного движения по схеме шар – плоскость, трибометр MFT-5000 (Rtec, США) для проведения испытаний при однонаправленном движении по схеме шар – диск, бесконтактный оптический профилометр S neox (Sensofar-Tech, Испания) для получения топографии поверхности и параметров шероховатости в соответствии с ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014, сканирующий нанотвердомер «Наноскан-4D» (ТИСНУМ, Россия) для получения диаграмм нагрузка – глубина вдавливания при индентировании. Представленные в диссертации исследования основываются на фундаментальных подходах

трибологии и механики контактного взаимодействия, а также на положениях теории линейной вязкоупругости. В работе для изучения полимерных материалов при сухом трении скольжения использован комплексный подход, включающий определение триботехнических характеристик и механических свойств с учетом влияния различных факторов.

**Степень достоверности результатов** подтверждается сходимостью полученных расчетных результатов с большим объемом экспериментальных данных. Достоверность полученных в диссертации результатов исследований обеспечивается корректным проведением экспериментов, повторяемостью значений, полученных на 3–5 параллельно выполненных испытаниях, применением высокоточных средств измерений и обработкой данных в соответствии с классическими положениями математической статистики.

**Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Теоретико-экспериментальный метод определения оптимальной толщины СВМПЭ покрытия двухслойного композиционного полимера резина – СВМПЭ с учетом фрикционного нагрева для выбранного типа нагружения.
2. Экспериментально установленные зависимости коэффициента трения резина – СВМПЭ в паре со стальным диском от нагрузки и скорости в условиях конформного контакта кольцо – диск, моделирующих схему уплотнительного узла трения, с учетом термического старения полимеров и внешней температуры, характерной для климатических условий северных регионов РФ.
3. Установленные зависимости модуля упругости, времен релаксации и ползучести полиуретана от используемых углеродных нанонаполнителей при изменении температурного режима в узком диапазоне 24 – 45 °С по разработанной теоретико-экспериментальной методике, основанной на неразрушающем инструментальном индентировании сферическим наконечником.
4. Экспериментально установленные зависимости коэффициента трения керамической гладкой сферы и полиуретана от его жесткости и поверхностной ионно-плазменной обработки при изменении нагрузки и скорости с обоснованием механизмов их контактного взаимодействия на основе молекулярно-механической природы трения в условиях сухого трения скольжения.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы были представлены на научных конференциях: VI International conference on topical problems of continuum mechanics (Дилижан, Армения, 2019), 21-я Международная конференция «Авиация и космонавтика» (Москва, 2022), Объединенная конференция «Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике» (Черноголовка, 2023), VI Международная научная конференция «Новые материалы и технологии в условиях Арктики» (Якутск, 2023), Семинар по механике фрикционного взаимодействия твердых тел им. И. В. Крагельского (Москва, 2024), 2024 International Conference on

Engineering Tribology and Applied Technology «ICETAT 2024» (Тайвань, 2024), XV Международная научно-техническая конференция «Трибология-машиностроению 2024» (Москва, 2024).

**Публикации.** Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 9 печатных работах. В частности, 5 работ представлены в журналах, рекомендованных экспертным советом ВАК Минобрнауки РФ, 2 из них – в журналах, индексируемых в Scopus. Список публикаций приведен в конце автореферата.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 216 наименований и 2 приложений. Общий объем работы составляет 131 страницу, включая 29 рисунков и 10 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: пункт 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», пункт 7 – «Триботехнические свойства материалов, покрытий и модифицированных поверхностных слоев» и пункт 16 – «Материалы трибологического назначения. Исследования и разработка».

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, отмечены основные научные направления исследований, близких по тематике работы, развиваемые в настоящее время, сформулированы цель и задачи работы, изложена научная новизна, показана теоретическая и практическая значимость представляемой работы, описаны методы исследований, показана достоверность полученных научных результатов исследований.

**В первой главе** представлен литературный обзор результатов научных трудов в области трибологии полимерных материалов, вклад в развитие которой не ограничивается только исследованиями вопроса трения, а охватывает разработки в смежных областях науки. Рассмотрение вопроса природы трения и факторов, влияющих на происходящие процессы при контактом взаимодействии, обзор применения исследуемых материалов и присущие им свойства, реологические особенности полимеров при деформации и способы их определения ставят диссертационную работу в контекст существующих исследований.

**Во второй главе** проведено исследование особенностей трения морозостойкой резины с покрытием из СВМПЭ.

Были исследованы двухслойные композиционные материалы, представляющие собой резину с покрытием из СВМПЭ толщиной 300 и 600 мкм. Основой резины является бутадиен-нитрильный каучук марки БНКС-18 АМН (СИБУР, Россия), который хорошо зарекомендовал себя для использования в

углеводородных средах и при низких температурах. При изготовлении резины использовалась серная вулканизация и ускорители: 2-меркаптобензотиазол и дифенилгуанидин.

Образцы были изготовлены в пресс-форме в виде колец: толщина 8 мм, внешний диаметр 54 мм, внутренний – 40 мм. Поверх предварительно прессованного порошка СВМПЭ (10 МПа, 5 минут) укладывалась резиновая смесь и проводилось совместное горячее прессование (155 °С, 20 минут, 10 МПа) в термогидравлическом прессе (Импульс, Россия).

Трибологические испытания образцов двухслойных материалов проводились по двум методикам. Первый метод предназначался для изучения влияния толщины покрытия на коэффициент трения при различных скоростях скольжения. Второй использовался для изучения влияния термического старения композита в условиях конформного контакта, имеющего место в уплотнениях, при различных нагрузочно-скоростных параметрах и внешней температуре.

В *испытаниях на трение по схеме шар – диск* был реализован режим однонаправленного скольжения шарика по поверхности кольцевых образцов. Стальной шарик (ШХ15, диаметр 10 мм) нагружался в зависимости от материала: 10 Н для объемного СВМПЭ и 20 Н для материалов с покрытиями. Меньшая нагрузка для объемного материала была выбрана для минимизации пластических деформаций при трении. Радиус дорожки составлял 23 мм. Линейная скорость скольжения изменялась от 0,01 м/с до 1 м/с при прочих равных параметрах. При каждой скорости продолжительность составляла 10 минут. В процессе тестов фиксировалась зависимость коэффициента трения от времени, а также температура, которая измерялась с помощью термопары (тип К, класс допуска  $\pm 1,5$  °С). Метод испытаний основан на стандарте ASTM G99-23, который был разработан для испытаний покрытий. Износ не оценивался; проверялась только способность композита выдерживать нагрузку без пластических деформаций на макроуровне и без трещин. Отсутствие трещин и выступов по краям дорожки, характерных для пластического оттеснения материала, проверялось с помощью методов оптической микроскопии.

*Испытания на трение по схеме кольцо – диск* были проведены по кинематической схеме однонаправленного скольжения кольца по неподвижному диску вокруг их общей оси вращения. Контактное взаимодействие осуществлялось торцевой поверхностью кольца по плоскости диска (сталь 08X18H10,  $R_a \leq 0,04$  мкм,) диаметром 65 мм и толщиной 2 мм. В паре трения кольцом является исследуемый материал, стальной полированный диск – контртелом. В процессе единичного теста с постоянными нагрузкой и скоростью образец вращался на установленные 10 оборотов (путь трения 1,5 м). Для серии тестов задавалась нормальная нагрузка и варьировалась скорость скольжения: 0,1, 0,2, 0,4 и 0,6 м/с. Эксперимент состоял из серии тестов при значениях нормальной нагрузки: 50, 100, 200, 400 и 700 Н (0,05 – 0,7 МПа) и температуры –20, 24 (комнатная) и +60 °С. В результате проведенных трибологических испытаний для образцов до и после термического старения (выдержка в

термостате при 100 °С в течение 72 часов) были получены зависимости коэффициента трения от времени теста при различных нагрузочно-скоростных параметрах в условиях отрицательной, комнатной и повышенной температурах.

Для лучшего понимания результатов эксперимента была разработана численная модель контакта при скольжении. Моделирование состоит из двух этапов. Первый из них – это квазистатическая контактная задача для упругой сферы, скользящей по вязкоупругому полупространству, покрытому относительно жестким покрытием. Вторая задача рассматривает установившийся процесс нагрева, происходящий из-за трения между двумя телами.

В модели контакта рассматривается упругая сфера (индентор) радиусом  $R$ , скользящая с постоянной скоростью  $V$  по вязкоупругому полупространству, покрытому относительно жестким покрытием толщиной  $H$ . Сфера нагружена вертикальной силой  $Q$ . Модуль упругости и коэффициент Пуассона рассматриваемых материалов равны  $E_{(i)}$  и  $\nu_{(i)}$  соответственно, где индекс  $i = 0$  указан для индентора,  $i = 1$  – для покрытия и  $i = 2$  – для полупространства. Предполагается, что  $E_1 \gg E_2$ .

Вязкоупругие свойства материала полупространства можно выразить, заменив модуль упругости в законе Гука интегральным оператором Вольтерра.

Граничные условия на верхней поверхности слоя ( $z = 0$ ):

$$\begin{aligned} w(x, y) &= f(x, y) + D, \quad (x, y) \in \Omega \\ \sigma_z &= 0, \quad (x, y) \notin \Omega \\ \tau_{xz} &= 0, \quad \tau_{yz} = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $w$  – нормальное смещение верхней поверхности слоя;  $f$  – функция, определяющая форму индентора;  $\sigma_z$  и  $\tau_{xz}$ ,  $\tau_{yz}$  – нормальные и касательные напряжения;  $\Omega$  – площадь контакта;  $D$  – глубина вдавливания. Для упрощения не учитываются касательные напряжения в контакте, считая, что они незначительно изменяют нормальное распределение давления.

На границе раздела слой-подложка ( $z = H$ ) действуют условия равенства перемещений. Выполняется также уравнение равновесия. Контактная задача решается методом граничных элементов. В результате вычисляются распределение контактного давления  $P_j$  и глубина вдавливания  $D$ .

*Тепловая задача.* Когда задача о контакте решена, можно рассчитать нагрев, обусловленный трением. Процесс нагрева считается стационарным:

$$\Delta T^{(i)} = 0, \quad i = 1, 2. \quad (2)$$

Для расчета температуры методом граничных элементов применяется алгоритм FFT (Liu S., Wang Q., Liu G., 2000).

Каждый  $j$  элемент сетки в зоне контакта  $\Omega$  подвергается постоянному воздействию силы трения, движущейся со скоростью  $V$  и, следовательно, генерирующей удельную мощность тепловыделения при трении:

$$q_j = \mu V P_j. \quad (3)$$

Для прямоугольного элемента ( $2a$  на  $2b$ ) на поверхности тепловой поток выражается в следующем виде ( $z = 0$ ):

$$\left. \frac{\partial T^{(1)}}{\partial z} \right|_{z=0} = \begin{cases} -q(x, y) / \lambda^{(1)} & |x| < a \wedge |y| < b \\ 0 & |x| > a \vee |y| > b \end{cases} \quad (4)$$

На интерфейсе ( $z = H$ ):

$$\lambda^{(1)} \left. \frac{\partial T^{(1)}}{\partial z} \right|_{z=H} = \lambda^{(2)} \left. \frac{\partial T^{(2)}}{\partial z} \right|_{z=H}, \quad T^{(1)}(x, y, H) = T^{(2)}(x, y, H), \quad (5)$$

где  $\lambda_i$  ( $i = 1, 2$ ) – коэффициент теплопроводности.

Упругие свойства СВМПЭ были получены в результате индентирования, а данные по теплопроводности были ранее получены в (Wuruch G., 2016). Определение вязкоупругих характеристик резины проводилось с помощью нанодинамического механического анализа.

В разделе 2.3.1 приведены результаты исследования влияния скорости скольжения на трение двухслойного материала в зависимости от толщины покрытия.

Фактическая толщина покрытий была определена по оптическим изображениям поперечных сечений образцов (рисунок 1).



Рисунок 1 – Оптические изображения поперечного сечения образцов двухслойных материалов с толщиной покрытия 300 (а) и 600 мкм (б)

Дорожки трения, образовавшиеся в ходе полного цикла испытаний на трение по схеме шар – диск, показаны на рисунке 2.

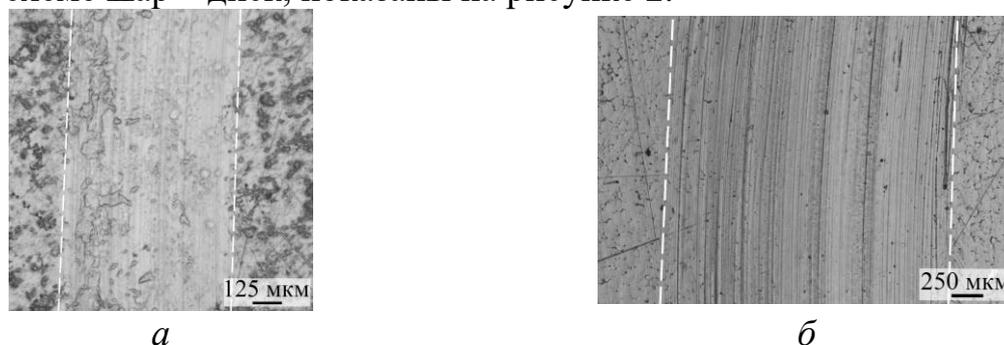


Рисунок 2 – Оптические изображения дорожек трения для объемного СВМПЭ (а) и композита с толщиной покрытия 600 мкм (б)

Дорожка трения на поверхности покрытия шире, чем на объемном СВМПЭ, что объясняется значительно более высокой интегральной податливостью композита и более высокой нагрузкой. Структура поверхности СВМПЭ и покрытия отличается из-за различий в технологии формирования.

Температура и коэффициент трения зависят от скорости скольжения, что показано на рисунке 3. Следует отметить, что сила трения в случае объемного СВМПЭ не включает в себя деформационную составляющую.

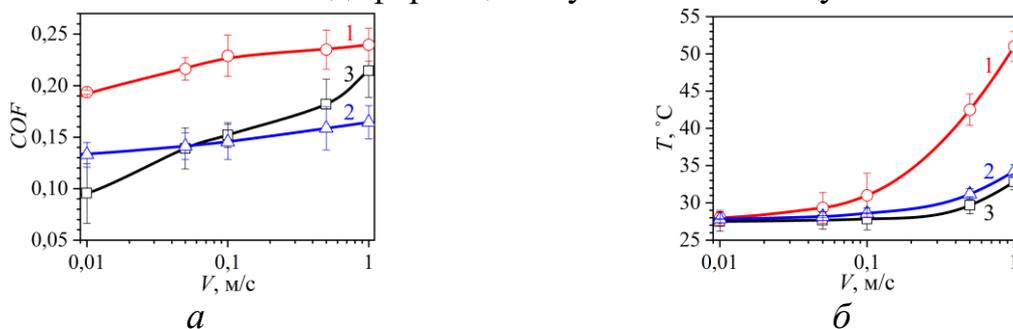


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента трения  $COF$  (а) и температуры  $T$  (б) от скорости скольжения  $V$  для  $H = 300$  мкм (1),  $H = 600$  мкм (2) и объемного СВМПЭ (3)

Ранее было изучено трение в аналогичной резине без покрытия (Вukovskiy P.O., Morozov A.V., Petrova N.N., Timofeeva E.V., 2019), где коэффициент трения находился в диапазоне 0,4–1,1 в зависимости от параметров нагрузки и скорости. Так как температура измерялась на некотором расстоянии от пятна контакта, то она позволяет только качественно оценить влияние скорости на тепловой поток, поступающий в шар и вызываемый нагревом от трения. Для анализа механизмов трения необходимо рассмотреть результаты моделирования контакта при скольжении, представленные на рисунке 4.

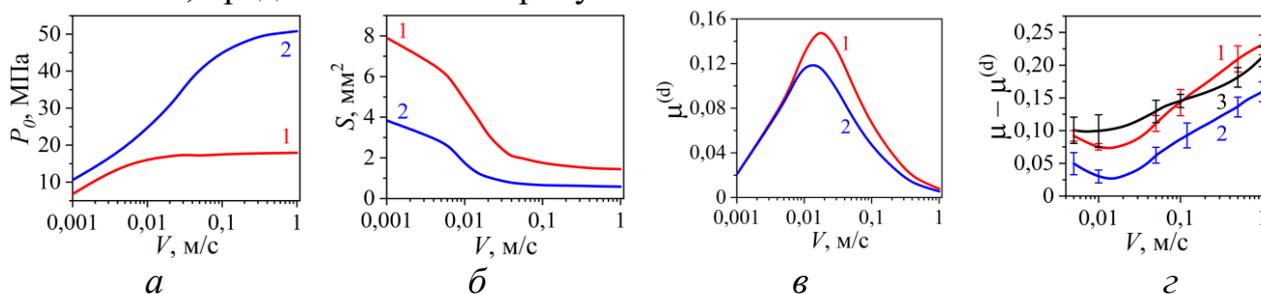


Рисунок 4 – Максимальное контактное давление  $P_0$  (а), площадь контакта  $S$  (б), деформационная составляющая силы трения  $\mu^{(d)}$  (в) и разница между коэффициентом трения  $\mu$ , полученным в ходе эксперимента, и  $\mu^{(d)}$  в зависимости от скорости скольжения  $V$  для  $H = 300$  мкм (1),  $H = 600$  мкм (2) и объемного СВМПЭ (3)

Эффект всплывания, характерный для скольжения по поверхности вязкоупругих тел, выражается в уменьшении площади контакта и увеличении контактного давления. С увеличением скорости эти параметры стремятся к постоянному значению. Чем толще покрытие, тем ниже интегральная

податливость системы «покрытие – основание» и выше максимальное давление. Эти параметры напрямую связаны с адгезионной составляющей силы трения. Чем больше площадь контакта, тем выше адгезия, поэтому при более тонком покрытии адгезионное трение должно быть более заметным.

Вычитание деформационной составляющей силы трения, рассчитанной исходя из (Горячева И.Г., Маховская Ю.Ю., Морозов А.В., Степанов Ф.И., 2017), из общей силы трения, зафиксированной в ходе эксперимента, позволяет проанализировать адгезионную составляющую. Для образцов с покрытиями при низких скоростях влияние нагрева трением незначительно, в то время как влияние всплывания (уменьшение площади контакта и адгезии) вполне очевидно. При увеличении скорости нагрев приводит к увеличению поверхностной энергии полимера и, следовательно, к увеличению адгезии.

Результаты решения тепловой задачи показаны на рисунке 5.

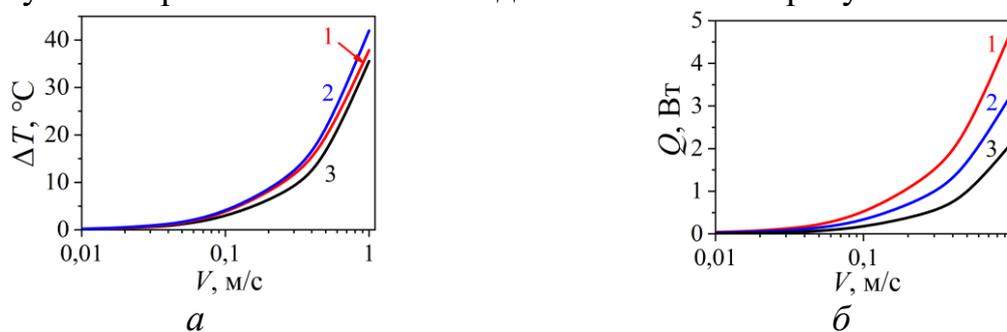


Рисунок 5 – (а) Среднее повышение температуры в зоне контакта  $\Delta T$  и (б) тепловой поток  $Q$  в зависимости от скорости скольжения  $V$  для  $H = 300$  мкм (1),  $H = 600$  мкм (2) и объемного СВМПЭ (3)

Средняя температура в зоне контакта примерно одинакова для всех трех рассматриваемых типов образцов (рисунок 5, а). Из-за меньшей площади контакта температура объемного СВМПЭ немного выше, но в целом это объясняет примерно одинаковое поведение кривых на рисунке 4, г. Кривые теплового потока в шар в зависимости от скорости показаны на рисунке 5, б. Относительное положение кривых совпадает с результатами на рисунке 3, б, хотя эксперименты с толстым покрытием и объемным СВМПЭ показывают схожие результаты. Наименьший поток при контакте с объемным СВМПЭ объясняется вдвое меньшей нагрузкой.

В разделе 2.3.2 приведены результаты исследования влияния термического старения на характеристики трения двухслойного материала в зависимости от скорости, нагрузки и температуры.

Без противостарителей ни резина, ни СВМПЭ не пригодны для длительной эксплуатации (более 6 месяцев) в узлах, подверженных прямому воздействию ультрафиолета (Shkalei I., Horng J.-H., Torskaya E., Bukovsky P., Morozov A., Stepanov F., Petrova N., Dyakonov A., Mukhin V., 2025). Однако в узлах трения, защищенных от солнечной радиации, эти материалы могли бы использоваться, поэтому был проведен анализ влияния термического старения на свойства двухслойного материала для покрытия толщиной 600 мкм.

Сравнение ИК-спектров образцов до и после старения показало практически их идентичность, то есть продукты старения (альдегиды, кетоны) в большом количестве на поверхности материала еще не накоплены. Длительный модуль упругости резины после старения несколько выше (15,2 МПа и 13,8 МПа соответственно). Времена релаксации и последействия для резины практически не меняются. При определении модуля Юнга слоя СВМПЭ на основе данных индентирования учитывалось изменение свойств подложки. Получено, что состаренный СВМПЭ характеризуется жесткостью, увеличившейся с 1,09 ГПа до 1,23 ГПа.

Зависимости коэффициента трения от нагрузки и скорости представлены на рисунке 6 для трех различных температур.

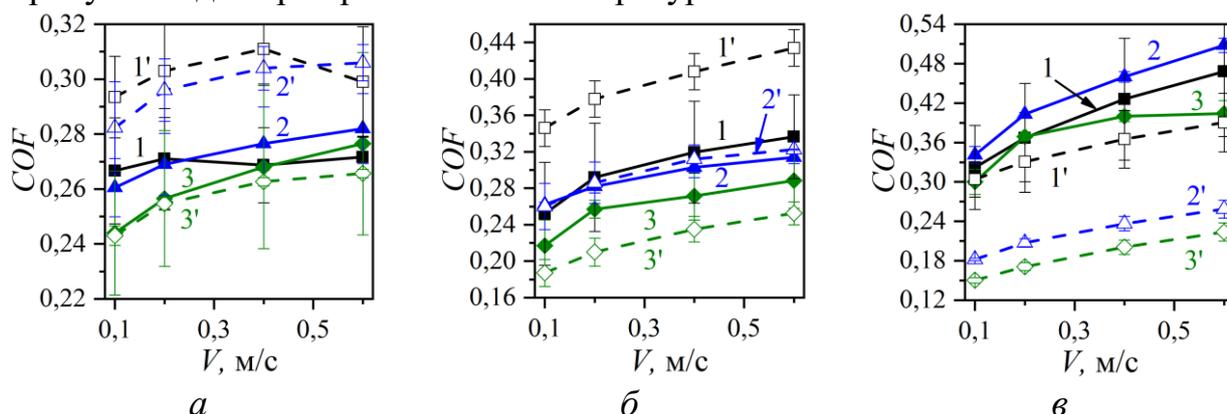


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента трения  $COF$  от скорости скольжения  $V$  при отрицательной ( $a$ ), комнатной ( $b$ ) и повышенной ( $v$ ) температурах испытания для образцов до (сплошные) и после (штрих) старения при нагрузке 50 Н ( $1, 1'$ ), 200 Н ( $2, 2'$ ) и 700 Н ( $3, 3'$ )

Первое, на что следует обратить внимание, это увеличение диапазона изменения коэффициента трения с ростом температуры. При температуре  $-20^\circ\text{C}$  он варьируется в пределах 0,1 (рисунок 6,  $a$ ), а при повышенной температуре ( $+60^\circ\text{C}$ ) – в пределах 0,4 (рисунок 6,  $v$ ). Повышение температуры приводит к комплексному изменению свойств материала. Уменьшается жесткость полимеров, растет поверхностная энергия. Поверхность не является идеально ровной (рисунок 7), поэтому фактор несплошности контакта также влияет на фрикционное взаимодействие.

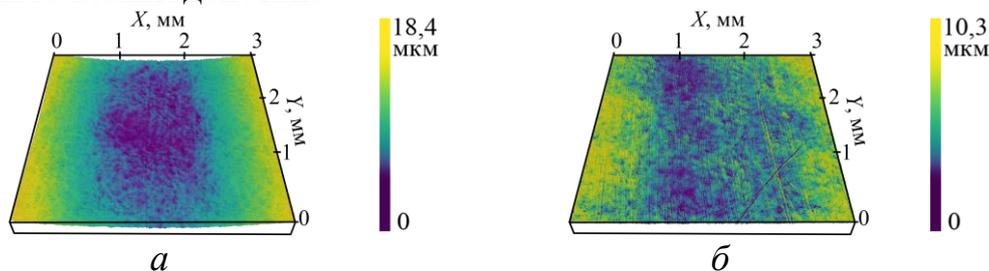


Рисунок 7 – Топография исходной поверхности образцов до ( $a$ ) и после ( $b$ ) термического старения

Сочетание факторов дискретности контакта, обеспечивающей деформационную составляющую силы трения за счет реологических свойств резиновой подложки, и адгезии можно проанализировать исходя из результатов, приведенных на рисунке 6, б. Разницу между кривыми 1 и 1', полученными для нагрузки 50 Н, можно объяснить тем обстоятельством, что дискретность контакта и, следовательно, деформационная составляющая силы трения, выше для более жесткого полимерного композита. Кривые 2 и 2' практически совпадают, вероятно, из-за того, что уменьшение поверхностной энергии материала покрытия (и адгезионной составляющей силы трения) компенсирует увеличение деформационной составляющей. Разница между кривыми 3 и 3', полученными для максимальной нагрузки, демонстрирует преобладание адгезионной составляющей.

**Третья глава** посвящена исследованию вязкоупругих свойств модифицированных растворных полиуретанов в зависимости от температуры на основе экспериментальных данных, полученных методом инструментального индентирования.

В рамках этой главы работы были исследованы образцы модифицированного полиуретана одной композиции двух групп, в каждой из которых имеются образцы без наполнителя (1-И, 2-И), с углеродными нанотрубками (1-Н, 2-Н) и фуллеренами (1-Ф, 2-Ф). Полиуретан был получен по растворной технологии (Кислицын В.Д., Шадрин В.В., Осоргина И.В., Свистков А.Л., 2020). Для второй группы проведена ионно-плазменная поверхностная обработка (Чудинов В.С., Кондюрина И.В., Шардаков И.Н., Свистков А.Л., Осоргина И.В., Кондюрин А.В., 2018) с флюенсом  $10^{16}$  ионов/см<sup>2</sup> (количество ионов на единицу поверхности за все время обработки), в результате которой из основного материала образуется карбонизированный слой толщиной 80 нм (при энергии ионов 20 кэВ). В первую очередь такая обработка поверхности предназначена для обеспечения улучшенной биосовместимости имплантатов. Однако в главе 4 показано, что в зависимости от свойств подложки и параметров обработки могут быть получены полиуретаны с уникальными свойствами, обусловленными изменением рельефа поверхности. Кроме того, доза облучения (флюенс) позволяет также управлять и жесткостью поверхности. Таким образом, перспективы использования этой технологии не ограничиваются обеспечением биосовместимости полиуретана.

Экспериментальные данные были получены на сканирующем нанотвердомере методом инструментального индентирования при локальном нагружении образцов сфероконическим алмазным индентором с радиусом закругления  $R = 1,7$  мм при линейных скоростях нагружения  $P_0$ : 0,5, 1,25 и 5 мН/с. Индентирование проводилось в термокамере (нагрев осуществляется локализовано для образца с наконечником) при трех температурах: комнатной (23–24 °С), 35 и 45 °С. Температуры были выбраны исходя из соображений о возможном биомедицинском применении материала.

Для интерпретации результатов использовалась модель, в которой процесс вдавливания индентора в материал осуществляется при линейном нагружении.

В стадии нагружения область контакта индентора с материалом все время возрастает, и для решения задачи применим подход Ли и Радока. Для упрощения расчетов принимается, что коэффициент Пуассона  $\nu$  материала не зависит от времени. Решение упругой задачи, на основе которой строится вязкоупругое решение, определяется теорией Герца. В модели используется функция ползучести стандартного вязкоупругого тела. Зависимость внедрения  $d$  от нагрузки  $P$  выглядит следующим образом:

$$d^{3/2}(P) = \frac{3(1-\nu^2)}{4\sqrt{RE_\infty}} \left( P - (T_\varepsilon - T_\sigma) P_0 \left( 1 - e^{-\frac{P}{T_\varepsilon P_0}} \right) \right), \quad (6)$$

где  $E_\infty$  – приведенный длительный модуль упругости,  $T_\sigma$  – время ползучести и  $T_\varepsilon$  – время релаксации. Мгновенный модуль упругости определяется как  $E_0 = E_\infty T_\varepsilon / T_\sigma$ .

Для решения обратной задачи по приведенной методике, использовались только кривые нагружения. На первом этапе обрабатывались результаты, полученные при самой малой скорости нагружения. Нашлись среднее значение приведенного длительного модуля упругости  $\bar{E}_\infty$  для каждой температуры и двух времен  $T_\sigma$  и  $T_\varepsilon$  (на этом этапе в расчет не принимаются). Далее эти значения длительного модуля упругости использовались при обработке результатов, полученных при самой высокой скорости нагружения. Методом наименьших квадратов определялись два других параметра: средние значения для каждой температуры времен релаксации  $\bar{T}_\sigma$  и ползучести  $\bar{T}_\varepsilon$ .

Наконец, найденные средние значения параметров (таблица 1) использовались для построения расчетных кривых при средней скорости, которые сравнивались с экспериментальными результатами (максимальное расхождение кривых не превышает 8 %).

Таблица 1 – Средние значения параметров, характеризующие механические свойства материалов

Образец	$T, ^\circ\text{C}$	$\bar{E}_\infty, \text{МПа}$	$\bar{T}_\sigma, \text{с}$	$\bar{T}_\varepsilon, \text{с}$
1-И	24	2,68	1,93	5,03
	35	2,65	1,99	4,55
	45	2,59	1,8	4,18
1-Н	24	3,52	0,95	4,44
	35	2,89	1,18	4,71
	45	2,80	0,98	3,98
1-Ф	24	1,69	1,11	7,13
	35	1,49	1,01	6,35
	45	1,38	1,18	6,33

Анализ приведенных данных показывает, что модификаторы действуют на материал различным образом: нанотрубки – в сторону увеличения модуля, а фуллерены – в сторону уменьшения.

Для образца 1-И температура не влияет на упругие свойства материала (разница в 4 % попадает в погрешность эксперимента), хотя реологические свойства чувствительны к изменению температуры. В случаях, когда используются объемные наполнители, жесткость материала уменьшается с ростом температуры, температурный отклик модифицированных материалов доходит до 20 %.

В рамках данного исследования методом индентирования определялись интегральные свойства полиуретанов с карбонизированным нанослоем (толщина 80 нм). Была выбрана ионно-плазменная обработка с флюенсом  $10^{16}$  ионов/см<sup>2</sup>, что соответствует полностью карбонизированному поверхностному слою.

Результаты индентирования материалов с карбонизированным слоем, представленные на рисунке 8 для фиксированной температуры, показывают, что карбонизированный слой интегрально придает материалу больше жесткости, причем на его свойства существенно влияют углеродные добавки. Предполагалось, что свойства полиуретана с одинаковым наполнителем (-И, -Н, -Ф) группы 1 и 2 идентичны, а различие экспериментальных данных обусловлено только наличием карбонизированного нанослоя. Если в случае материала без добавок и с фуллеренами общая жесткость основания меняется незначительно (рисунок 8, а, в), то наличие нанотрубок в полиуретане приводит к существенно более жесткому поверхностному слою (рисунок 8, б), причем уменьшается влияние скорости вдавливания на результаты индентирования.

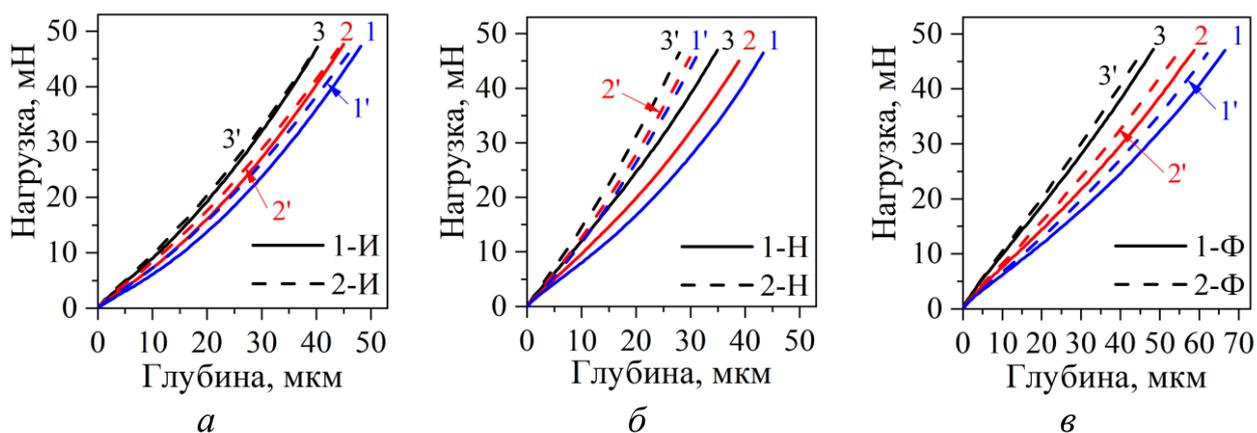


Рисунок 8 – Влияние карбонизированного слоя (штрих) на жесткость полиуретана без наполнителя (а), с нанотрубками (б), с фуллеренами (в) при 35 °С и скорости нагружения 0,5 (1, 1'), 1,25 (2, 2') и 5 мН/с (3, 3')

Анализ влияния карбонизированного слоя на чувствительность материала к изменению температуры можно провести на основании результатов, представленных на рисунке 9 для фиксированной (средней) скорости вдавливания. Для материалов с наполнителями поверхностная обработка

приводит к уменьшению зависимости интегральных свойств образца от температуры, незначительному в случае фуллеренов и существенному для нанотрубок. Для исходного полиуретана наблюдается противоположный эффект.

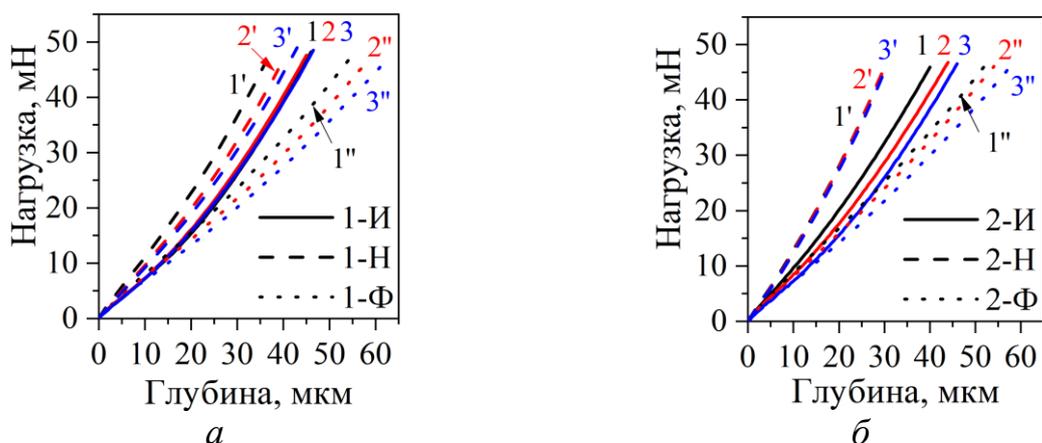


Рисунок 9 – Сравнение зависимости нагрузки от глубины для полиуретана с наполнителями без карбонизированного слоя (а) и со слоем (б) при 24 (1, 1', 1''), 35 (2, 2', 2''), 45 °С (3, 3', 3'') и скорости нагружения 1,25 мН/с

**Четвертая глава** посвящена исследованию влияния поверхностной ионно-плазменной обработки на фрикционные характеристики литевых полиуретанов.

Были использованы образцы двух групп полиуретана, отличающихся композицией. Композиция №1 аналогична композиции растворного полиуретана из главы 3. Различия рецептур №1 и №2 заключаются в пропорции компонентов смеси отвердителя и соотношении форполимера к смеси отвердителя при изготовлении. Также для композиции №2 при синтезе используется другой температурный режим. В каждой группе имеются образцы без обработки (1-0, 2-0), с ионно-плазменной поверхностной обработкой с флюенсом  $10^{15}$  (1-А, 2-А) и  $10^{16}$  ионов/см<sup>2</sup> (1-Б, 2-Б). Полиуретан был получен по литьевой технологии, которая отличается от растворной исключением стадий, в которых использовался растворитель.

Трибологические испытания проводились в режиме поступательного движения жесткого гладкого шарика из  $Al_2O_3$  диаметром 1,5 мм по поверхности исследуемых материалов при постоянных нагрузке и скорости в ходе единичного теста. Путь трения при этом составлял 15 мм. Нагрузка варьировалась от 5 до 100 г, а скорость скольжения – от 0,1 до 1 мм/с. Такие диапазоны выбраны исходя из предполагаемого применения материала в качестве спец. обуви (Sato S., Yamaguchi T., Shibata K., Nishi T., Moriyasu K., Harano K., Hokkirigawa K., 2020). Номинальное контактное давление подошвы обуви с плоскостью варьируется в диапазоне 0,3–1,3 МПа (Moriyasu K., Nishiwaki T., 2015). Низкие значения скорости обусловлены тем, что интерес представляет усилие трения скольжения в момент проскальзывания.

Для установления зависимостей коэффициента трения от скорости и нагрузки был использован метод регрессионного анализа (Евдокимов Ю.А., Колесников В.И., 1980) в соответствии с методикой ортогонального центрального композиционного плана двухфакторного эксперимента.

Мгновенный и длительный приведенные модули упругости для материала № 1-0 составили 8,8 МПа и 6,1 МПа, для материала № 2-0 – 52,5 МПа и 45,9 МПа, соответственно. Таким образом, первый материал является вязкоупругим и существенно более податливым, а второй – практически упругим.

На рисунке 10 представлено сравнение исходной поверхности материала, для которого в результате обработки произошло самое яркое изменение топографии поверхности. В таблице 2 даны параметры шероховатости поверхности для всех образцов и дорожек трения после тестов с максимальным значением нагрузки и минимальной скоростью.

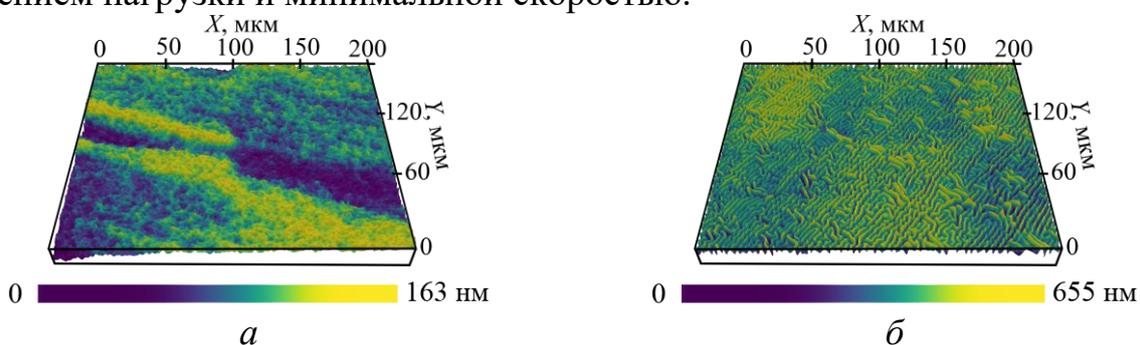


Рисунок 10 – Топография исходной поверхности образцов № 1-0 (а) и № 1-Б (б)

Таблица 2 – Параметры шероховатости поверхности образцов

Образец	Параметр шероховатости, нм			
	$S_a$	$S_q$	$S_z$	$S_a$ дорожек трения
1-0	4,4	5,6	101,7	18,9
1-А	12,7	16,6	191,1	38,5
1-Б	22,1	28,9	319,0	68,0
2-0	2,7	3,5	58,4	4,4
2-А	2,5	3,1	55,9	6,2
2-Б	9,0	11,4	150,4	21,3

Влияние поверхностной обработки на изменение поверхности зависит от жесткости подложки. Для более жесткого материала заметные изменения топографии поверхности проявляются только для образца № 2-Б. Для более податливого материала изменения поверхности происходят уже при обработке с меньшим флюенсом. Шероховатость дорожек трения во всех случаях больше шероховатости начальной поверхности, ее изменение более существенно для образцов первой группы, показывающих большие значения коэффициента трения.

На рисунке 11 представлены изолинии коэффициента трения  $\mu$  для всех исследуемых образцов.

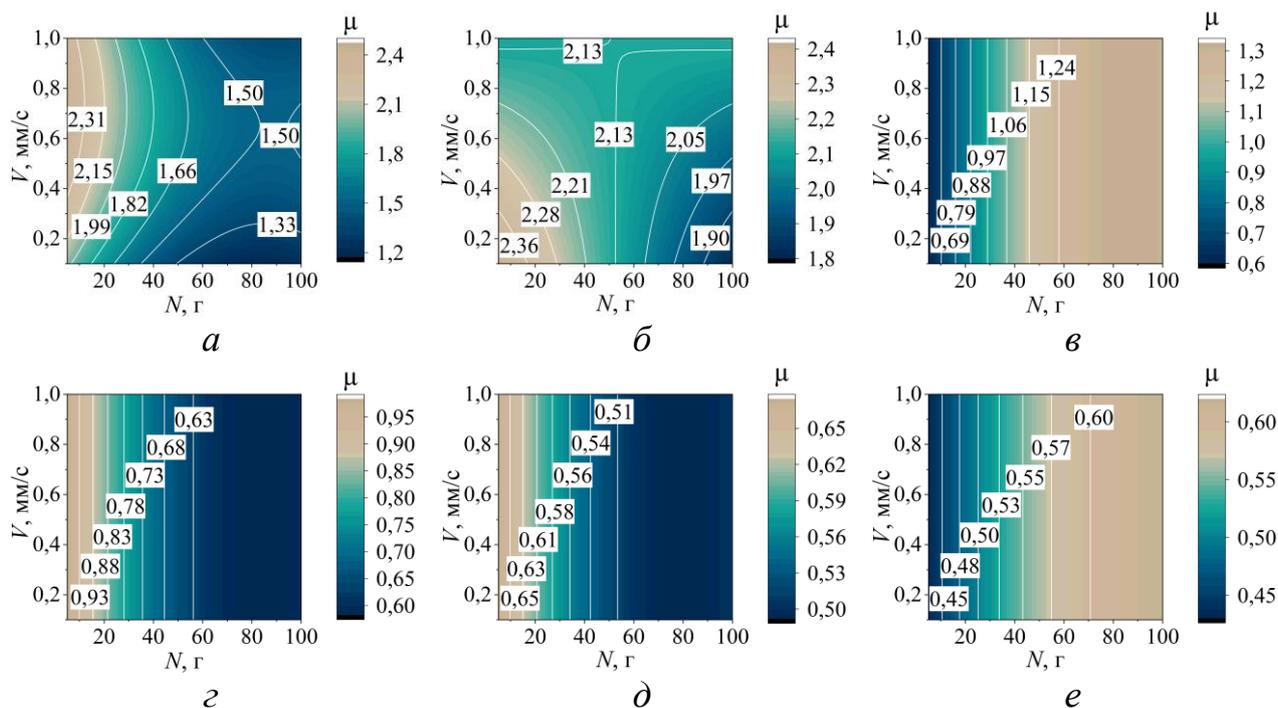


Рисунок 11 – Изолинии коэффициента трения  $\mu$  в зависимости от скорости  $V$  и нагрузки  $N$  для образца 1-0 (а), 1-А (б), 1-Б (в), 2-0 (г), 2-А (д) и 2-Б (е)

Данные по вязкоупругим свойствам материалов в сочетании с информацией о наногеометрии поверхности и режиме поверхностной обработки дают достаточную информацию для анализа и объяснения результатов, представленных на рисунке 11.

Материал второй композиции является практически упругим, деформационная составляющая силы трения в этом случае может не приниматься во внимание. В случае вязкоупругого материала композиции № 1 на силу трения существенно влияет ее деформационная составляющая, что проявляется в зависимости силы трения от скорости.

Анализ влияния поверхностной обработки на значения коэффициента трения показал, что для материала второй композиции поверхностная обработка, в целом, приводит к уменьшению поверхностной энергии и сил адгезии за счет появления карбонизированных слоев. Исключение – образец 2-Б при больших значениях нагрузки, когда коэффициент трения чуть выше зафиксированного для необработанного материала при тех же значениях параметров. Наиболее интересный результат – это стабильно высокое значение коэффициента трения, полученное для образца 1-А, слабо меняющееся в исследованных диапазонах нагрузок и скоростей (от 1,82 до 2,44).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Сочетание двух полимеров, резины и СВМПЭ, позволяет получить демпфирующий материал с износостойким и антифрикционным слоем:

- коэффициент трения для композитного полимера в паре со стальным шаром изменяется от 0,1 до 0,22, что существенно меньше, чем у резины (0,4–1,1),
  - результаты экспериментов (сухое трение) и моделирования показывают, что коэффициент трения увеличивается с уменьшением толщины покрытия и ростом скорости скольжения.
2. Трибологические испытания полимерного композита резина БНКС – СВМПЭ показывают, что максимальный коэффициент трения, зафиксированный для состаренных образцов, на 15 % ниже, чем для исходных, что связано с уменьшением поверхностной энергии СВМПЭ при термическом старении. С повышением температуры испытаний уменьшается жесткость полимеров и растет поверхностная энергия, соответственно, растет коэффициент трения.
  3. Разработан новый комплексный метод определения свойств вязкоупругих материалов на основе данных индентирования.
  4. Установлено влияние температуры в относительно узком диапазоне (24–45 °С), углеродных модификаторов и поверхностной обработки на свойства растворного полиуретана:
    - нанотрубки увеличивают его жесткость, а фуллерены уменьшают,
    - повышение температуры приводит к увеличению податливости материала,
    - длительный модуль упругости полиуретана, наполненного нанотрубками, меняется от 3,5 до 2,8 МПа, а материала, модифицированного фуллеренами, от 1,7 до 1,4 МПа,
    - влияние температуры на интегральные механические и реологические свойства становится пренебрежимо малым при поверхностной обработке материала с нанотрубками.
  5. Показано, что силы трения, возникающие при скольжении по поверхности литевых полиуретанов керамического шарика, имеют адгезионную природу, а также, в случае материала с выраженными вязкоупругими свойствами, добавляется деформационная составляющая силы трения. Модификация поверхности (обработка ионами азота) оказывает влияние на фрикционные свойства литевых полиуретанов в зависимости от их жесткости и реологических свойств:
    - модификация поверхности с большим временем обработки уменьшает поверхностную энергию, отвечающую за силы адгезии, а также полностью нивелируют деформационную составляющую силы трения,
    - обработка с меньшим временем снижает коэффициент трения для более жесткого полиуретана, и дает стабильно высокий коэффициент трения, слабо меняющийся в рассмотренных диапазонах нагрузок и скоростей, для более податливого.

**Рекомендации и перспективы дальнейших исследований по теме работы.** Недостатком СВМПЭ является низкая точка текучести, которая в сочетании с высоким (для полимеров) модулем Юнга приводит к развитию пластической деформации. Сочетание тонких слоев СВМПЭ с резиной приводит к снижению контактных и внутренних напряжений, что позволяет избежать проявления пластичности. Таким образом, перспективным направлением остается отработка технологии получения материала с покрытием толщиной меньше 100 мкм и его исследованием. В то же время, чем толще покрытие, тем ниже демпфирующая способность материала. Это означает, что для конкретных узлов трения и условий нагрузки существует оптимальная толщина покрытия, обеспечивающая сочетание демпфирующих и антифрикционных свойств композита резина – СВМПЭ.

### **Основные публикации автора по теме диссертации**

#### ***Публикации в изданиях из перечня ВАК Минобрнауки РФ***

1. Шкалей, И. В. Влияние поверхностной ионно-плазменной обработки на триботехнические характеристики полиуретана / И. В. Шкалей, Е. В. Торская // Трение и износ. – 2023. – Т. 44, № 4. – С. 376-384. – DOI 10.32864/0202-4977-2023-44-4-376-384.
2. Исследование зависимости свойств модифицированных полиуретанов от температуры методом индентирования / Е. В. Торская, А. А. Яковенко, И. В. Шкалей, А. Л. Свистков // Физическая мезомеханика. – 2023. – Т. 26, № 3. – С. 29-38. – DOI 10.55652/1683-805X\_2023\_26\_3\_29.
3. Шкалей, И. В. Влияние старения на триботехнические характеристики двухслойного композита «морозостойкая резина - сверхвысокомолекулярный полиэтилен» / И. В. Шкалей // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 3(99). – С. 231-238. – DOI 10.46973/0201-727X\_2025\_3\_231.

#### ***Публикации в изданиях, индексируемых Scopus***

4. Using Thin Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene Coatings to Reduce Friction in Frost-Resistant Rubbers / E. Torskaya, I. Shkalei, F. Stepanov [et al.] // Polymers. – 2024. – Vol. 16, No. 20. – P. 2870. – DOI 10.3390/polym16202870.
5. Effect of Climatic and Thermal Aging on Friction of Frost-Resistant Rubber With and Without Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Coating / I. Shkalei, J. H. Horng, E. Torskaya [et al.] // Coatings. – 2025. – Vol. 15, No. 5. – P. 514. – DOI 10.3390/coatings15050514.

#### ***Публикации в научных сборниках***

6. Скольжение индентора по вязкоупругому телу с покрытием: моделирование и экспериментальное исследование / Е. В. Торская, Ф. И. Степанов, И. Ю. Цуканов, И. В. Шкалей // Актуальные проблемы механики сплошной среды : Материалы VI международной конференции. – Дилижан: Национальный университет архитектуры и строительства Армении, 2019. – С. 326-330.

7. Шкалей, И. В. Трибологические свойства покрытий СВМПЭ на подложке из морозостойкой резины / И. В. Шкалей, Е. В. Торская, А. А. Дьяконов // Новые материалы и технологии в условиях Арктики : Материалы VI Международной конференции. – Якутск: Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, 2023. – С. 99-100.
8. Шкалей, И. В. Исследование морозостойких резин с антифрикционным покрытием / И. В. Шкалей, О. О. Щербакова, Т. И. Муравьева // Тезисы докладов объединенной конференции «Электронно-лучевые технологии и рентгеновская оптика в микроэлектронике». – 2023. – С. 77.
9. Шкалей, И. В. Исследование трения скольжения полиуретана с карбонизированным нанослоем / И. В. Шкалей, Е. В. Торская // Трибология - машиностроению : Труды XV Международной научно-технической конференции. – Москва: Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, 2024. – С. 235-237.

**Личный вклад соискателя.** Основные положения и результаты экспериментальных исследований автором получены самостоятельно. В перечисленных по теме диссертации публикациях личный вклад соискателя заключается в следующем: [1] – проведение индентирования и расчет модулей упругости полиуретанов, разработка методики трибологических испытаний для определения зависимости коэффициента трения полиуретана в паре с керамическим контртелом от нагрузки и скорости скольжения; [2] – разработка экспериментального метода индентирования для определения вязкоупругих свойств материалов, обработка и обобщение полученных результатов; [3–5] – разработка, подготовка и проведение трибологических испытаний нового двухслойного полимерного композиционного материала, обработка и анализ полученных данных; [6–9] – постановка и проведение экспериментальных исследований, обработка и обобщение результатов.

Шкалей Иван Владимирович  
**ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
МОДИФИЦИРОВАННЫХ ВЯЗКОУПРУГИХ ПОЛИМЕРНЫХ  
МАТЕРИАЛОВ С МИКРО- И НАНОРАЗМЕРНЫМИ  
ПОВЕРХНОСТНЫМИ СЛОЯМИ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 23.03.2026  
Объем: 1,0 п.л.  
Тираж: 100 экз. Заказ № \_\_\_\_  
Отпечатано в типографии «Реглет»  
119571, г. Москва, ул. Покрышкина, д. 4  
+7(495)978-33-35, www.reglet.ru