

На правах рукописи

骆江坤

Ло Цзянкунь

**РАЗРАБОТКА АНТИФРИКЦИОННЫХ ТРЕХКОМПОНЕНТНЫХ
КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИИМИДА И ПОЛИЭФИРИМИДА
С УГЛЕРОДНЫМИ ВОЛОКНАМИ И ТВЕРДОСМАЗОЧНЫМИ
НАПОЛНИТЕЛЯМИ**

2.6.17. Материаловедение

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Томск – 2023

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Панин Сергей Викторович

Официальные оппоненты:

Соколова Марина Дмитриевна, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук», Институт проблем нефти и газа Сибирское отделение Российской академии наук – обособленное подразделение ЯНЦ СО РАН, директор института

Адаменко Нина Александровна, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Волгоградский государственный технический университет», кафедра «Материаловедение и композиционные материалы», профессор

Кропотин Олег Витальевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный технический университет», кафедра «Физика», профессор

Защита состоится 16 марта 2023 г. в 14 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета «НИ ТГУ.2.6.01», созданного на базе химического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36 (учебный корпус № 6 ТГУ, аудитория 402).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» www.tsu.ru.

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ТГУ: <https://dissertations.tsu.ru/PublicApplications/Details/1224a1aa-2c6d-4b17-9e1a-d00c8c805041>

Автореферат разослан « ____ » февраля 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Курзина Ирина Александровна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Полиимид (ПИ) и полиэфиримид (ПЭИ) представляют класс конструкционных материалов с гармоничным сочетанием таких важных физико-механических и функциональных свойств, как высокая тепло- и термостойкость, огнестойкость, химическая, радиационная и фотостойкость, прочность при разрыве и высокий модуль упругости, а также сохранением работоспособности в широком интервале температур. Они находят применение в автомобилестроении, в космической промышленности и самолетостроении, в медицине и др. Однако, несмотря на все присущие им достоинства, ПИ и ПЭИ весьма редко применяются для изготовления деталей трибоузлов, поскольку в ненаполненном виде испытывают значительный износ при сухом трении скольжения. Повышение сопротивления изнашиванию ПИ и ПЭИ композитов является **актуальной** научно-технической проблемой.

Создание многокомпонентных композитов, в которых каждый наполнитель выполняет определенную функцию, является эффективным подходом. Исследования в рамках тематики настоящей диссертации ориентированы на приложения к разработке антифрикционных материалов для машиностроения, включая высокотемпературные высоконагруженные узлы трения (подшипники, шестерни, зубчатые передачи), а также уплотнительные (насосы, клапаны, задвижки) для металло- и керамополимерных трибосопряжений.

Степень разработанности темы исследования. Заметный вклад в исследования структуры, а также механизмов изнашивания и повышения износостойкости ПИ и ПЭИ внесли P. Samyn, Jayashree Bijwe, Zhong Zhang, Qihua Wang, Tingmei Wang, Fengyuan Yan, Shao-Yun Fu, С.Д. Колошкин, Ф.С. Сенатов, Н.А. Адаменко и др. Однако, несмотря на большое количество опубликованных работ, в настоящее время известно небольшое число публикаций, посвященных системным исследованиям влияния состава и структуры на механические и триботехнические свойства. Практически отсутствуют обобщенные данные о закономерностях изнашивания ПИ и ПЭИ и композитов на их основе при трении скольжения по различным по составу (твердости и теплопроводности) контртелам при разных условиях (включая схемы трибоконтакта, интервалы температур и разные нагрузочно-скоростные режимы $P*V$).

Целью работы - разработка и определение рационального состава высокопрочных антифрикционных трехкомпонентных композитов на основе ПИ и ПЭИ, наполненных армирующими рубленными или молотыми углеродными волокнами, а также твердосмазочными микрочастицами (ПТФЭ, графит и MoS_2) для эксплуатации в узлах трения без смазочной среды (сухое трение скольжения).

Задачи:

1. Исследовать структуру, а также механические и трибологические характеристики композитов на основе термопластичного полиимида (ПИ), наполненных политетрафторэтиленом (ПТФЭ) и молотыми углеродными волокнами (МУВ, длиной 200 мкм), отожженными с целью увеличения адгезии к полимерной матрице. Разработать трехкомпонентный композит на основе ПИ для применения в безсмазочных узлах трения скольжения металло- и керамо-полимерных

трибосопряжений (точечный контакт) при различных нагрузочно-скоростных режимах.

2. Определить рациональный состав антифрикционного композита на основе ПИ, наполненного твердосмазочными частицами различной природы (полимерные - ПТФЭ, кристаллические - графит и MoS_2) и одновременно армированных отожжёнными рубленными углеродными волокнами (РУВ, $l=2$ мм), для применения в узлах трения в условиях металло-полимерных и керамо-полимерных трибосопряжений. Оценить влияние типа твердосмазочного наполнителя на сопротивление изнашиванию в зависимости от типа трибоконтакта (точечный/линейный).

3. Провести сопоставительное сравнение структуры и трибологических характеристик при точечном контакте трехкомпонентных композитов на основе ПИ и ПЭИ, наполненных частицами ПТФЭ, графита и MoS_2 , а также армированных РУВ ($l=2$ мм), при повышенных температурах испытаний $T=23-180(240)$ °С. Изучить закономерности формирования пленки переноса на контртеле и трибопленки на поверхности скольжения полимерных композитов в зависимости от типа полимерной матрицы и температуры трибоиспытаний.

4. Провести сопоставительное сравнение трибологических характеристик трехкомпонентных композитов на основе ПИ и ПЭИ, наполненных частицами ПТФЭ, графита и MoS_2 , а также армированных РУВ, при трибоиспытаниях по схеме «вал-колодка» (линейный контакт) при комнатной температуре $T=23$ °С при варьировании нагрузочно-скоростных режимов. Выявить закономерности формирования и роль трибослоя в обеспечении триботехнических свойств.

Научная новизна исследования

1. В работе впервые обобщены и систематизированы закономерности формирования структуры, а также механических и трибологических свойств при сухом трении скольжения по металлическому и керамическому контртелам трехкомпонентных композитов на основе ПИ, наполненных политетрафторэтиленом (ПТФЭ) и молотыми углеродными волокнами (МУВ, $l=200$ мкм), отожженными с целью увеличения адгезии к полимерной матрице.

2. Впервые установлена роль трибопленки на поверхности скольжения в формировании трибологических свойств высокопрочных антифрикционных композитов на основе ПИ и ПЭИ в диапазоне температур испытаний $23 \div 180-240$ °С в зависимости от типа твердосмазочного наполнителя. Установлено влияние типа полимерной матрицы в закреплении трибопленки на поверхности скольжения трехкомпонентных композитов на основе ПИ и ПЭИ при испытаниях в условиях точечного контакта (по схеме «шар-по-диску»).

3. Для линейного трибоконтакта (схема «вал-колодка») в условиях высокой шероховатости контртела ($R_a=0,2-0,3$ мкм) определены закономерности формирования трибослоя, обеспечивающего для высокопрочных антифрикционных композитов на основе ПИ и ПЭИ кратное повышение сопротивления изнашиванию в интервале нагрузок ($P=10-180$ Н) и скоростей ($V=0,1-0,5$ м/с) для металло- и керамо-полимерных трибосопряжений.

Теоретическая значимость диссертации. Результаты, представленные в диссертационной работе, расширяют научные представления в области

материаловедения и заключаются в выявлении закономерностей формирования структуры и механизма повышения сопротивления изнашиванию композитов на основе ПИ и ПЭИ в условиях сухого трения скольжения по стальному и керамическому контртелам в разных условиях (схемы испытаний, высокие температуры, варьирование нагрузки и скорости скольжения). Для различных режимов трибоиспытаний обоснована возможность повышения износостойкости ПИ и ПЭИ путем одновременного введения армирующих отожжённых углеродных волокон и твердосмазочных частиц (ПТФЭ либо графит, MoS_2). Получил дальнейшее развитие подход к проектированию многокомпонентных антифрикционных ПИ- и ПЭИ-композиций с заданными механическими трибологическими свойствами.

Практическая значимость диссертации. Трехкомпонентные композиты на основе термопластичных ПИ и ПЭИ, наполненные армирующими углеволокнами (УВ) и твердосмазочными частицами (ПТФЭ, графит, MoS_2) рекомендуются для изготовления деталей, работающих в металло-полимерных и керамополимерных узлах трения в отсутствие смазочной среды при разных условиях эксплуатации (различные схемы трибоконтакта, высокие температуры, различные нагрузки и скорости): поршневые уплотняющие кольца, подшипники скольжения, шестерни, рабочие колеса наносов, зубчатые колеса, вентили, детали двигателей (уплотнения) с обеспечением высокой износостойкости и повышенных температур эксплуатации.

Методология и методы диссертационного исследования.

Основными методами исследования в работе являются растровая электронная микроскопия, оптическая микроскопия, дифференциальная сканирующая калориметрия, рентгенофазовый анализ, наноиндентирование, скрэтч-тестирование. Использованы методы измерения физико-механических свойств и триботехнические испытания, а также методы планирования эксперимента и статистической обработки данных.

Положения, выносимые на защиту:

1. Атмосферный отжиг армирующих молотых углеродных волокон является эффективным способом повышения прочностных (модуль упругости возрастает с 4,5 до 5,2 ГПа) и триботехнических свойств (интенсивность изнашивания при точечном металло-полимерном контакте снижается до 3-х раз) трехкомпонентного композита ПИ/10ПТФЭ/10МУВ, что обусловлено повышением шероховатости поверхности и лучшим сцеплением с полимером, и, в свою очередь, благоприятствует удерживанию волокон в матрице и минимизирует возможность вырывания их фрагментов с последующим микроабразивным воздействием на поверхность трения.

2. Определяющая роль типа твердосмазочного мелкодисперсного наполнителя на сопротивление изнашиванию трехкомпонентных высокопрочных антифрикционных ПИ-композиций, заключающаяся в том, что при точечном контакте и низкой шероховатости контртела $R_a=0,02$ мкм наличие ПТФЭ за счет формирования пленки переноса и трибопленки повышает сопротивление изнашиванию до 290 раз для трения по стали ШХ15 и до 285 раз – по керамике ZrO_2 . При линейном контакте и высокой шероховатости контртела $R_a=0,2$ пленка переноса не способна закрепится на поверхности контртела и максимальной

износостойкость достигается введением графита, когда сопротивление изнашиванию при трении по стали ШХ15 композита ПИ/10УВ/10Гр возрастает до 60 раз.

3. Формирование и закрепление пленки переноса на поверхности контртела и трибопленки на поверхности скольжения композита играют определяющую роль в формировании трибологических свойств трехкомпонентных высокопрочных твердосмазочных композитов на основе ПИ и ПЭИ в интервале температур испытаний $T=23\div 180(240)^\circ\text{C}$ при точечном трибоконтате с керамическим контртелом. В случае композита ПЭИ/10УВ/10ПТФЭ это обеспечивает стабильно низкий коэффициент трения $\sim 0,1$ и интенсивность изнашивания $I > 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$ в диапазоне $T=23\div 180^\circ\text{C}$, тогда как когда при более высоких температурах $T > 180^\circ\text{C}$ (и до 240°C) устойчивая пленка формируется и закрепляется на поверхности скольжения композита ПИ/10РУВ/23MoS₂ за счет развития процессов окисления.

4. Механизм повышения сопротивления изнашиванию высокопрочных трехкомпонентных антифрикционных композитов на основе ПИ и ПЭИ в условиях линейного трибоконтата (схема «вал-колодка»), основанный на формировании армированного разрушенными РУВ трибослоя, защищающего поверхность скольжения полимерного композита от режущего и пропахивающего воздействия неровностей на поверхности металлического/керамического контртел с $R_a=0,2 \text{ мкм}$, закономерности формирования которого определяются нагруженными скоростными режимами трибоиспытаний ($P \cdot V$).

Степень достоверности исследования. Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается использованием современных исследовательских методов и оборудования, систематическим характером проведения экспериментов и измерений, статистической обработкой данных, результатами моделирования процессов изнашивания, а также согласованностью полученных результатов с данными подобных работ других авторов.

Апробация результатов. Результаты данной работы были представлены на всероссийских и международных семинарах и конференциях: XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, г. Уфа, 19-24 августа 2019 г; Международная научно-техническая конференция «Полимерные композиты и трибология» (Поликомтриб-2019) 25–28 июня 2019 г., Гомель, Беларусь; 10-ая международная научно-техническая конференция «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства», 26 – 29 февраля 2020 года, Омск, Россия; 2020 International Conference on Engineering Tribology and Applied Technology (ICETAT 2020). November 6-8, 2020, Chiayi, Taiwan; XIV Международная конференция «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций», 9-13 ноября 2020 г., Екатеринбург, XXVII Всероссийская конференция по численным методам решения задач теории упругости и пластичности, посвященная 100-летию со дня рождения Н.Н. Яненко, 5 – 9 июля 2021 г., Красноярск, Россия; Международная конференция «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии», 6-10 сентября 2021 года, г. Томск, German-Russian Workshop “Russia and Germany in Tribology

and Materials Science” 11 September 2021, Tomsk, Russia; Международная научная конференция «Механика и трибология транспортных систем – 2021», 09-10 ноября 2021 г., Ростов-на-Дону, РФ; V Международная научная конференция «Новые материалы и технологии в условиях Арктики», 14-18 июня 2022 г., г. Якутск; 50th International Summer School Conference “Advanced Problems in Mechanics”, June 20-24, 2022, St. Peterburg, Russia; Международная конференция «Физическая мезомеханика материалов. Физические принципы формирования многоуровневой структуры и механизмы нелинейного поведения», 5-8 сентября 2022 г. Томск, Россия.

Связь работы с научными программами и темами.

Исследования выполнялись в рамках следующих тем: проект фундаментальных исследований государственных академий наук № III.23.1.3. «Научные основы многоуровневого подхода к мониторингу, оценке механического состояния и диагностике предразрушения конденсированных сред и мягкой материи (soft matter)» (2017-2020 гг.); грантов Президента РФ поддержки ведущих научных школ НШ-5875.2018.8 «Многоуровневый подход к исследованию и разработке структурно-неоднородных материалов, ориентированных на цифровые технологии их изготовления для приложений в медицине, аэрокосмической отрасли и машиностроении» (2018-2019 гг.) и НШ-2718.2020.8 «Иерархически организованные гетеромодульные композиты на металлической и полимерной основах: многоуровневое проектирование, новые методы получения, мониторинг деформационного поведения» (2020-2021 г.).

Личный вклад автора состоит в анализе литературных данных, проведении структурных исследований, а также механических и трибологических испытаний, статистической обработке полученных результатов. Постановка задач, обсуждение всех научных результатов и положений, изложенных в работе, проведено совместно с научным руководителем профессором С.В. Паниным. По результатам исследования написаны статьи в соавторстве и сделаны доклады на научных конференциях.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 6 статей в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (из них 4 статьи в зарубежных научных журналах, входящих в Web of Science, 1 статья в российском научном журнале, переводная версия которого входит в Web of Science, 1 статья в российском научном журнале, переводная версия которого входит в Scopus), 4 статьи в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Scopus, 3 статьи в прочих научных журналах.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Тема и содержание диссертационной работы соответствует научной специальности 2.6.17. Материаловедение: 1) «Теоретические и экспериментальные исследования фундаментальных связей состава и структуры материалов с комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств с целью обеспечения надежности и долговечности материалов и изделий» (п. 1); 2) «Разработка физико-химических и

физико-механических процессов формирования новых материалов, обладающих уникальными функциональными, физико-механическими, эксплуатационными и технологическими свойствами, оптимальной себестоимостью и экологической чистотой» (п. 4).

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка условных обозначений, символов, сокращений и списка литературы из 178 использованных источников, а также 1 приложения. Всего 201 страница, в том числе 76 рисунков и 35 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы исследования, показана степень ее разработанности, определена цель исследований и задачи, решение которых необходимо для её достижения, сформулирована научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, описаны методология и методы исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту, представлена степень достоверности и апробация результатов.

В **первой главе** приведен литературный обзор источников, в которых отражены основные сведения о структуре и механизмах износа ПИ и ПЭИ. Рассматриваются различные способы повышения механических и трибологических характеристик композитов на основе высокопрочных полимеров, в частности, при наполнении волокнами, микро- и наночастицами, методы повышения адгезии между волокнами и матрицей.

Во **второй главе** описаны материалы и методы исследования. В работе использовали порошки ПИ (Solver PI-Powder 1600) и ПЭИ (Solver PEI ROON, Китай) со средним размером частиц 16 и 20 мкм, соответственно. В качестве армирующих наполнителей вводили молотые углеродные волокна (МУВ), $l=200$ мкм, $\varnothing=7,5$ мкм (ООО «ЗУКМ», Челябинск); рубленные углеродные волокна (РУВ), $l=2$ мм (ООО «ЗУКМ», Челябинск). В качестве твердосмазочных наполнителей применяли мелкодисперсный порошок «Флуралит», получаемый термическим разложением фторопласта Ф-4 (ООО - Флуралит синтез, средний диаметр менее 3 мкм); коллоидный графит марки С-1 с размером частиц 1-4 мкм (ООО «Графит Сервис», Россия); дисульфид молибдена MoS_2 с размером частиц 1-7 мкм (Climax Molybdenum, США).

Твердость по Шору D оценивали на приборе «Instron 902». Механические свойства исследовали при испытаниях на растяжение образцов в форме двойной лопатки на электромеханической машине «Instron-5582» (Instron, США).

Трибоиспытания при точечном контакте проводили по схеме «шар-поддису» на трибометре CSEM CH2000 (CSEM, Швейцария) при нагрузке $P=5-15$ Н (контактное давление P_{max} до 417,5 МПа, соответственно) и скорости скольжения $V=0,1-0,6$ м/с. Дистанция испытания составляла 1 км, радиус траектории вращения – 16 мм. Радиус контртел в виде шариков из стали ШХ15 и керамики ZrO_2 составлял 6 мм (стандарт ASTM G99). Шероховатость поверхности контртела составляла $R_a=0,02$ мкм. Трибоиспытания при линейном контакте проводили на машине трения 2070 СМТ-1 (ПО «Точприбор», г. Иваново) по схеме «вал – колодка», стандарт ASTM G 77-98. На образец действовала нагрузка $P=60-$

180 Н (контактное давление P_{\max} до 66,9 МПа и 115,8 МПа, соответственно), и скорость скольжения задавалась варьировали от $V=0,1-0,5$ м/с. Контртело из стали ШХ15 и керамики ZrO_2 в форме диска имело диаметр 35 мм. Шероховатость поверхности составляла $R_a=0,23 \pm 0,03^\circ$ мкм. Измерения температуры контртела выполняли ИК-термометром СЕМ DT-820 (Shenzhen Everbest Machinery Industry Co., Ltd., Китай).

Анализ топографии поверхностей дорожек трения проводили на оптическом микроскопе Neophot 2 (Carl Zeiss, Jena, Германия). Структурные исследования выполняли на растровом электронном микроскопе LEO EVO 50 Carl Zeiss, Германия в ЦКП «Нанотест» ИФПМ СО РАН.

В третьем главе описаны результаты исследований структуры, механических и трибологических свойств ПИ-композитов, наполненных отожжёнными МУВ и мелкодисперсным порошком «Флуралит» в условиях металло- и керамополимерных трибосопряжений и варьировании нагрузочно ($P=5-15$ Н) -скоростных ($V=0,1-0,6$ м/с) режимов испытаний (схема «шар-по-диску»).

В таблице 1 представлены физико-механические свойства композитов. Видно, что введение ПТФЭ снижает на 10%, а МУВ - увеличивает модуль упругости до 2-х раз. Отжиг углеродных волокон сопровождается снижением твердости и предела прочности по сравнению с композитом с неотожжёнными МУВ. Одновременно модуль упругости повышается на 700 МПа (до 5,2 ГПа).

Таблица 1– Физико-механические свойства ПИ и композитов на его основе

№	Состав композита, вес. %	Плотность ρ , г/см ³	Твердость по Шору D	Модуль упругости E, ГПа	Прочность σ_b , МПа	Удлинение ε , %
1	ПИ	1,37	80,2±0,8	2,60±0,01	110,7±1	13±0,7
2	ПИ/10ПТФЭ	1,41	74,6±1,1	2,54±0,1	77,7±4,5	10,3±0,9
3	ПИ/10МУВ	1,40	81,2±0,2	4,85±0,3	118,1±3,3	6,3±0,1
4	ПИ/10МУВ _{отжиг}	1,40	81,4±0,3	5,15±0,4	114,7±7,2	4,9±0,2
5	ПИ10/ПТФЭ/10МУВ	1,43	78,7±0,9	4,50±0,3	104,3±5,0	4,5±0,1
6	ПИ/10ПТФЭ/10МУВ _{отжиг}	1,44	77,3±0,2	5,21±0,1	96,4±1,7	4,4±0,4

Увеличение модуля упругости при наполнении отожжёнными МУВ обусловлено повышением межфазной адгезии. Сформированная в процессе термообработки шероховатость на поверхности МУВ способствует их лучшему механическому сцеплению с ПИ за счет развитого рельефа (Рисунок 1, а, б). На Рисунок 1, в, г видно, что армирующие волокна распределены достаточно равномерно без преимущественной ориентации. Равномерно распределены и частицы ПТФЭ. Результаты оценки трибологических свойств (Рисунок 2) показали, что введение 10 вес. % ПТФЭ приводит к повышению износостойкости до ≈ 165 раз (по металлическому контртелу) и до ≈ 107 раз (по керамическому шару). Коэффициент трения в обоих случаях снижается до ≈ 4 раз по сравнению с ненаполненным ПИ. Для трехкомпонентных композитов коэффициент трения дополнительно снижается при отжиге МУВ.

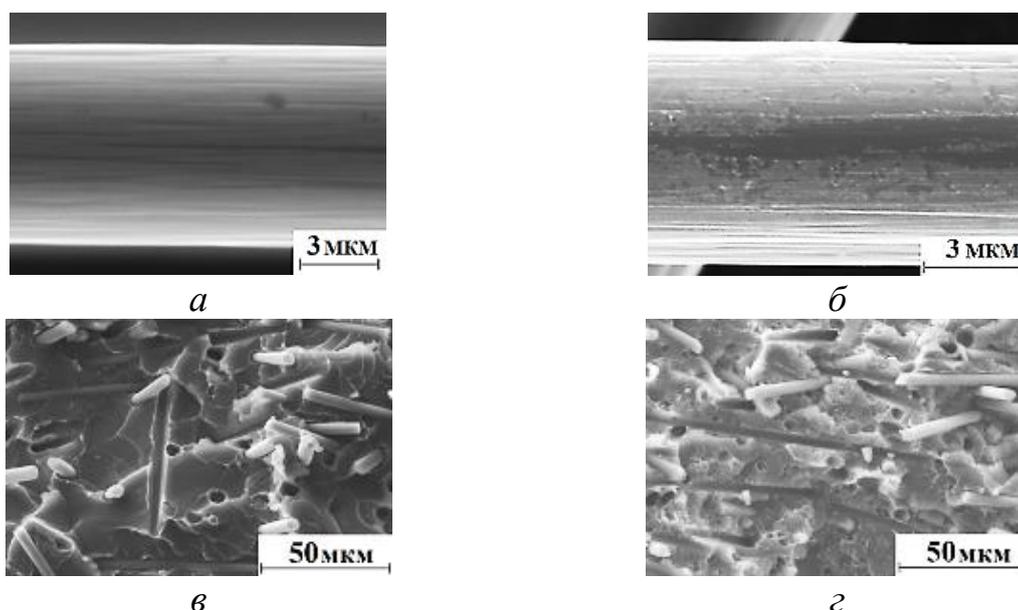


Рисунок 1 - РЭМ-фотографии МУВ исходного (а), МУВ_{отжиг} (б); РЭМ-изображения структуры композитов на основе ПИ: «ПИ +10 вес. % МУВ_{отжиг}» (в) и «ПИ + 10 вес. % ПТФЭ +10 вес. % МУВ_{отжиг}» (г)

Наибольшей износостойкостью обладает композит «ПИ + 10 вес. % ПТФЭ + 10 вес. % МУВ_{отжиг}»: по сравнению с ненаполненным ПИ интенсивность изнашивания снижается до ≈ 312 раз для металло-полимерного и до ≈ 286 раз для керамо-полимерного трибосопряжения. Величины коэффициентов трения в трехкомпонентных композитах для обоих трибосопряжений близки.

Исследованы трибологические характеристики композита «ПИ + 10 вес. % ПТФЭ + 10 вес. % МУВ_{отжиг}» в различных нагрузочно-скоростных режимах ($P \cdot V$). Показано, что увеличение нагрузки является более значимым фактором, влияющим на интенсивность изнашивания вследствие развития процессов микроабразивного изнашивания поверхности полимера.

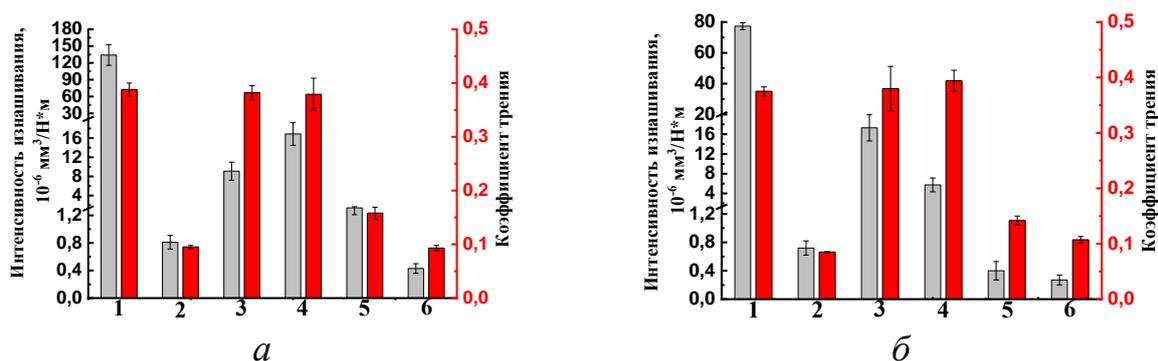


Рисунок 2 - Интенсивность изнашивания и коэффициент трения для ПИ (1) и композитов на его основе: «ПИ + 10 вес. % ПТФЭ» (2), «ПИ + 10 вес. % МУВ» (3), «ПИ +10 вес. % МУВ_{отжиг}» (4), «ПИ + 10 вес. % ПТФЭ + 10 вес. % МУВ» (5), «ПИ + 10 вес. % ПТФЭ + 10 вес. % МУВ_{отжиг}» (6); а – металлическое контртело, б – керамическое контртело

В четвертой главе представлены результаты исследований структуры, механических и трибологических свойств ПИ-композитов, армированных РУВ ($l=2$ мм) и наполненными полимерными частицами ПТФЭ и кристаллическими частицами графита и MoS_2 (Таблица 2).

Проведено сравнение структуры и сопротивления изнашиванию при двух схемах трибоиспытаний, когда шероховатость контртел заметно отличалась. Схема «шар-по-диску» чаще используется в научной литературе, в то время как условия «вал-колодка» ближе к условиям применения композитов в практических узлах трения (уплотнения, опорные подшипники и др.). В таблице 3 представлены физико-механические свойства горячепрессованных ПИ-композитов.

Таблица 2 – Состав трёхкомпонентных композитов на основе ПИ

№	Содержание наполнителя, об. %	Содержание наполнителя, вес. %	Обозначение
1	ПИ	ПИ	ПИ
2	ПИ +8,3%РУВ	ПИ +10%РУВ	ПИ/10РУВ
3	ПИ+8,3%РУВ +6,6%ПТФЭ	ПИ+10%РУВ +10%ПТФЭ	ПИ/10РУВ/10ПТФЭ
4	ПИ+8,3%РУВ +6,6%С	ПИ+10%РУВ +10%С	ПИ/10РУВ/10С
5	ПИ+8,3%РУВ+3,0% MoS_2	ПИ+10%РУВ +10% MoS_2	ПИ/10РУВ/10 MoS_2
6	ПИ+8,3%РУВ +6,6% MoS_2	ПИ+10%РУВ +23% MoS_2	ПИ/10РУВ/23 MoS_2

Таблица 3 – Физико-механические свойства композитов на основе ПИ

Состав композита, вес. %	Плотность, г/см ³	Твердость по Шору D	Модуль упругости E, ГПа	Прочность σ , МПа	Удлинение ϵ , %
ПИ	1,37	80,2±0,8	2,60±0,69	110,7±1,0	13,0±0,7
ПИ/10РУВ	1,42	80,6±0,4	6,40±0,33	152,1±6,4	5,9±0,3
ПИ/10РУВ/10ПТФЭ	1,44	77,5±0,6	5,79±0,45	115,9±10,8	4,1±0,3
ПИ/10РУВ/10С	1,46	80,1±0,3	6,35±0,24	105,0±3,9	2,7±0,1
ПИ/10РУВ/10 MoS_2	1,51	82,0±0,3	6,06±0,32	113,1±9,1	3,0±0,1
ПИ/10РУВ/23 MoS_2	1,67	82,7±0,3	7,56±0,31	118,4±11,9	2,5±0,7

Содержание частиц MoS_2 варьировали по причине того, что его плотность ~2 раза выше, чем остальных твердосмазочных частиц. Поэтому обеспечивали равенство его либо весового (10 вес. %) либо объемного (23 вес. %) содержания. Из таблицы 3 следует, что основные механические характеристики ПИ заметно возрастают при добавлении 10 вес. % РУВ: модуль упругости увеличивается в 2,5 раза, предел прочности в 1,5 раза. Последующее добавление твердосмазочных частиц незначительно снижает деформационно-прочностные характеристики.

Проведен анализ структуры ПИ-композитов (Рисунок 3). Видно, что введение частиц флуоралита сопровождается формированием в полимерной матрице микропор различного размера диаметром менее 10 мкм (Рисунок 3, а). При добавлении наряду с РУВ кристаллических микрочастиц С и MoS_2 в количестве 10 вес. % наблюдается формированием выраженной гетерогенной структуры, в

которой армирующие волокна не имеют преимущественной ориентации (Рисунок 3, б, в, г).

На рисунке 4, а, б представлены трибологические характеристики трёхкомпонентных ПИ-композитов при трении по обоим типам контртел (схема «шар-по-дису», $R_a \sim 0,02$ мкм). Самый низкий износ и коэффициент трения наблюдаются в композите ПИ/10РУВ/10ПТФЭ: интенсивность изнашивания снижается до ~ 290 раз для металло-полимерного и до ~ 285 раз для керамо-полимерного трибосопряжений. Введение кристаллических частиц С, MoS_2 сопровождалось значительно меньшим повышением износостойкости: до 37 и 30 раз для графита, и до 7 и 3 раз для MoS_2 (металло- и керамо-полимерные сопряжения, соответственно).

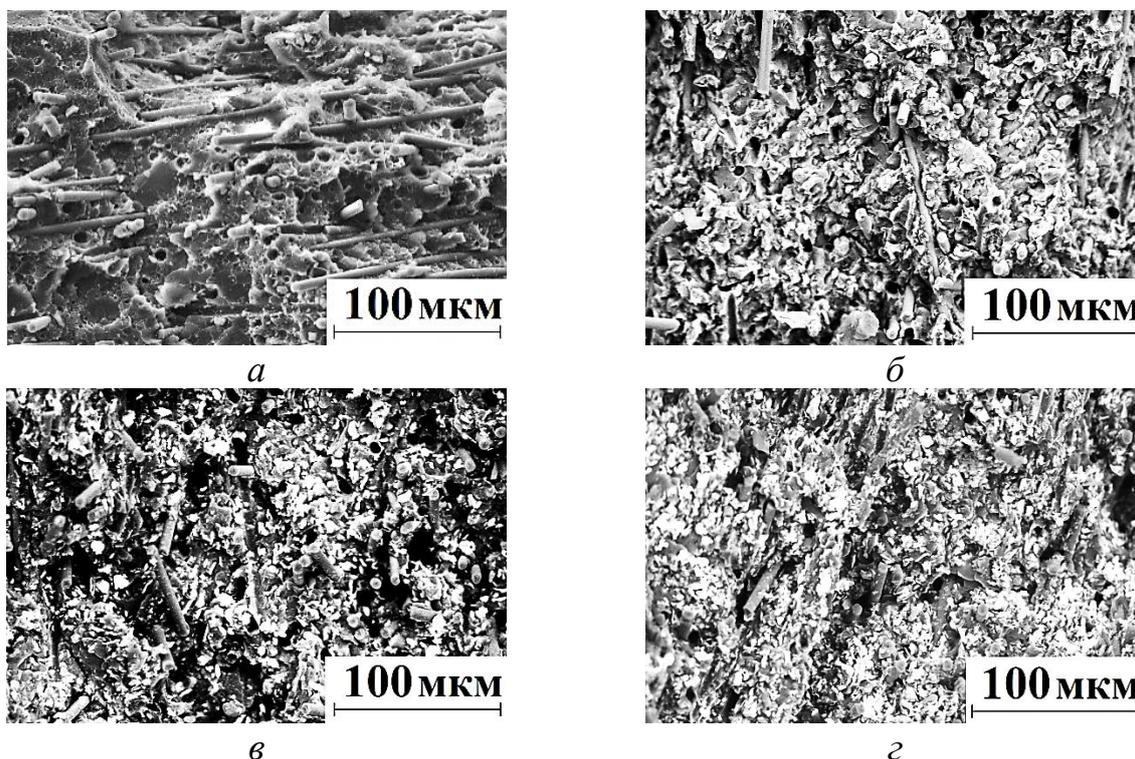


Рисунок 3 - РЭМ-фотографии структуры для композитов на основе ПИ: «ПИ + 10 вес. % РУВ + 10 вес. % ПТФЭ» (а), «ПИ + 10 вес. % РУВ + 10 вес. % С» (б), «ПИ + 10 вес. % РУВ + 10 вес. % MoS_2 » (в), «ПИ + 10 вес. % РУВ + 23 вес. % MoS_2 » (г)

Проведен EDS-микроанализ поверхностей скольжения металлических шариков и показано, что при $P=5$ Н и $V=0,3$ м/с наиболее эффективным наполнителем для ПИ является флуоралит, что сопровождалось формированием на поверхности контртела однородной пленки переноса. Подобная фторопласт-содержащая трибопленка была выявлена и на поверхности скольжения полимерного композита. Изменение интенсивности изнашивания и коэффициента трения хорошо коррелируют между собой.

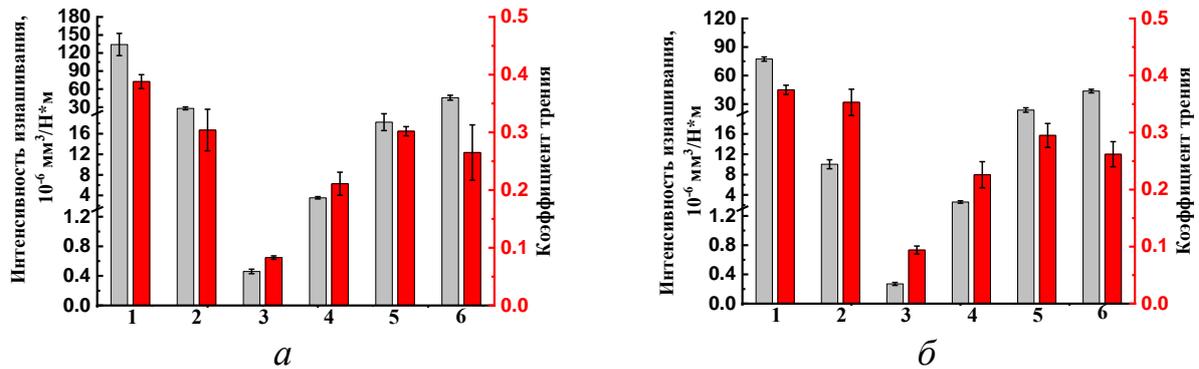


Рисунок 4 - Интенсивность изнашивания и коэффициент трения для ПИ (1) и композитов на его основе: «ПИ + 10 вес. % РУВ» (2), «ПИ + 10 вес. % РУВ + 10 вес. % ПТФЭ» (3), «ПИ + 10 вес. % РУВ + 10 вес. % С» (4), «ПИ + 10 вес. % РУВ + 10 вес. % MoS_2 » (5), «ПИ + 10 вес. % РУВ + 23 вес. % MoS_2 » (6); металлическое (а) и керамическое (б) контртела

При испытании по схеме «вал-колодка» (ШХ15 , $R_a=0,25$ мкм, $P=60\div 180$ Н, $V=0,3$ м/с) показано, что относительно точечного трибоконтакта произошла «инверсия» в тренде влияния твердосмазочных частиц на сопротивление изнашиванию (Рисунок 5). При линейном контакте и трении по более шероховатому контртелу более эффективными являются графит и MoS_2 , обеспечивающие стабильно высокое сопротивление изнашиванию композитов в исследованном интервале нагрузок и скоростей скольжения. При данной же схеме испытаний возможность формирования пленки переноса минимизирована (контртело большой площади скользит по «невозобновляемой» поверхности полимерного композита в условиях «дефицита» твердосмазочных частиц).

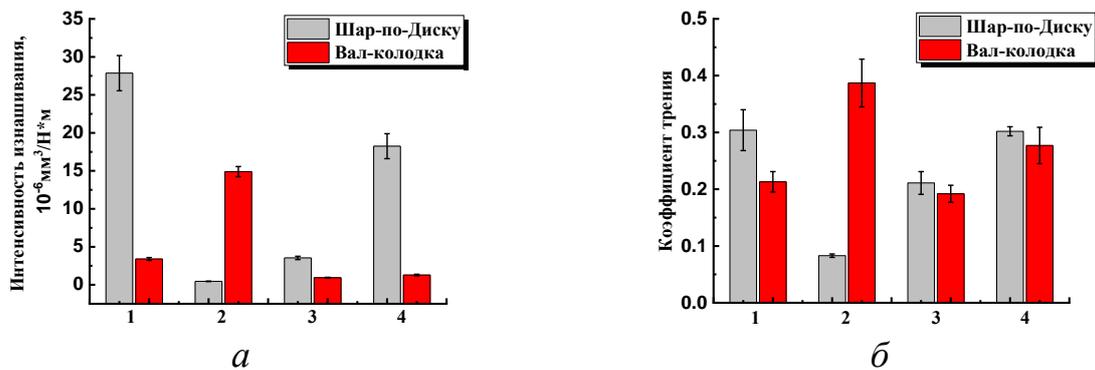


Рисунок 5 - Интенсивность изнашивания (а) и коэффициент трения (б) композитов на основе ПИ в зависимости от схемы испытания: ПИ/10РУВ(1), ПИ/10РУВ/10ПТФЭ (2), ПИ/10РУВ/10С (3), ПИ/10РУВ/10 MoS_2 (4); "шар-по-диску" - $P=5$ Н и $V=0,3$ м/с; "вал-колодка" - $P=180$ Н и $V=0,3$ м/с

Кроме того, УВ не позволяют пленке переноса закрепиться на поверхности контртела. В этом случае твердосмазочные частицы выполняют роль упрочняющих включений (за исключением ПТФЭ). Важным условием повышения износостойкости становится формирование плотной структуры композита, что также имеет место при УВ-армировании без введения твердосмазочных частиц.

В пятой главе представлены результаты сопоставительных трибоиспытаний трехкомпонентных композитов с двумя различными типами матриц ПИ и ПЭИ (различающихся наличием в молекулярной цепи последнего «шарнирного» кислорода и эфирного кольца) при точечном трибоконтакте с керамическим контртелом при повышенной температуре испытаний (23-240 °С). На рисунке 6 приведены соответствующие трибологические характеристики. Показано, что в трехкомпонентных ПЭИ-композите с ПТФЭ реализуется фактически режим сверхнизкого износа $I < 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$ во всем исследованном диапазоне температур $T = 23-180 \text{ °С}$ и низком значении коэффициента трения ($f \leq 0,1$); в идентично наполненном ПИ-композите ПТФЭ перестает выполнять роль твердосмазочного наполнителя уже при $T = 180 \text{ °С}$, чему соответствует резкое возрастание $f > 0,3$;

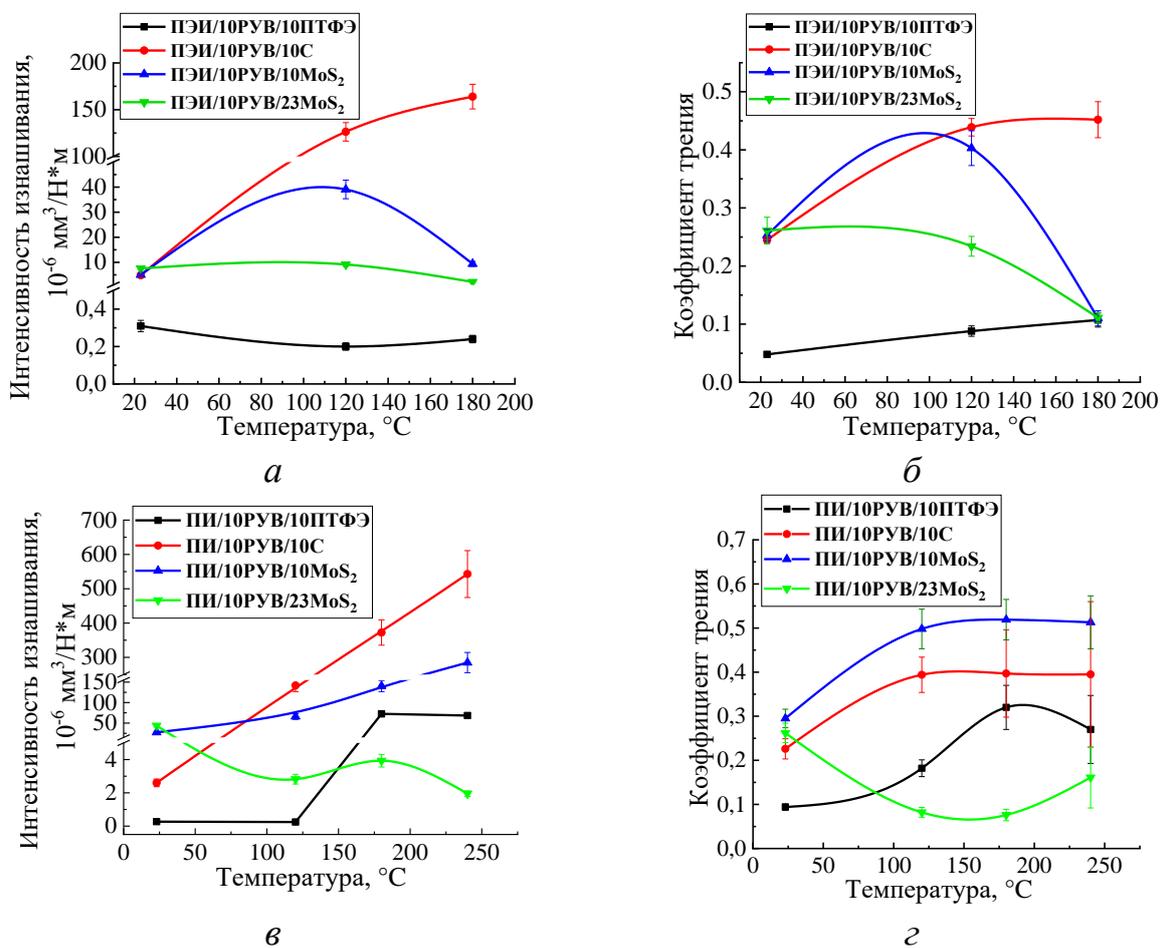


Рисунок 6 - Интенсивность изнашивания (а, в) и коэффициент трения (б, г) композитов на основе ПЭИ и ПИ при трении скольжения по керамическому контртелу

- в ПЭИ композитах, содержащих меньшее количество MoS_2 (10 вес.%), частицы наполнителя обеспечивают режим твердой смазки только при повышенной температуре испытаний до $T = 180 \text{ °С}$, чему соответствует снижение коэффициента трения до уровня $f \approx 0,1$;

- повышение содержания MoS_2 до 23 вес.% в ПЭИ-композитах обеспечивает стабильный уровень $I < 10 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$, хотя коэффициент трения достигает значения $f \approx 0,1$ только при $T=180 \text{ }^\circ\text{C}$;

- двукратное изменение содержания MoS_2 (от 10 до 23 вес.%) в ПЭИ композитах при испытаниях при $T=180 \text{ }^\circ\text{C}$ обеспечивает одинаково низкий $f \approx 0,1$, в то время как интенсивность износа остается сопоставимой по уровню и невысокой по значению $I < 2 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$;

- высокое содержание MoS_2 (23 вес.%) в ПИ композите является достаточным условием для обеспечения низкого $f \approx 0,1$ при повышенных температурах трибоиспытаний $T=120 - 240 \text{ }^\circ\text{C}$, при одновременном обеспечении низкого уровня $I < 2 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Н} \cdot \text{м}$;

- введение частиц MoS_2 в ПИ и ПЭИ-композиты даже при достижении низкого уровня $f \approx 0,1$ не способно обеспечить сверхнизкий уровень параметра I , подобно тому, как это реализуется в ПТФЭ-содержащих композитах на основе тех же полимеров.

Для понимания причин наблюдаемых явлений проведен анализ поверхностей контртел и дорожек трения трехкомпонентных композитов на основе ПИ и ПЭИ (Рисунок 7). Трение композита ПЭИ/10РУВ/10ПТФЭ реализуется в режиме сверхнизкого износа. Антифрикционная трибопленка на основе фторопласта на поверхности скольжения (Рисунок 7, б) обеспечивает крайне низкий коэффициент трения. На контртеле видны лишь отдельные малые фрагменты продуктов износа в виде темных чешуек (Рисунок 7, а). Трибопленка на поверхности скольжения композита устойчиво сохраняется во всем интервале температур 23-180 $^\circ\text{C}$.

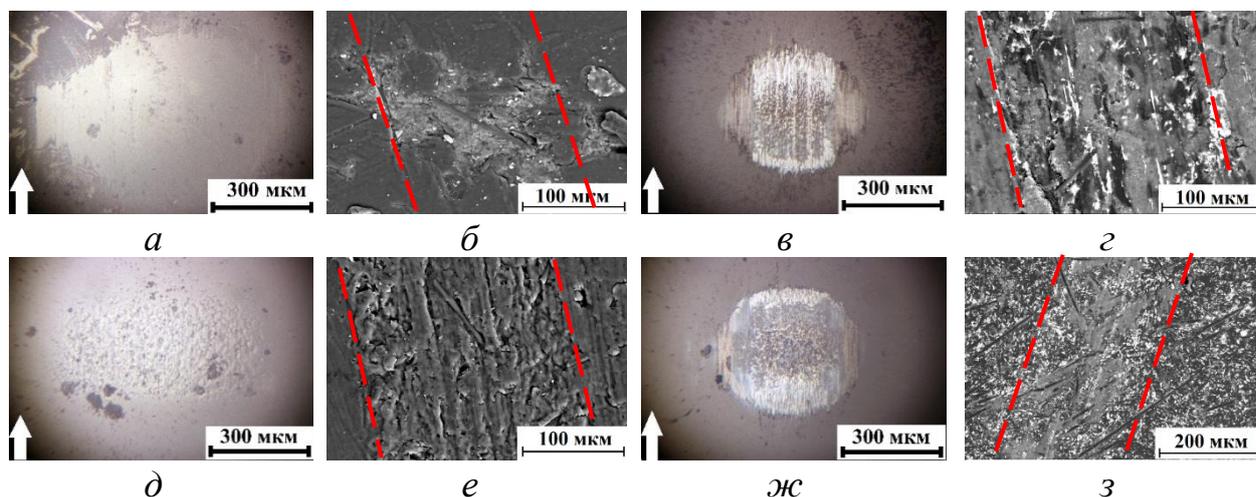


Рисунок 7 - Микрофотографии поверхностей контртел (а, в, д, ж) и дорожек трения (б, г, е, з) композитов при скольжении по керамическому контртелу: ПЭИ/10РУВ/10ПТФЭ (а, б), ПЭИ/10РУВ/23 MoS_2 (в, г), ПИ/10РУВ/10ПТФЭ (д, е), ПИ/10РУВ/23 MoS_2 (ж, з). $T=180 \text{ }^\circ\text{C}$

В композите ПЭИ/10РУВ/23 MoS_2 трибопленка на поверхности скольжения композита цельная (Рисунок 7, г), чему соответствует как снижение f до 0,1, так и уменьшение интенсивности изнашивания. Одновременно на поверхности

контртела в условиях высокой температуры $T=180\text{ }^{\circ}\text{C}$ «налипают» продукты износа с формированием соответствующей переносной пленки. Повышение температуры, стимулирующее развитие окислительных процессов, способствует закреплению пленки переноса на контртеле и возможность скольжения в режиме «полимер-по-полимеру» (Рисунок 7, в).

В композите ПИ/10РУВ/10ПТФЭ наблюдался интенсивный износ, продукты которого закреплялись на поверхности керамического контртела (Рисунок 7, д). Повышенный износ данного композита должен быть связан с невозможностью закрепления трибопленки на поверхности скольжения данного композита при $T=180\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Рисунок 7, е).

В композите ПИ/10РУВ/23МоS₂ обеспечивается формирование закрепленной на поверхности скольжения композита трибопленки, содержащей МоS₂ (Рисунок 7, з), которая визуально выглядит достаточно толстой. Следы переноса данного твердосмазочного наполнителя отчетливо фиксируются и на поверхности керамического контртела (Рисунок 7, ж).

Сравнительный анализ трибологических характеристик антифрикционных трехкомпонентных композитов на основе матриц ПЭИ и ПИ при повышенных температурах трибоиспытаний показал, что интенсивность изнашивания при $T=180\text{ }^{\circ}\text{C}$ в композитах на основе ПЭИ в 300 раз ниже, чем в композитах на основе ПИ. Таким образом, композиты на основе ПЭИ рекомендуются для применения в трибоузлах по причине высокого сопротивления износу за счет образования закрепленной сплошной трибопленки на поверхностях трибосопряжения в интервале температур 23-180 °С. Для трибоузлов, работающих при температурах выше $T=180\text{ }^{\circ}\text{C}$ (вплоть до $T=240\text{ }^{\circ}\text{C}$), рекомендуется композит на основе ПИ, содержащий 23 вес. % МоS₂ (ПИ/10РУВ/23МоS₂).

В **шестой главе** приведены результаты исследований трибологических характеристик вышеописанных трехкомпонентных композитов на основе ПИ и ПЭИ, при линейном контакте и комнатной температуре $T=23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Анализировали роль трибослоя в формировании трибологических свойств в зависимости от типа полимерной матрицы и нагрузочно-скоростных условий испытаний.

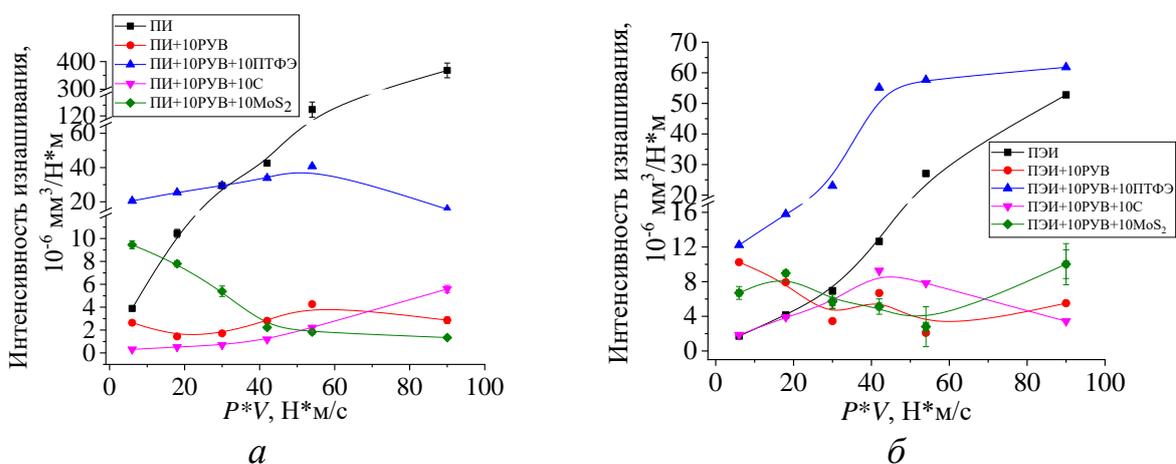


Рисунок 8 - Интенсивность изнашивания на поверхности трения от параметра $P*V$ композитов на основе ПИ (а) и ПЭИ (б). Керамо-полимерное соприкосновение (схема «вал-колодка»)

Из рисунка 8 следует, что по сравнению с точечным трибоконтактом наблюдается принципиально иная картина влияния твердосмазочных наполнителей на трибологические характеристики композитов.

Керамо-полимерное трибосопряжение. В мягких условиях нагружения ($P=60$ Н и $V=0,1$ м/с) интенсивность износа в ненаполненных ПИ и ПЭИ достаточно низкая и сопоставима по величине ($\sim 4 \cdot 10^{-6}$ и $\sim 2 \cdot 10^{-6}$ мм³/Н*м, соответственно). С увеличением $P \cdot V$ она возрастает, однако в ПИ износ растет кратно быстрее. При наиболее «жестких» условиях нагружения ($P \cdot V=180$ Н * 0,5 м/с) интенсивность износа в ПЭИ была в 30 раз меньше, чем в ПИ.

Бинарный армированный композит ПИ/10РУВ во всем исследованном интервале нагрузок имел более низкий износ по сравнению с идентично наполненным ПЭИ-композитом. Последующее введение кристаллических частиц графита и MoS₂ неоднозначно влияет на изнашивание композитов на основе ПИ и ПЭИ при изменении $P \cdot V$. В ПИ-композитах графит более эффективен в условиях низких нагрузок (до $P \cdot V=40$ Н*м/с), в то время как в жестких условиях ($P \cdot V > 40$ Н*м/с) меньший износ был в случае MoS₂.

При керамо-полимерном сопряжении композитов на основе обоих полимеров введение ПТФЭ не обеспечивало повышения износостойкости. Это связано с невозможностью формирования трибослоя на поверхности скольжения композита.

Таким образом, при керамо-полимерном сопряжении химическая структура играет определяющую роль в формировании трибологических характеристик преимущественно в ненаполненных ПИ и ПЭИ (во всем исследованном интервале $P=60-180$ Н и $V=0,1-0,5$ м/с). В армированных композитах ПИ/10РУВ и ПЭИ/10РУВ введение модифицирующих кристаллических наполнителей графита и MoS₂ в «мягких» условиях нагружения ($P \cdot V < 40$ Н*м/с) через различный характер формирования трибослоя определяет разное сопротивление изнашиванию; в более жестких условиях ($P \cdot V > 40$ Н*м/с) износостойкости бинарного и трехкомпонентных композитов близки по величине.

Металло-полимерное трибосопряжение. Использование металлического контртела сопровождается следующими изменениями в условиях трибонагружения. В силу высокой теплопроводности стальное контртело хорошо отводит (рассеивает) тепло от зоны трибоконтакта. Металлическое контртело может легче повреждаться при трении об углеродные волокна. Сталь ШХ15 более активна по отношению к полимерам, особенно при жестких условиях трибоиспытаний. Это отразилось на виде зависимостей трибологических характеристик от условий нагружения ($P \cdot V$) (Рисунок 9).

Во-первых, в ненаполненных ПИ и ПЭИ наблюдается высокая интенсивность изнашивания даже при мягких условиях трибонагружения, но в ПИ она кратно выше в сравнении с ПЭИ, как это было и в случае керамического контртела (Рисунок 8, а, б).

Во-вторых, подобно керамо-полимерному сопряжению, частицы ПТФЭ не выполняют роль твердой смазки во всем исследованном диапазоне $P \cdot V$. Интенсивность изнашивания композита ПИ/10РУВ/10ПТФЭ близка ненаполненному ПИ во всем диапазоне $P \cdot V$, в то время как в композите ПЭИ/10РУВ/10ПТФЭ она

даже превосходит износ чистого ПЭИ и составляет $I \sim 20 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Н}^*\text{м}$, возрастая с увеличением P^*V .

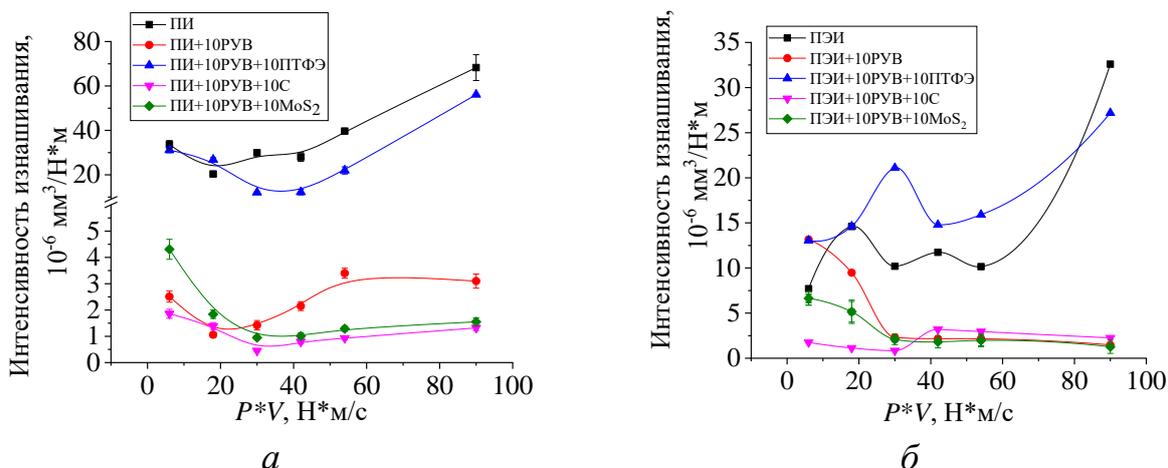


Рисунок 9 - Интенсивность изнашивания на поверхности трения от параметра P^*V композитов на основе ПИ (а) и ПЭИ (б). Металлополимерное сопряжение (схема «вал-колодка»)

В-третьих, введение графита и MoS_2 в композитах на основе ПИ в мягких условиях (P^*V до $40 \text{ Н}^*\text{м}/\text{с}$) несущественно увеличивают износостойкость по сравнению с композитом ПИ/10РУВ. Однако в жестких условиях трибоагружения ($P^*V > 40 \text{ Н}^*\text{м}/\text{с}$) интенсивность изнашивания композита ПИ/10РУВ/ MoS_2 уменьшается в 3 и 60 раз, соответственно, по сравнению с ненаполненным полимером; причем влияние обоих твердосмазочных наполнителей идентично (Рисунок 9, а, б).

В-четвертых, в ПЭИ-композите наиболее эффективным модифицирующим наполнителем в мягких условиях нагружения ($P^*V < 40 \text{ Н}^*\text{м}/\text{с}$) является графит; в жестких условиях (выше $40 \text{ Н}^*\text{м}/\text{с}$) MoS_2 . Поскольку УВ-армированные композиты без и с твердосмазочными частицами обладают сопоставимыми трибологическими свойствами, можно считать, что определяющую роль играет формирующийся трибослой на поверхности композитов на основе обоих рассматриваемых термопластов.

На рисунке 10 приведены поверхности изнашивания образцов при «жестком» режиме трибоиспытаний. Особое внимание уделено временной зависимости коэффициента трения, отражающей эволюцию формирования трибослоя на поверхности сопряжения образца.

В «жестких» условиях трибоиспытаний износ ненаполненного ПЭИ вдвое ниже, чем ПИ ($I = 32,6 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Н}^*\text{м}$ и $68,6 \cdot 10^{-6} \text{ мм}^3/\text{Н}^*\text{м}$) при высоком уровне коэффициента трения (0,46 и 0,52 соответственно) (Рисунок 10, б, г).

Четкая тенденция к формированию трибослоя наблюдается в двухкомпонентных армированных композитах; значение коэффициента трения быстро выходит на стабильно низкий уровень (0,17 против 0,23). В ПЭИ/10РУВ шероховатости поверхности также ниже по величине ($R_a = 0,231 \text{ мкм}$).

При введении коллоидного графита трибослой формируется; при этом величина коэффициента трения в трехкомпонентных ПЭИ-композитах ниже (0,16 и 0,2, для ПЭИ и ПИ).

Таким образом, формирование трибослоя в композитах ПИ/РУВ, ПИ/РУВ/С при трении по стальному контртелу происходило при более высоком уровне коэффициента трения (0,2-0,23); в композитах ПЭИ/РУВ, ПЭИ/РУВ/С значение CoF было ниже $f=0,15-0,17$.

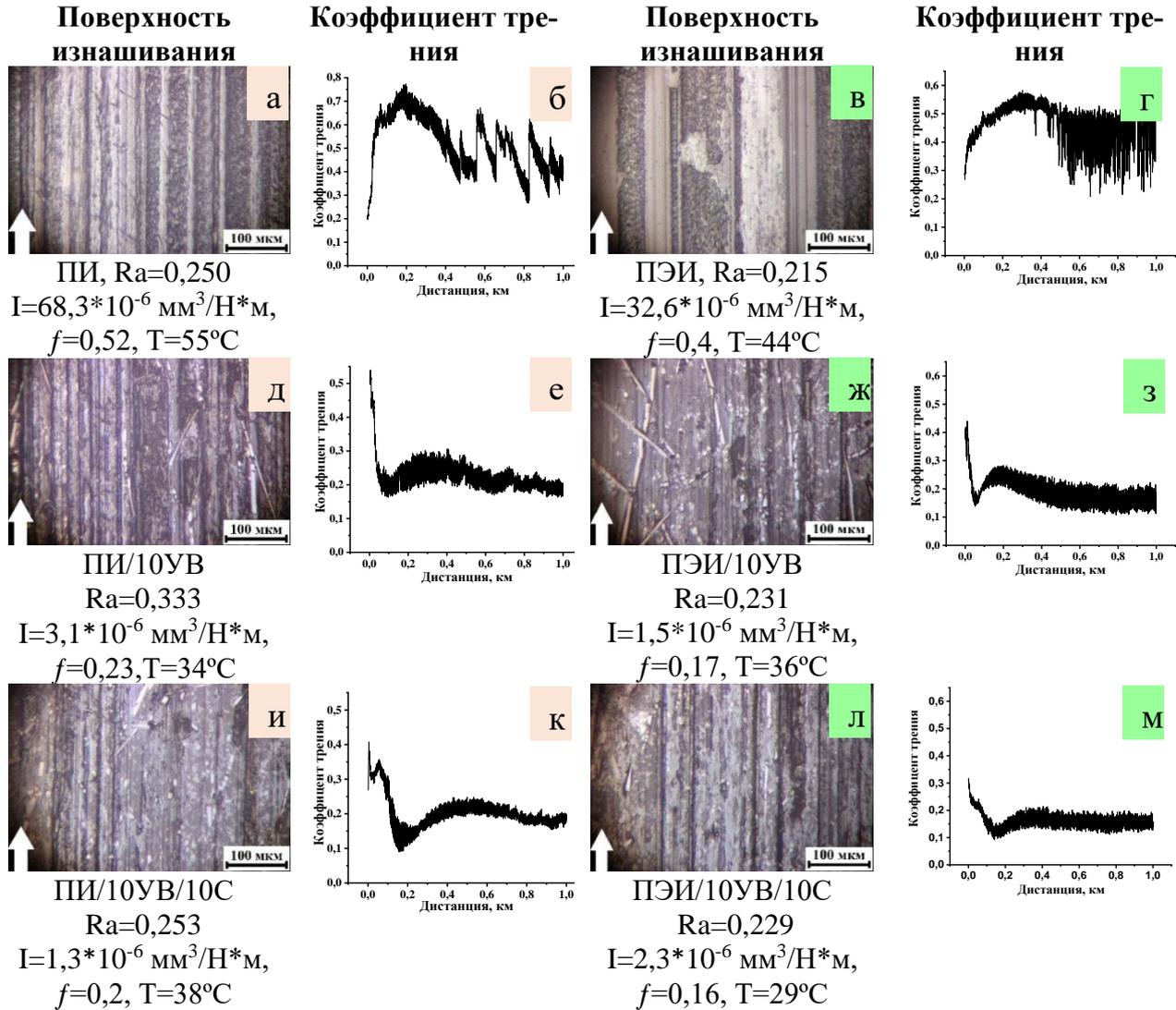


Рисунок 10 - Микрофотографии поверхностей износа композитов (а, б, д, е, и, к) и временные зависимости коэффициента трения (в, г, ж, з, л, м): ПИ (а, б), ПИ/10РУВ (д, е), ПИ/10РУВ/10С (и, к), ПЭИ (в, г), ПЭИ/10РУВ (ж, з), ПЭИ/10РУВ/10С (л, м); Металло-полимерное трибосопряжение.

$P=180 \text{ Н}$, $V=0,5 \text{ м/с}$

Проведено исследование формирующегося трибослоя методом нанопрофилирования. Использовали только образцы после трибоиспытаний в условиях металло-полимерного трибосопряжения при наиболее жестких условиях $P=180 \text{ Н}$, $V=0,5 \text{ м/с}$ (Рисунок 11). В бинарных композитах ПИ/РУВ и ПЭИ/РУВ (где трибослой гарантированно формировался) модули упругости трибослоя

практически равны таковым для ненаполненных полимеров. Другими словами, наличие армирующих волокон (РУВ) в ПИ и ПЭИ не сопровождалось изменением модуля упругости трибослоя.

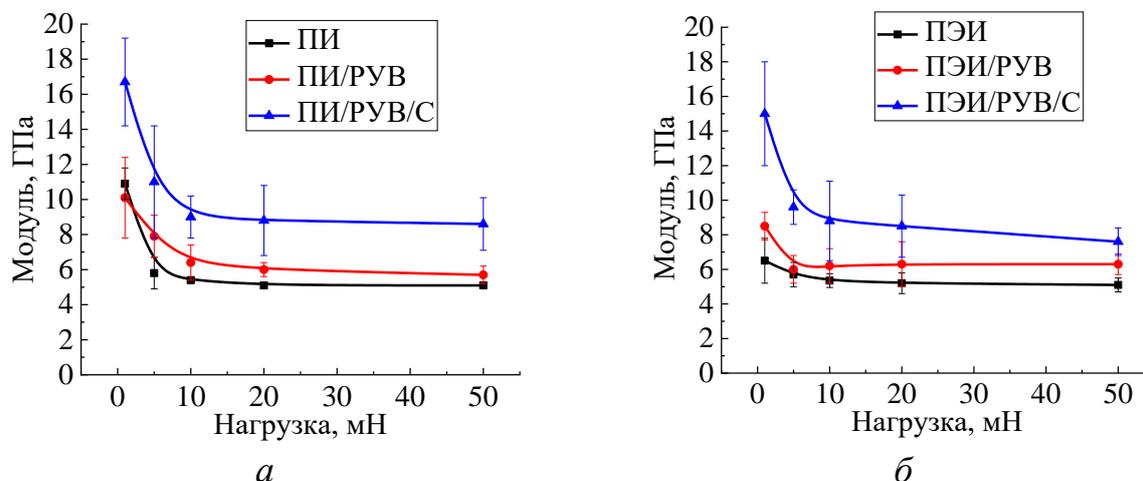


Рисунок 11 - Зависимости модуля упругости E и упругого восстановления в дорожке трения ПИ и ПЭИ и композитов на их основе от величины приложенной нагрузки

Это может быть связано с невысоким содержанием армирующих волокон, а также их слабым химическим взаимодействием с полимерной матрицей. Иная картина наблюдается в трехкомпонентных композитах на основе ПИ и ПЭИ, наполненных кристаллическим графитом. Модуль упругости поверхностного слоя композитов возрастают в ПИ/РУВ/С – в 1,5 раза, в ПЭИ/РУВ/С – в 2 раза. Таким образом, наличие дисперсных частиц графита сопровождалось формированием более выраженного трибослоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что введение в ПИ полимерных частиц ПТФЭ снижает на 10%, а молотых углеродных волокон (МУВ) микронного диапазона размером (200 мкм) увеличивает модуль упругости до 2-х раз. В структуре трехкомпонентного композита выявляется остаточная пористость на уровне 1-2 %, а размер микропор не превышает единицы микрон. Трибологические испытания композита «ПИ + 10 вес. % ПТФЭ + 10 вес. % МУВ_{отжиг}» в различных нагрузочно-скоростных режимах трибоиспытания ($P \cdot V$) показали возможность снижения интенсивности изнашивания до 310 раз для металло-полимерного и до 285 раз для керамо-полимерного трибосопряжений по сравнению с ненаполненным ПИ. Определено, что увеличение нагрузки в трибоконтакте по сравнению со скоростью является более значимым фактором, влияющим на интенсивность изнашивания вследствие развития процессов микроабразивного изнашивания полимера.

2. Показано, что введение РУВ в ПИ в количестве 10 вес.% увеличивает модуль упругости в 2,5 раза, а предел прочности в 1,5 раза, при этом структура композита подобна таковой для наполнения МУВ ($l=200$ мкм). Установлено, что схема трибоконтакта оказывают существенное влияние на сопротивление изнашиванию. При точечном контакте возможность формирования и закрепления пленки переноса

на контртеле, а также формировании трибопленки на поверхности скольжения полимерного композита «ПИ + 10 вес.% РУВ + 10вес.% ПТФЭ» обеспечивает повышение износостойкости до 280 раз по сравнению с ненаполненным ПИ. При линейном контакте с более шероховатым контртелом $R_a \sim 0,2$ мкм сопротивление изнашиванию определяется формированием плотной структуры композита, а многократное повышение износостойкости достигается в двухкомпонентном композите ПИ + 10% УВ даже без введения твёрдосмазочных частиц.

3. Показано, что структура трехкомпонентных ПИ- и ПЭИ-композитов в целом подобна. По сравнению с ненаполненным ПЭИ введение рубленых углеродных волокон ($l = 2$ мм) в количестве 10 вес. % увеличивает модуль упругости композитов до 2-х раз, а предел прочности до 1,2 раза. Для практического использования в условиях точечного трибосопряжения в интервале температур 23-180 °С рекомендуется «ПЭИ + 10 вес.% РУВ + 10вес.% ПТФЭ», в котором в отличие от композитов на основе ПИ формирование пленки переноса на поверхности контртела и трибопленки на поверхности скольжения обеспечивают крайне низкий износ. Более высокая термическая стабильности ПИ и повышенное содержание 23 вес.% MoS_2 определяют предпочтительность применения композита ПИ/10РУВ/23 MoS_2 при температурах 200-240 °С, хотя задержка в формировании пленки переноса и трибопленки вызывает более высокий износ $I \sim 2,0 \cdot 10^{-6}$ мм³/Н*м.

4. Показано, что в условиях линейного трибоконтакта при шероховатости контртела 0,2-0,25 мкм защитная пленка переноса не формируется, а повышение трибологических свойств двух- и трехкомпонентных РУВ- композитов на основе ПИ и ПЭИ достигается формированием трибослоя, защищающего поверхность скольжения полимерного композита от режущего и пропахивающего воздействия неровностей на поверхности металлического/керамического контртел. Выявлено, что формированию армированного разрушенными УВ трибослоя способствует наличие в композите мелкодисперсных частиц графита (размер ~ 4 мкм), в то время как в трехкомпонентных композитах с ПТФЭ трибослой не формируется, чтократно повышает интенсивность изнашивания. Формирование трибослоя в УВ-армированных композитах нивелирует роль полимерной матрицы, поэтому их трибологические свойства сопоставимы во всем диапазоне $P \cdot V = 6 \div 90$ Н*м/с.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Панин С. В. Влияние структуры матрицы на трибологические характеристики твёрдосмазочных композитов на основе высокотемпературных термопластов полиимида / С. В. Панин, Ц. Ло, Д. Г. Буслович, В. О. Алексенко, Л. А. Корниенко // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2022. – Т. 65, № 3. – С. 123–130. – DOI: 10.17223/00213411/65/3/123. – 0,52 / 0,10 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Scopus:

Panin S. V. Effect of The Matrix Structure on The Tribological Properties of Solid-lubricant Composites Based on High-temperature Polyimide Thermoplastics / S. V. Panin, **J. Luo**, D. G. Buslovich, V. O. Alexenko, L. A. Kornienko // Russian Physics Journal. – 2022. – Vol. 65, № 3. – P. 526–534. – DOI: 10.1007/s11182-022-02664-8.

2. Панин С. В. Разработка оптимального состава трехкомпонентных высокопрочных износостойких композитов на основе полиимида / С. В. Панин, **Ц. Лю**, Д. Г. Буслович, Л. А. Корниенко, В. О. Алексенко // Прикладная механика и техническая физика. – 2021 – Т. 62, № 6. – С. 162–171. – DOI: 10.15372/PMTF20210618. – 0,58 / 0,15 а.л.

в переводной версии журнала, входящей в Web of Science:

Panin S. V. Development Of An Optimal Composition Of Three-Component High-Strength Wear-Resistant Composites Based On Polyimide / S. V. Panin, **J. Luo**, D. G. Buslovich, L. A. Kornienko, V. O. Aleksenko, S. A. Bochkareva // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2021. – Vol. 62, № 6. – P. 1028–1036. – DOI: 10.1134/S0021894421060183.

3. Panin S. V. Effect of Transfer Film on Tribological Properties of Anti-Friction PEI- and PI-Based Composites at Elevated Temperatures / S. V. Panin, **J. Luo**, D. G. Buslovich, V. O. Alexenko, F. Berto, L. A. Kornienko // Polymers. – 2022. – Vol. 14, № 6. – Article number 1215. – 28 p. – URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/6/1215> (access date: 03.11.2022). – DOI: 10.3390/polym14061215. – 1,98 / 0,40 а.л. (*Web of Science*).

4. Panin S. V. Role of Testing Conditions in Formation of Tribological Layers at Line Contacts of Antifriction CF-Reinforced PI- and PEI-Based Composites / S. V. Panin, **J. Luo**, D. G. Buslovich, V. O. Alexenko, L. A. Kornienko, A. V. Byakov, V. N. Paimushin, A. R. Shugurov // Molecules. – 2022. – Vol. 27, № 19. – Article number 6376. – 25 p. – URL: <https://www.mdpi.com/1420-3049/27/19/6376> (access date: 03.11.2022). – DOI: 10.3390/molecules27196376. – 1,89 / 0,38 а.л. (*Web of Science*).

5. Panin S. V. Experimental–FEM Study on Effect of Tribological Load Conditions on Wear Resistance of Three-Component High-Strength Solid-Lubricant PI-Based Composites / S. V. Panin, **J. Luo**, D. G. Buslovich, V. O. Alexenko, L. A. Kornienko, S. A. Bochkareva, A. V. Byakov // Polymers. – 2021. – Vol. 13, № 16. – Article number 2837. – 30 p. – URL: <https://www.mdpi.com/2073-4360/13/16/2837>. – DOI: 10.3390/polym13162837 (access date: 03.11.2022). – 2,10 / 0,42 а.л. (*Web of Science*).

6. Panin S. V. The effect of annealing of milled carbon fibers on the mechanical and tribological properties of solid-lubricant thermoplastic polyimide-based composites / S. V. Panin, **J. Luo**, V. O. Alexenko, D. G. Buslovich, L. A. Kornienko, S. A. Bochkareva, I. L. Panov // Polymer Engineering and Science. – 2020. – Vol. 60, № 11. – P. 2735–2748. – DOI: 10.1002/pen.25504. – 0,96 / 0,19 а.л. (*Web of Science*).

Статьи в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Scopus:

7. **Luo J.** Mechanical and Tribological Properties of Three-Component High-Strength Solid-Lubricant Polyimide Based Composites / **J. Luo**, D. G. Buslovich, V. O. Alexenko, L. A. Kornienko, S. V. Panin // AIP Conference Proceedings. – 2022,

Tomsk. – Vol. 2509: materials of the International conference on Physical Mesomechanics. Tomsk, Russia, September 06–10, 2021. – Article number 020124. – 5 p. – URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/5.0084755> (access date: 03.11.2022). – DOI: 10.1063/5.0084755. – 0,35 / 0,12 а.л.

8. Alexenko V. O. Mechanical and tribological properties of polyimide based composites reinforced with surface-modified short carbon and glass fibers / V. O. Alexenko, D. G. Buslovich, **J. Luo**, S. V. Panin // AIP Conference Proceedings. – Tomsk, 2020. – Vol. 2310: materials of International conference on Physical Mesomechanics. Tomsk, Russia, October 05–09, 2020. – Article number 020014. – 4 p. – URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/5.0034523> (access date: 03.11.2022). – DOI: 10.1063/5.0034523. – 0,32 / 0,11 а.л.

9. Panin S. V. Mechanical and tribological properties of thermoplastic polyimide based composites loaded with various PTFE fillers / S. V. Panin, **J. Luo**, L. A. Kornienko, D. G. Buslovich, V. O. Alexenko // AIP Conference Proceedings. – Omsk, 2020. – Vol. 2285: materials of 2020 Oil and Gas Engineering Conference, OGE 2020. Omsk, Russia, February 26–29, 2020. – Article number 040005. – 6 p. – URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/5.0026665> (access date: 03.11.2022). – DOI: 10.1063/5.0026665. – 0,32 / 0,11 а.л.

10. Panin S. V. Mechanical and tribotechnical properties of polyimide based solid lubricant composites / S. V. Panin, **J. Luo**, L. A. Kornienko, D. G. Buslovich, V. O. Alexenko // AIP Conference Proceedings. – Tomsk, 2019. – Vol. 2167: proceedings of the International Conference on Advanced Materials with Hierarchical Structure for New Technologies and Reliable Structures 2019. Tomsk, Russia, October 01–05, 2019. – Article number 020266. – 5 p. – URL: <https://aip.scitation.org/doi/abs/10.1063/1.5132133> (access date: 03.11.2022). – DOI: 10.1063/1.5132133. – 0,27 / 0,09 а.л.

Статьи в прочих научных изданиях:

11. Панин С. В. Трибологические характеристики трехкомпонентных твердосмазочных композитов на основе полиэфиримида в условиях точечного и линейного трибоконтактов / С. В. Панин, Д. Г. Буслович, **Ц. Лю**, Л. А. Корниенко, В. О. Алексенко // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. – 2022. – Т. 19, № 3. – С. 402–410. – DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2022.03.013. – 0,63 / 0,16 а.л.

12. Панин С. В. Влияние условий трибоиспытаний на сопротивление изнашиванию трехкомпонентных твердосмазочных композитов на основе полиимида в условиях металлополимерных трибосопряжений / С. В. Панин, **Ц. Лю**, Д. Г. Буслович, В. О. Алексенко, Л. А. Корниенко // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. – 2021. – Т. 22, № 11. – С. 490–505. – DOI: 10.36652/0202-3350-2021-22-11-490-505. – 1,17 / 0,29 а.л.

13. Панин С. В. Механические и трибологические свойства твердосмазочных композитов на основе термопластического полиимида, наполненного фторопластом и поверхностно-модифицированными углеволокнами / С. В. Панин, **Ц. Лю**, Д. Г. Буслович, В. О. Алексенко, Л. А. Корниенко // *Сборка в машиностроении, приборостроении*. – 2020. – Т. 21, № 9. – С. 394–400. – DOI: 10.36652/0202-3350-2020-21-9-394-400. – 0,59 / 0,15 а.л.

Издание подготовлено в авторской редакции.
Отпечатано на участке цифровой печати
Издательства Томского государственного университета
Заказ № 7484 от «08» февраля 2023 г. Тираж 100 экз.
г. Томск, Московский тр.8, тел. (3822) 53-15-28
publish.tsu.ru