

## **ОТЗЫВ**

**официального оппонента кандидата технических наук, доцента**

**Зайцева Андрея Николаевича**

**на диссертацию Шкалея Ивана Владимировича**

**«Трибологические и механические свойства модифицированных вязкоупругих полимерных материалов с микро- и наноразмерными поверхностными слоями» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.3. Трение и износ в машинах**

### **1. Структура и объем диссертации**

Диссертация Шкалея И.В. имеет логичное построение и состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (216 источников) и двух приложений. Общий объём – 131 страница, включая 29 рисунков и 10 таблиц.

Содержание глав последовательно раскрывает поставленные задачи.

Глава 1 (обзор литературы) содержит три раздела: описание полимерных материалов, трение полимеров и их реология. Обзор показывает, что автор хорошо ориентируется в современном состоянии проблемы, умеет выделять нерешённые вопросы и обосновывать необходимость своего исследования.

Глава 2 посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию двухслойного композита. Автор последовательно излагает методики изготовления образцов, методы испытаний (термическое старение, индентирование, трибология, моделирование) и результаты. Особо следует отметить, что для анализа влияния толщины покрытия автор использует численную модель, учитывающую фрикционный разогрев, что существенно повышает ценность работы. Экспериментальные данные представлены в виде наглядных графиков и хорошо интерпретированы.

Глава 3 – одна из наиболее интересных в методологическом плане. Автор предлагает новый способ определения вязкоупругих параметров полимеров по кривым индентирования. Выводы о влиянии наполнителей и температуры на свойства полиуретанов обоснованы. Приведены данные о модулях упругости, временах релаксации и ползучести для трёх типов материалов.

Глава 4 посвящена прикладному аспекту – влиянию ионно-плазменной обработки на трение полиуретанов. Автор грамотно использует методы планирования эксперимента, что позволило при относительно небольшом числе опытов получить достоверные регрессионные зависимости. Представлены изолинии коэффициента трения, проанализирована связь с шероховатостью и жёсткостью материалов.

Заключение содержит пять основных выводов, которые полностью соответствуют поставленным задачам. Приложение А содержит данные об упруго-прочностных свойствах двухслойных полимерных композитов и обоснование выбора ускорителя вулканизации, Приложение Б – акт о практическом применении, что подтверждает востребованность результатов.

Замечаний по структуре и содержанию нет. Рисунки и таблицы оформлены качественно, текст читается легко.

## **2. Актуальность темы**

Актуальность представленной диссертации обусловлена необходимостью создания новых полимерных композиционных материалов с управляемыми трибологическими характеристиками для узлов трения, работающих в широком диапазоне температур и нагрузок, включая арктические условия. Особое внимание в работе уделено двум классам материалов: двухслойному композиту «морозостойкая резина – сверхвысокомолекулярный полиэтилен» (СВМПЭ) и модифицированным полиуретанам (объёмное наполнение углеродными нанотрубками и фуллеренами, а также ионно-плазменная обработка поверхности).

Следует подчеркнуть, что, несмотря на значительное количество исследований в области трибологии полимеров, остаётся ряд нерешённых задач, а именно:

- отсутствие методов оптимального выбора толщины антифрикционного покрытия на эластомерной подложке с учётом фрикционного нагрева;
- недостаточная изученность влияния термического старения на трибологические свойства систем «резина – СВМПЭ» в конформном контакте, характерном для уплотнений;
- необходимость развития экспериментально-теоретических подходов для определения вязкоупругих свойств полимеров в условиях сложного напряжённого состояния при изменении температуры.

Представленная работа решает эти проблемы, что и определяет её высокую актуальность с научной и практической точек зрения. В частности, впервые предложен метод оптимизации толщины покрытия СВМПЭ с учётом фрикционного разогрева, что позволяет для конкретных узлов трения обеспечить необходимое сочетание демпфирующих и антифрикционных свойств. Кроме того, актуальным является изучение влияния ионно-плазменной обработки на триботехнические характеристики литевых полиуретанов, что открывает новые возможности для создания материалов со стабильным высоким коэффициентом трения в широком диапазоне нагрузок и скоростей. Таким образом, тема диссертации является несомненно актуальной как в научном, так и в прикладном аспектах.

## **3. Научная новизна работы**

Диссертационная работа Шкалея И.В. содержит ряд новых научных положений, отличающихся оригинальностью и практической значимостью.

Впервые разработана методика установления оптимальной толщины покрытия СВМПЭ на резиновой подложке на основе совместного решения контактной и тепловой задач при скольжении сферы. Новизна подхода заключается в учёте вязкоупругих свойств подложки, жёсткости покрытия и фрикционного нагрева, что

позволило получить количественные оценки влияния скорости скольжения на площадь контакта, контактное давление и деформационную составляющую силы трения. Такая постановка задачи для системы «резина – СВМПЭ» выполнена впервые.

Впервые экспериментально установлены зависимости коэффициента трения двухслойного композита «резина – СВМПЭ» от нагрузки (50–700 Н), скорости скольжения (0,01–1 м/с) и внешней температуры (–20, комнатная, +60 °С) в условиях конформного контакта, моделирующих реальный узел уплотнения. Показано, что повышение температуры испытаний приводит к росту коэффициента трения за счёт увеличения поверхностной энергии, а термическое старение, напротив, снижает трение. Полученные данные являются новыми и не имеют аналогов в научной литературе.

Предложен новый теоретико-экспериментальный подход к определению вязкоупругих параметров полимеров по кривым индентирования с линейной скоростью нагружения. В отличие от известных методов, основанных на сложных процедурах релаксации или ползучести, разработанный подход позволяет по кривым нагружения определить длительный модуль упругости, время релаксации и ползучести в рамках модели стандартного вязкоупругого тела. Новизна подтверждается успешной апробацией на полиуретанах с разными наполнителями и при различных температурах.

Впервые выявлено влияние углеродных нанонаполнителей (нанотрубки, фуллерены) на температурную чувствительность полиуретанов в диапазоне 24–45 °С. Обнаружено, что немодифицированный полиуретан практически не меняет жёсткость при нагреве (изменение модуля в пределах погрешности), тогда как материал с нанотрубками демонстрирует снижение длительного модуля с 3,5 до 2,8 МПа, а с фуллеренами – с 1,7 до 1,4 МПа. Этот эффект описан впервые и имеет важное значение для прогнозирования поведения имплантатов.

Впервые систематически исследовано влияние флюенса ионно-плазменной обработки ( $10^{15}$  и  $10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>) на трибологические свойства двух типов литевых полиуретанов с разной жёсткостью. Обнаружено, что для вязкоупругого материала обработка с малым флюенсом приводит к стабильно высокому коэффициенту трения (вплоть до 2,5), а для практически упругого – к его снижению. Полученные закономерности являются новыми и расширяют представления о роли поверхностных нанослоёв в трении полимеров.

Таким образом, научная новизна работы не вызывает сомнений и подтверждается публикациями в рецензируемых журналах.

#### **4. Обоснованность выводов и рекомендаций**

Обоснованность результатов диссертационного исследования Шкалея И.В. обеспечивается применением современного экспериментального оборудования,

корректной постановкой задач, использованием адекватных физико-математических моделей и тщательной статистической обработкой данных.

Работа выполнена на трибометрах (UMT-2, UMT-3, MFT-5000) и нанотвердомере «Наноскан-4D» с высокой чувствительностью измерения. Исследовано более 10 типов материалов (двухслойные композиты, полиуретаны с разными наполнителями, с поверхностной обработкой и без), проведены сотни измерений. Для каждого режима выполнено не менее трёх повторений, что подтверждается приведёнными в диссертации кривыми с указанием разброса значений.

Контактная задача для вязкоупругого основания со слоем решена методом граничных элементов с использованием двойных интегральных преобразований Фурье. Сравнение расчётных и экспериментальных зависимостей показало хорошее количественное совпадение (расхождение в пределах погрешности измерений). Это подтверждает адекватность разработанных моделей реальным процессам.

Для трибологических испытаний полиуретанов применён метод ОЦКП – один из наиболее строгих подходов в планировании эксперимента. Уравнения регрессии приведены с учётом значимых коэффициентов (по критерию Стьюдента), проверены на адекватность по критерию Фишера. Это исключает интерпретацию случайных выбросов как закономерностей. Для индентирования использован метод наименьших квадратов с нелинейной оптимизацией (Гаусса–Ньютона), что обеспечивает объективное определение параметров модели стандартного вязкоупругого тела.

Таким образом, обоснованность выводов и рекомендаций не вызывает сомнений, а предложенные автором методы могут быть рекомендованы для исследований других вязкоупругих материалов.

## **5. Достоверность результатов исследований**

Достоверность результатов диссертационного исследования Шкалея И.В. подтверждается следующими обстоятельствами.

Каждый эксперимент (трибологические испытания, индентирование) проводился не менее трёх раз на идентичных образцах. На представленных в работе графиках приведены средние значения с указанием доверительных интервалов или среднеквадратичных отклонений. Разброс результатов не превышает 8 % для индентирования и 10–15 % для коэффициента трения, что типично для вязкоупругих полимерных материалов и подтверждает статистическую значимость полученных различий между образцами.

Полученные автором зависимости (увеличение коэффициента трения с ростом скорости и уменьшением толщины покрытия, снижение трения после термического старения, рост податливости полиуретана при нагреве) качественно согласуются с известными положениями трибологии полимеров и механики вязкоупругих тел, что косвенно подтверждает корректность проведённых экспериментов.

Все испытания проведены в соответствии с действующими стандартами (ГОСТ, ISO, ASTM) или на их основе на откалиброванном оборудовании.

Таким образом, достоверность научных положений, выводов и рекомендаций диссертации является обоснованной и не вызывает сомнений.

## **6. Значимость результатов работы для науки и практики**

Полученные в диссертационной работе Шкалея И.В. результаты имеют высокую практическую ценность и вносят вклад в развитие научных основ трибологического материаловедения.

Практическая значимость является приоритетной и подтверждается следующими разработками.

Разработаны рекомендации по выбору толщины покрытия СВМПЭ для двухслойного композита. Показано, что увеличение толщины покрытия с 300 до 600 мкм снижает коэффициент трения, но одновременно уменьшает демпфирующую способность материала. Это позволяет для каждого конкретного узла трения подобрать оптимальную толщину. Рекомендации приняты к использованию при изготовлении опытных образцов пыльника шарнира равных угловых скоростей и резинового уплотнителя камлока, что подтверждено актом практического применения (Приложение Б).

Обоснована возможность использования композита «резина – СВМПЭ» в закрытых от солнечного излучения условиях. Показано, что после ускоренного старения (100 °С, 72 ч), моделирующего длительную эксплуатацию, коэффициент трения не увеличивается, а снижается на 15 %, а жёсткость резины возрастает не более чем на 13 %. Это означает, что в узлах трения, защищённых от солнечной радиации (например, внутри редукторов, в герметичных корпусах), композит может эксплуатироваться без потери свойств в течение многих лет. Данный вывод имеет прямое значение для повышения надёжности техники в Арктике.

Предложен простой и неразрушающий метод контроля механических свойств полиуретанов. Метод инструментального индентирования с использованием сферического индентора и обработкой кривых нагружения по модели стандартного вязкоупругого тела может быть внедрён в производство для входного контроля сырья и готовых изделий, особенно в медицинской промышленности, где объём образцов ограничен.

Определены оптимальные режимы ионно-плазменной обработки для управления коэффициентом трения полиуретанов. Показано, что, варьируя флюенс, можно в широких пределах менять коэффициент трения: от 0,41 (для жёсткого полиуретана с обработкой  $10^{16}$  ион/см<sup>2</sup>) до 2,51 (для мягкого полиуретана с обработкой  $10^{15}$  ион/см<sup>2</sup>). Это открывает возможность создавать покрытия с заданными фрикционными свойствами – как антифрикционные, так и с высоким сцеплением.

Теоретическая значимость работы также высока.

Проанализированы адгезионная и деформационная составляющие силы трения для двухслойного композита «резина – СВМПЭ» с использованием численного моделирования и эксперимента. Установлено, что адгезионная составляющая преобладает при высоких скоростях, а деформационная – при низких.

Разработан новый подход к определению вязкоупругих параметров полимеров, который может быть распространён на другие материалы. В отличие от классических методов динамического механического анализа, требующих макроскопических образцов, предложенный метод работает на относительно небольших пробах.

Выявлен эффект, что термическое старение снижает поверхностную энергию СВМПЭ и приводит к уменьшению адгезионной составляющей трения. Это расширяет представления о старении полимеров, показывая, что оно может в некоторых аспектах даже улучшать трибологические характеристики.

Таким образом, диссертация Шкалея И.В. содержит результаты, которые уже нашли практическое применение и одновременно развивают фундаментальные основы трибологии полимеров.

## **7. Полнота изложения материалов диссертации в открытой печати**

Результаты диссертации опубликованы в 9 работах, включая статьи в журналах из перечня ВАК («Трение и износ», «Вестник РГУПС», «Физическая мезомеханика»), а также в высокорейтинговых международных журналах «Polymers» (Q1, Scopus) и «Coatings» (Q2, Scopus). Тематика публикаций полностью соответствует содержанию диссертации. Кроме того, результаты докладывались на 6 конференциях, включая международные. В этих публикациях представлены основные экспериментальные и расчётные данные, что позволяет независимым исследователям оценить обоснованность сделанных выводов. Таким образом, все основные положения диссертации опубликованы.

## **8. Соответствие паспорту специальности**

Диссертация Шкалея И.В. посвящена исследованию трибологических и механических свойств модифицированных вязкоупругих полимерных материалов и полностью соответствует шифру научной специальности 2.5.3 «Трение и износ в машинах». Пункты паспорта специальности, которым соответствует работа:

2. Механика и физика контактного взаимодействия при трении скольжения с учётом строения, качества и свойств поверхностных слоёв.

7. Триботехнические свойства материалов, покрытий и модифицированных поверхностных слоёв.

16. Материалы трибологического назначения. Исследования и разработка.

Таким образом, диссертация Шкалея И.В. в полной мере соответствует паспорту научной специальности 2.5.3 «Трение и износ в машинах», а её

содержание, методы и результаты полностью отражают область исследований, определённую данной специальностью.

## 9. Замечания

1. В тексте главы 2 нет четкого объяснения выбора толщины сверхвысокомолекулярного полиэтилена. Чем обусловлен выбор толщин покрытия СВМПЭ 300 и 600 мкм?

2. На стр. 54 представлен рисунок 2.6 «Деформационная составляющая сила трения от скорости скольжения». Целесообразно представить в работе методику расчета деформационной составляющей силы трения.

3. Применяемая автором упрощенная модель трения (адгезионная, деформационная) не учитывает различные виды фрикционной взаимодействия. Например, возможные процессы разрушения исходной модификации СВМПЭ (изменения сетки молекулярных зацепления, надмолекулярной структуры и др.), связанные с химическими и структурными превращениями в результате фрикционного нагрева. Также не следует исключать микрорезание поверхности композиционных резиновых образцов с СВМПЭ покрытием.

4. Анализируемые трибологические испытания следовало бы дополнить анализом дорожек трения, спектральным анализом продуктов износа. В случае невозможности фиксирования изменений поверхностей СВМПЭ после испытаний (качественные, количественные методики), необходимо указать в тексте диссертации причину отсутствия разделов, связанных с анализом процессов износа исследуемых пар трения.

## 10. Заключение

Диссертация Шкалея И.В. «Трибологические и механические свойства модифицированных вязкоупругих полимерных материалов с микро- и наноразмерными поверхностными слоями», является научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную тему и имеющее как теоретическое, так и прикладное значение.

Автором успешно решены все поставленные задачи: разработан метод определения оптимальной толщины покрытия СВМПЭ на резиновой подложке; проведены трибологические испытания двухслойного композита в условиях конформного контакта с учётом термического старения и внешней температуры; разработан теоретико-экспериментальный подход для определения вязкоупругих свойств полиуретанов; выявлены оптимальные режимы ионно-плазменной обработки для обеспечения стабильных фрикционных характеристик, что имеет существенное значение для машиностроительной отрасли страны.

Работа обладает научной новизной и практической значимостью, выполнена на высоком методическом и теоретико-экспериментальном уровне. Качественное

техническое оформление (достаточное количество графиков, рисунков, таблиц), чёткое и корректное изложение материала диссертации с приведением результатов расчетов отражают цель диссертационной работы. Сформулированные научные задачи успешно решены, что позволяет сделать вывод о завершённости работы.

Диссертация Шкалея И.В. выполнена самостоятельно на высоком научном уровне. Работа соответствует установленным требованиям к оформлению и структуре диссертации. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

Диссертация соответствует критериям «Положения о присуждении ученых степеней» (п. 9-11,14), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Шкалей Иван Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.3 Трение и износ в машинах.

#### Официальный оппонент:

Зайцев Андрей Николаевич – кандидат технических наук по специальности 05.02.04 Трение и износ в машинах, доцент кафедры МТ1 «Металлорежущие станки» ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Зайцев Андрей Николаевич

«14» мая 2026 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1

Тел.: +7926471-69-24

e-mail: zaytsev\_a@bmstu.ru, odin221@yandex.ru

Подпись к.т.н., доц. Зайцева А.Н. заверяю



« ВЕРНО »

НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА  
  
 КИНЯПИНА А.Н.  
 ОТДЕЛ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ  
 ЕДИНОЙ ПРИЕМНОЙ УКСИ  
 М ГТУ ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА