

О Т З Ы В

официального оппонента

член-корреспондента РАН, доктора технических наук, профессора

Панина Сергея Викторовича

на диссертационную работу Шкалея Ивана Владимировича

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

1. Актуальность темы исследования

Диссертационная работа Шкалея И.В. посвящена решению актуальных научно-технических проблем и задач, связанных с улучшением и оценкой трибологических и механических свойств модифицированных полимерных материалов.

При длительном воздействии отрицательных температур производительность техники в северных регионах РФ снижается, причём значительная доля отказов связана с неудовлетворительной работой уплотнительных узлов из высокоэластичных материалов (резин). Традиционно применяемые в промышленности марки резин обладают хорошими демпфирующими свойствами, но имеют высокий коэффициент трения и недостаточную износостойкость. В связи с этим разработка композиционных материалов, сочетающих демпфирующие свойства эластомерной основы с антифрикционными характеристиками тонких покрытий из сверхвысокомолекулярного полиэтилена, является важной и своевременной задачей. Актуальность работе придаёт комплексный подход к изучению трибологических и механических свойств этих композитов с учётом фрикционного разогрева, термического старения и влияния внешней температуры.

Другим актуальным направлением являются исследования реологических свойств полиуретанов с углеродными наномодификаторами и карбонизированными поверхностными нанослоями, прежде всего в ключе их взаимосвязи с трибологическими свойствами.

Тематика работы соответствует приоритетным направлениям развития техники в области трибологии и материаловедения, что подтверждается поддержкой грантами РФФИ (№ 18-19-00574 и № 23-19-00484). Таким образом, диссертационное исследование является актуальным.

2. Научная новизна исследований и результатов

В диссертационной работе Шкалея И.В. получен ряд новых научных результатов, имеющих существенное значение для развития трибологии полимеров и механики контактного взаимодействия:

- впервые обосновано влияние толщины покрытия из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) на трение двухслойного композита «резина – СВМПЭ» с учётом фрикционного разогрева. На основе разработанной численной модели впервые установлено, что для каждого типа нагружения существует оптимальная толщина покрытия, обеспечивающая рациональное сочетание демпфирующих и антифрикционных свойств;

- установлены закономерности влияния термического старения на трибологические характеристики композита в условиях конформного контакта (кольцо-диск), моделирующего работу уплотнительных узлов;

- разработан новый комплексный подход к определению вязкоупругих свойств полимеров по данным инструментального индентирования сферическим индентором при линейном нагружении, позволяющий рассчитывать длительный и мгновенный модули упругости, а также времена релаксации и ползучести. С использованием этого метода впервые получены зависимости механических и реологических свойств растворного полиуретана с различными наполнителями от температуры;

- обнаружена взаимосвязь типа литьевого полиуретана и режима ионно-плазменной обработки, обеспечивающая стабильно высокий коэффициент трения в широком диапазоне нагрузок и скоростей. Впервые показано, что поверхностная обработка может как снижать трение (за счёт экранирования адгезии жёстким карбонизированным слоем), так и повышать его (за счёт увеличения шероховатости и перехода к дискретному контакту), что открывает новые возможности для управления фрикционными свойствами полимеров.

Совокупность этих результатов представляет собой существенный вклад в понимание механизмов фрикционного взаимодействия модифицированных высокоэластичных полимерных материалов.

3. Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций

Диссертация Шкалея И.В. характеризуется высокой степенью обоснованности научных положений и достоверности полученных выводов, что обеспечивается:

- корректным выбором и применением современных экспериментальных методов. Автор использовал комплекс взаимодополняющих методик: инструментальное индентирование на твердомере «Наноскан-4D» и трибометрах UMT-2, UMT-3, MFT-5000; оптическую профилометрию (S neox). Все экспериментальные методики основаны на государственных и международных стандартах, что говорит о корректности полученных данных;

- достаточным объёмом экспериментальных данных и их статистической обработкой. Каждая серия испытаний проведена на 3–5 идентичных образцах, что обеспечивает воспроизводимость результатов. Для анализа трибологических испытаний полиуретанов применён метод ортогонального центрального композиционного планирования (ОЦКП), позволяющий получить статистически значимые уравнения регрессии с проверкой по критериям Стьюдента и Фишера (уровень значимости 0,05). Это исключает случайный характер полученных зависимостей;

- сходимостью теоретических и экспериментальных результатов. Разработанные численные модели (контактная задача для двуслойного основания с учётом вязкоупругости, тепловая задача стационарного нагрева) верифицированы путём сравнения с экспериментальными данными;

- логичностью и непротиворечивостью выводов. Каждый вывод опирается на совокупность экспериментальных данных и расчётов, не противоречит известным положениям трибологии полимеров (адгезионно-деформационная природа трения, влияние скорости и температуры на вязкоупругие материалы) и расширяет их новыми количественными закономерностями.

Таким образом, научные положения, выводы и рекомендации диссертации являются полностью обоснованными, что позволяет рекомендовать их для практического использования.

4. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Достоверность результатов, полученных в диссертационной работе Шкалея И.В., обеспечивается комплексным подходом к исследованию, сочетающим современные экспериментальные методы, физико-математическое моделирование и строгую статистическую обработку данных.

Все трибологические испытания проведены на высокоточных машинах трения с использованием стандартизованных схем нагружения (шар–диск, кольцо–диск). Для каждого режима испытаний выполнено не менее трёх параллельных измерений, причем имеет место повторяемость результатов.

Разработанные численные модели контактного взаимодействия (скольжение сферы по двухслойному вязкоупругому основанию с учётом фрикционного нагрева) прошли верификацию путём сопоставления с экспериментальными данными. Автором показано, что расчётные зависимости глубины вдавливания от нагрузки, а также температурные поля в зоне контакта хорошо согласуются с измерениями. Модель стандартного вязкоупругого тела адекватно описывает экспериментальные кривые нагружения при индентировании полиуретанов во всём исследованном диапазоне температур и скоростей нагружения.

Для анализа трибологических характеристик полиуретанов использовался метод ортогонального центрального композиционного планирования эксперимента, позволяющий получить достоверные уравнения регрессии. Все значимые коэффициенты регрессии проверены по критерию Стьюдента, а адекватность моделей – по критерию Фишера (уровень значимости 0,05). Это подтверждает неслучайный характер полученных зависимостей.

Таким образом, совокупность перечисленных факторов позволяет считать научные положения, выводы и рекомендации диссертации достоверными.

5. Значимость выводов и рекомендаций для науки и практики

Диссертационная работа Шкалея И.В. имеет существенное значение для развития трибологии полимеров и механики контактного взаимодействия, а также для практического применения в машиностроении.

Теоретическая значимость результатов заключается в следующем:

- развитие методов моделирования трения вязкоупругих тел с покрытиями. Использованная модель скольжения шара по двухслойному композиционному материалу учитывает вязкоупругие свойства подложки, жёсткость и толщину покрытия, а также фрикционный разогрев. В сочетании с результатами эксперимента модель позволяет оценить адгезионную и деформационную составляющие силы трения, что важно для понимания физических механизмов трения полимеров;

- создание нового экспериментально-теоретического подхода к определению вязкоупругих свойств материалов. Предложенный метод обработки кривых индентирования с линейной скоростью нагружения на основе модели стандартного вязкоупругого тела расширяет инструментарий механики полимеров. Метод позволяет определять длительный и мгновенный модули упругости, времена релаксации и

ползучести, что особенно ценно для мягких материалов, где традиционные испытания могут быть затруднены;

- установление новых закономерностей влияния углеродных нанонаполнителей на температурную чувствительность полиуретанов. Обнаруженный факт, что немодифицированный полиуретан практически не меняет жёсткость в диапазоне 24–45 °С, тогда как материалы с нанотрубками и фуллеренами демонстрируют значительное (до 20 %) изменение модуля, имеет фундаментальное значение для физики полимерных композитов;

- обоснование роли шероховатости и дискретности контакта в адгезионном трении полимеров. На примере литевых полиуретанов с разной жёсткостью показано, как поверхностная обработка через изменение «наногеометрии» и образование карбонизированного слоя влияет на переход от сплошного к дискретному контакту и, соответственно, на коэффициент трения. Это развивает представления молекулярно-механической теории трения.

Практическая значимость работы подтверждается следующим:

- разработанный метод определения оптимальной толщины покрытия СВМПЭ на резиновой подложке позволяет инженерам для конкретных узлов трения подбирать покрытие, обеспечивающее необходимое сочетание демпфирующих и антифрикционных свойств.

- двухслойный композит «резина – СВМПЭ» рекомендован для использования в узлах трения, защищённых от ультрафиолетового излучения, при значительном перепаде температур (от –20 до +60 °С). Его применение позволяет снизить коэффициент трения в среднем в 2 раза по сравнению с чистой резиной и существенно повысить износостойкость, что увеличивает ресурс уплотнений;

- при расчёте напряжённо-деформированного состояния медицинских имплантатов, изготовленных из полиуретанов с углеродными наполнителями, необходимо учитывать влияние температуры на их механические свойства;

- выявленный режим ионно-плазменной обработки (флюенс 10^{15} ион/см²) для полиуретана с длительным модулем 6,1 МПа обеспечивает стабильно высокий коэффициент трения (1,82–2,44), что может быть использовано при создании устройств, требующих высокого сцепления (например, специальная обувь, элементы текстильного оборудования).

Таким образом, результаты диссертации имеют как несомненную теоретическую ценность, так и практическую направленность, подтверждённую актом практического применения.

6. Оценка структуры диссертации

Диссертация построена по классическому принципу и содержит 131 страницу, включая введение, четыре главы, заключение, список литературы из 216 наименований и два приложения. Такая структура полностью обеспечивает логичную последовательность изложения.

Во введении обоснована актуальность темы, показана степень разработанности проблемы, сформулированы цель и задачи, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, основные положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации и публикациях. Введение написано чётко и информативно.

Глава 1 содержит обзор литературы по трём ключевым направлениям: полимерные материалы (с акцентом на полиуретаны и композиты на основе резины и СВМПЭ), трение полимеров и реология полимерных материалов. Автор демонстрирует глубокое знание предмета, анализируя как классические работы (Бартенев Г.М., Боуден Ф.П., Крагельский И.В., Тейбор Д.), так и современные исследования российских и зарубежных учёных.

Глава 2 посвящена исследованию двухслойного композита «резина – СВМПЭ». Подробно описаны материалы и технология изготовления, методы исследования (термическое старение, индентирование, конфокальная микроскопия, трибологические испытания, численное моделирование). Результаты представлены наглядно (рисунки, графики, таблицы) и сопровождаются содержательным анализом. Особого внимания заслуживает сочетание расчётной модели с экспериментальными данными.

Глава 3 посвящена исследованию вязкоупругих свойств модифицированных полиуретанов в зависимости от температуры. Детально изложена разработанная автором методика определения реологических параметров по кривым индентирования. Представлены результаты для трёх типов материалов (без наполнителя, с нанотрубками, с фуллеренами) в диапазоне температур 24–45 °С. Анализ влияния карбонизированного слоя выполнен корректно.

Глава 4 содержит исследование влияния ионно-плазменной обработки на фрикционные характеристики литьевых полиуретанов. Использован метод ортогонального центрального композиционного планирования эксперимента, что позволило получить статистически обоснованные уравнения регрессии и построить изолинии коэффициента трения. Результаты интерпретированы с позиций молекулярно-механической теории трения.

Заключение лаконично и чётко суммирует основные выводы по каждой задаче, соответствует поставленным задачам. Приложения содержат полезные данные об упруго-прочностных свойствах материалов и акт практического применения.

Недостатков в структуре и логике изложения не выявлено. Работа написана технически грамотным языком, иллюстративный материал качественный и информативный.

7. Полнота изложения материалов в открытой печати

Основные результаты диссертации опубликованы в 9 печатных работах, из которых 3 статьи в журналах из перечня ВАК, 2 статьи в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science, а также тезисы докладов на 6 международных и всероссийских конференциях. Публикации охватывают все ключевые аспекты работы: трибологические испытания композита «резина – СВМПЭ» с учётом старения, метод индентирования для определения вязкоупругих свойств полиуретанов, влияние ионно-плазменной обработки на триботехнические характеристики полиуретана. В совместных публикациях личный вклад соискателя чётко обозначен. Таким образом, материалы диссертации представлены в открытой печати достаточно полно и прошли необходимую апробацию.

8. Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертационная работа Шкалея И.В. выполнена в рамках специальности 2.5.3 «Трение и износ в машинах» и полностью соответствует её паспорту по следующим направлениям исследований (согласно паспорту специальности):

п. 2 – «Механика и физика контактного взаимодействия при трении скольжения с учётом строения, качества и свойств поверхностных слоёв»: автором подробно исследовано трение скольжения для двух типов модифицированных поверхностных слоёв – покрытия из СВМПЭ на резиновой подложке (глава 2) и карбонизированного нанослоя на полиуретанах (главы 3, 4). Проведен анализ свойств поверхностных слоёв: толщины, жёсткости, шероховатости;

п. 7 – «Триботехнические свойства материалов, покрытий и модифицированных поверхностных слоёв»: определены коэффициенты трения для двухслойного композита «резина – СВМПЭ» в зависимости от толщины покрытия, скорости, нагрузки, температуры и старения (глава 2), а также для литевых полиуретанов с карбонизированными нанослоями, полученными ионно-плазменной обработкой (глава 4). Исследованы механические свойства (модули упругости) и реологические параметры полиуретанов с углеродными нанонаполнителями (глава 3);

п. 16 – «Материалы трибологического назначения. Исследования и разработка»: работа направлена на исследование новых полимерных композиционных материалов с улучшенными трибологическими свойствами – двухслойного композита «резина – СВМПЭ» для уплотнений, работающих в условиях холодного климата, и модифицированных полиуретанов (объёмное наполнение углеродными нанотрубками и фуллеренами, а также поверхностная ионно-плазменная обработка) для применения в узлах трения и биомедицине.

Таким образом, диссертационная работа полностью соответствует паспорту научной специальности 2.5.3 – Трение и износ в машинах по всем ключевым направлениям исследований, а также по области науки (технические) и отрасли науки (машиностроение). Содержание работы, цель, задачи и полученные результаты в полной мере отражают специфику данной специальности.

9. Замечания

1. При описании практической значимости работы автор сообщает: «определена оптимальная комбинация жесткости (длительный приведенный модуль упругости 6,1 МПа, мгновенный – 8,8 МПа) и поверхностной ионно-плазменной обработки (флюенс 10^{15} ионов/см²) 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)». Все-таки фрикционные свойства – это, прежде всего коэффициент трения и интенсивность изнашивания; поэтому увязывать напрямую жесткость (реализуемый при заданной величине флюенса) с коэффициентом трения без учета процессов на поверхности трибоконтакта (включая износ), не совсем правильно.

2. В работе использованы крайне короткие времена или дистанции испытаний, например, 10 минут или 1,5 м. Для получения оценки коэффициента трения – это удобно; однако, при таких условиях испытаний стадии приработки может даже не закончиться. Кроме того, узлы трения традиционно предназначены для длительной эксплуатации, поэтому выбранные условия трибоиспытаний являются дискуссионными. Более того, в методической главе сообщается, что при трибоиспытаниях «износ не оценивался». Это весьма странно, поскольку он может оказывать существенное влияние на значение коэффициента трения, величина которого была использована как для оценки эффективности созданных материалов, так и для теоретических исследований.

3. На стр. 51 текста диссертации указано: «Структура поверхности СВМПЭ и покрытия отличается из-за различий в технологии формирования», что хорошо коррелирует с данными на рис. 2.3. В этой связи возникает вопрос, насколько корректно проводить сравнения трибологических свойств, когда менялись не только условия опирания (толщина СВМПЭ-покрытия составляла 300 и 600 мкм), но и структура объемного СВМПЭ (имела пористое строение)?

4. На стр. 63 приведены данные о количестве вводимых в полиуретан нанотрубок (5 %) и фуллеренов (2%). Далее делается вывод что нанотрубки увеличивают жесткость «растворного полиуретана», а фуллерены уменьшают. Во-первых, в работе не обоснован выбор содержания каждого из наполнителей, тем более что он отличался. Во-вторых, не совсем очевидно, какую цель преследовал автор, упрочнить или разупрочнить композит, учитывая тот факт, что исследования по введению данных типов наполнителей в литературе встречаются.

5. На стр. 73 диссертации приведены диаграммы наноиндентирования образцов с карбонизированным слоем толщиной 80 нм, в то время как глубина проникновения индентора составляет 40 мкм, что в 50 раз более заявленной толщины. В подобных условиях с методической точки зрения не совсем корректно обсуждать влияние столь тонкого слоя на результаты наноиндентирования. Кроме того, облучение могло повлиять не только на тонкий поверхностный слой, что в работе не исследовано.

6. На стр. 75 диссертации в таблице 3.2 приведены средние значения длительного модуля упругости, времен релаксации и ползучести. Однако не указаны величины разброса каждого из параметров, что существенно затрудняет понимание статистической ценности приведенных данных.

7. На стр. 78 на рис. 3.7 приведено «АСМ-изображение поверхности площадью 400 мкм², обработанной ионами азота с энергией 20 кэВ с флюенсом 10^{16} ионов/см²». Видно, что помимо обсуждаемого автором образования функциональных групп на поверхности возникают складчатые структуры. Их возникновение может иметь и термическую природу. Кроме того, это заметно влияет на топографию поверхности, и, следовательно, на трибологические свойства. К сожалению, в работе это не обсуждается.

10. Заключение

Диссертация Шкаляева Ивана Владимировича «Трибологические и механические свойства модифицированных вязкоупругих полимерных материалов с микро- и наноразмерными поверхностными слоями» является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научно-техническом уровне. Диссертация содержит решение актуальной научно-технической задачи – исследования новых полимерных композиционных материалов с улучшенными трибологическими и механическими свойствами для узлов трения, работающих в условиях холодного климата и в биомедицинских приложениях. Автором получены новые научные результаты, имеющие существенное значение для развития трибологии полимеров и механики контактного взаимодействия: разработаны и связаны с экспериментом модели скольжения с учётом фрикционного нагрева; предложен новый метод определения вязкоупругих свойств материалов по данным индентирования; установлены закономерности влияния углеродных нанонаполнителей, температуры и ионно-плазменной обработки на трибологические и механические свойства полиуретанов; исследован двухслойный композит «резина – СВМПЭ», обладающий одновременно демпфирующими и антифрикционными свойствами.

Практическая значимость работы подтверждена актом о практическом применении результатов при изготовлении опытных образцов пыльника шарнира равных угловых скоростей и резинового уплотнителя камлока. Разработанные рекомендации по выбору оптимальной толщины покрытия и условиям эксплуатации могут быть использованы при проектировании уплотнительных изделий для арктической техники.

Диссертация соответствует пунктам 9–14 «Положения о присуждении учёных степеней», так как содержит новые научные результаты, изложенные в публикациях автора, и имеет практическую значимость. Структура и содержание работы полностью соответствуют паспорту специальности 2.5.3 – Трение и износ в машинах.

Считаю, что Шкалей Иван Владимирович заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.3 – Трение и износ в машинах.

Официальный оппонент:

Панин Сергей Викторович, член-корреспондент РАН, профессор, заведующий лабораторией механики полимерных композиционных материалов ФГБУН Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, доктор технических наук по специальности 01.02.04 Механика деформируемого твёрдого тела.

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



Панин Сергей Викторович

«23» 04 2026 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения им. В.Е. Панина Сибирского отделения Российской академии наук

634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4

Тел.: +7(3822)286-904, e-mail: svp@ispms.ru

Подпись С.В. Панина заверяю
Ученый секретарь ИФПМ СО РАН
кандидат физико-математических наук




Н.Ю. Матолыгина