

УДК 678.067:621.822.5
ГРНТИ 61.61.29

На правах рукописи



ШАРКО ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ГИБРИДНЫЕ АНТИФРИКЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ
КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ
УЗЛОВ ТРЕНИЯ, СМАЗЫВАЕМЫХ ВОДОЙ**

Специальность 2.6.17. – Материаловедение (технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт».

Научный руководитель:

Саргсян Артем кандидат технических наук.
Самвелович

Официальные оппоненты:

Скотникова Маргарита доктор технических наук, профессор,
Александровна Санкт-Петербургский политехнический университет
Главный научный сотрудник Международного научно-образовательного центра «BaltTribo-Politechnic»

Кулагина Галина кандидат химических наук,
Серафимовна НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, начальник
лаборатории «Углепластики и органиты»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»

Защита состоится **«2» декабря 2026 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета 75.1.018.01, созданного на базе Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И. В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», по адресу: 191015, г. Санкт-Петербург, ул. Шпалерная, дом 49.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» – ЦНИИ КМ «Прометей» и на сайте:

<http://dissovet.cism-prometey.ru/ThesisDetails.aspx?id=55>

Автореферат разослан «____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 75.1.018.01
доктор технических наук, профессор



Е. И. Хлусова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Эффективность узлов трения определяется их ресурсными характеристиками, экономичностью, технологичностью и функциональными возможностями. Основной тенденцией совершенствования узлов трения, в первую очередь, является снижение коэффициента трения, повышение контактных давлений, а также увеличение требуемого срока эксплуатации, отказ от масляных смазок для изделий, эксплуатирующихся в акватории.

В 1970-х годах был разработан антифрикционный полимерный композиционный материал (ПКМ) марки УГЭТ для тяжелонагруженных узлов трения, который способен работать со смазкой водой и при высоких контактных давлениях (до 60 МПа). Значительный вклад в разработку антифрикционного ПКМ марки УГЭТ и изучения процессов трения антифрикционных ПКМ внесли исследования В. Е. Бахаревой, М.Б. Рубина, Г.И. Николаева, А.В. Анисимова, И.В. Лишевича, А.С. Саргсяна, Б. М. Гинзбурга, Д. Г. Точильникова и других ученых.

УГЭТ – это ПКМ на основе эпоксидной полимерной матрицы и углеродной армирующей ткани, который обладает высокими физико-механическими свойствами и триботехническими характеристиками. УГЭТ в настоящее время массово применяется в узлах трения судостроительной и судоремонтной промышленности (подшипники скольжения судовых механизмов, рулевых устройств и т.д.), энергетического машиностроения (направляющие турбин гидроэлектростанции) и нефтедобывающей отрасли (подшипники насосов).

Однако кроме положительных свойств антифрикционный ПКМ марки УГЭТ имеет ряд особенностей и ограничений по применению. Так как углеродная армирующая ткань, которая входит в состав УГЭТ, имеет положительный электродный потенциал, а большинство сталей имеют отрицательный потенциал, в некоторых узлах трения вследствие длительного простоя в морской воде контакт с углепластиком УГЭТ приводит к ускорению коррозии металлических контртел.

Решением вопроса предотвращения коррозии при длительной остановке узла трения является замена углеродного армирующего наполнителя в составе антифрикционного ПКМ на альтернативный (диэлектрический), который будет наделять его электроизоляционными свойствами, и в то же время обеспечивать низкий коэффициент трения материала без потери прочности. Однако органические и неорганические диэлектрические наполнители по отдельности не обладают необходимыми свойствами: органические волокна демонстрируют необходимые триботехнические свойства, но отличаются низкими значениями прочности и адгезии к полимерной матрице, неорганические волокна имеют высокую прочность и адгезию, однако характеризуются значительным коэффициентом трения.

Идея создания нового антифрикционного ПКМ заключается в объединении органических и неорганических волокон в структуре гибридной армирующей ткани, что позволит исключить недостатки армирующих волокон разного типа, обеспечит требуемые физико-механические свойства и триботехнические характеристики. В связи с этим целесообразна разработка гибридного антифрикционного ПКМ на основе гибридной армирующей ткани (не содержащей углеродных наполнителей) и эпоксидной полимерной

матрицы, обладающего диэлектрическими свойствами и не уступающего характеристикам антифрикционного углепластика марки УГЭТ, а именно по величине прочности при сжатии - не менее 250 МПа и коэффициента трения - не более 0,09, способности работать при скоростях скольжения до 0,5 м/с и контактном давлении до 60 МПа, отсутствию изменения линейных размеров в результате водопоглощения. Применение нового ПКМ позволит исключить процессы коррозии в узлах трения, что повысит их ресурс и надежность.

В связи с этим **целью диссертационной работы** является разработка состава и технологии изготовления антифрикционного полимерного композиционного материала на основе гибридной армирующей ткани и эпоксидной полимерной матрицы, обеспечивающего стойкость к контактной коррозии металлических контртел за счет диэлектрических свойств, для высоконагруженных узлов трения, смазываемых водой.

В процессе выполнения работы **поставлены и решены следующие задачи:**

1. Анализ физико-механических свойств армирующих материалов, применяемых для производства гибридных антифрикционных ПКМ. Выбор армирующих волокон различной химической природы для проведения исследований, определение рациональных схем плетения и соотношений разных типов волокон в составе гибридной армирующей ткани, обеспечивающих прочностные и физические свойства, триботехнические характеристики.

2. Исследование влияния типа и соотношения волокон гибридной армирующей ткани на:

- механические свойства ПКМ при сжатии, изгибе и межслойном сдвиге;
- физические свойства (плотность, водопоглощение и изменение линейных размеров ПКМ после выдержке в воде);
- триботехнические характеристики в условиях контактного трения со смазкой водой;
- характер повреждения поверхности ПКМ при трении;
- электроизоляционные свойства ПКМ и коррозионную повреждаемость металлического контртела.

Определение рациональных составов гибридных антифрикционных ПКМ.

3. Разработка технологии изготовления гибридных антифрикционных ПКМ на основе эпоксидной полимерной матрицы и гибридной армирующей ткани с учетом особенностей температурной обработки полимерных волокон.

4. Изготовление опытных образцов подшипников скольжения и организация полного цикла их изготовления из разработанного гибридного антифрикционного ПКМ.

5. Проведение стендовых испытаний опытных образцов подшипников скольжения, в том числе опорных подшипников рулевого устройства судов. Определение эксплуатационных свойств гибридного антифрикционного ПКМ и изделий на его основе.

Положения, выносимые на защиту:

1. Составы разработанных гибридных антифрикционных ПКМ.
2. Зависимости физико-механических свойств и триботехнических характеристик гибридных антифрикционных ПКМ от типа и соотношений волокон в составе армирующей ткани.
3. Результаты исследования поверхности трения гибридного антифрикционного ПКМ на основе стеклянных и СВМПЭ волокон при использовании метода РЭМ, которые

позволили сделать вывод о положительном влиянии СВМПЭ на триботехнические характеристики.

4. Технологические параметры и процесс изготовления гибридного антифрикционного ПКМ, обеспечивающие высокие физико-механические свойства.

5. Результаты стендовых испытаний, которые подтвердили работоспособность и надежность разработанного гибридного антифрикционного ПКМ. Комплекс эксплуатационных свойств гибридных антифрикционных ПКМ и изготовленных из них подшипников скольжения.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Установлены закономерности влияния состава гибридной армирующей ткани на прочностные характеристики гибридных антифрикционных полимерных композиционных материалов (ПКМ):

- с увеличением содержания стеклянных нитей (марки ВМПС8) от 60 до 80% максимальная прочность при сжатии и изгибе ПКМ возрастает на ~30%;
- вследствие высоких значений модуля упругости (при сжатии и изгибе) высокомодульных органических наполнителей: полиоксадиазольной (марки Арселон) и арамидной (марки СВМ) нитей – в сочетании с повышенной адгезией к эпоксидной матрице (благодаря наличию полярных гетероциклов и амидных групп) композиты на базе ВМПС8 + Арселон и ВМПС8 + СВМ обладают на 30-50% более высокими прочностными характеристиками в сравнении с ПКМ из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и фторопласта (Ф-4), содержащими нити линейных полимеров без полярных групп.

2. Экспериментально показано, что высокие триботехнические свойства гибридных антифрикционных ПКМ ВМПС8 + СВМПЭ при трении скольжения связаны с образованием слоя продуктов трибоконтакта из СВМПЭ и распределение данного слоя по поверхности контртела:

- продукты износа СВМПЭ распределяются по контртелу, заполняя шероховатость поверхности, частично предотвращая прямой контакт стеклянных волокон с поверхностью металлического контртела, тем самым снижая коэффициент трения до величины 0,04-0,05 и уменьшая интенсивность изнашивания до 3 мкм;
- высокопрочные ПКМ с высокомодульными волокнами СВМ и Арселон, а также фторопластом характеризуются повышенными значениями коэффициента трения (0,12-0,17) и интенсивности изнашивания (7-18 мкм) вследствие интенсивного микрорезания и абразивного износа контртела при обнажении армирующих волокон в процессе трения в условиях отсутствия трибопленки.

3. Впервые создан высокопрочный гибридный антифрикционный ПКМ ПЭСТ-4 на базе гибридной армирующей ткани, включающей стеклянные нити (на уровне 80%) и волокна из СВМПЭ (на уровне 20%), и эпоксидной матрицы с температурой полимеризации от 90°C. Высокая работоспособность ПКМ в узлах трения, смазываемых водой, при контактном давлении до 60 МПа обусловлена сочетанием физико-механических свойств неорганических и органических волокон и рациональным соотношением их в ткани, обеспечивающим:

- низкий коэффициент трения ($f_s \leq 0,09$) и высокое сопротивление изнашиванию;

- повышенные значения прочности при сжатии (260 МПа), при изгибе (500 МПа), межслойном сдвиге (29 МПа);
- низкое водопоглощение (до 0,2) и отсутствие набухания в воде;
- высокое удельное объемное электрическое сопротивление ($7,5 \times 10^{13}$ Ом·м) и стойкость к контактной коррозии стального контртела.

Практическая значимость работы заключается в следующем.

1. Разработан состав гибридного антифрикционного полимерного композиционного материала (ПКМ) на основе гибридной армирующей ткани (состоящей из стеклянных волокон и волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена) и эпоксидной полимерной матрицы, работоспособного в узлах трения с контактными давлениями до 60 МПа при смазке водой и не вызывающего контактную коррозию металлического контртела.

2. Разработана технология изготовления высокопрочных гибридных антифрикционных ПКМ на основе гибридных тканей, а также необходимая техническая документация. На базе НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» организован полный цикл производства подшипников скольжения из гибридных антифрикционных ПКМ.

3. На основании длительных стендовых испытаний, моделирующих работу узлов трения судовых механизмов, проведенных на базе ЗАО «Центральный научно-исследовательский институт судового машиностроения», обоснована работоспособность и надёжность нового гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4.

4. Осуществлено применение гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4 при изготовлении подшипников скольжения для устройства имитации рулевых приводов перекадки ЦАКИ.441431.017 в ЗАО «ЦНИИ СМ».

Достоверность основных результатов, положений и выводов диссертации подтверждена:

1. Использованием в процессе выполнения работы современных апробированных методов исследования свойств гибридного антифрикционного ПКМ, микроструктуры поверхности трения гибридного ПКМ, большим объемом проведенных лабораторных и опытных экспериментов, стендовых испытаний образцов и изделий из гибридных антифрикционных ПКМ и проанализированных данных, на основании которых сделаны научные выводы и разработаны технологические инструкции для опытного производства подшипников скольжения.

2. Положительными результатами оценки работоспособности подшипников скольжения по итогам стендовых испытаний подшипников скольжения из созданного гибридного антифрикционного ПКМ на основе стеклянных волокон и волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена, проводимых на ЗАО «ЦНИИ СМ». Установлено, что гибридный антифрикционный ПКМ имеет высокую стойкость к изнашиванию (не более 3 мкм/км).

Личный вклад автора в получении научных результатов, изложенных в диссертации, заключается в:

- постановке задачи и определении методов проведения экспериментальных исследований;

- проведении теоретических и экспериментальных исследований, которые обобщены в представленной работе и были выполнены автором как самостоятельно, так и в соавторстве со своими коллегами;

- обработке результатов исследования и их интерпретации при написании технической документации, статей, тезисов докладов и отчетов;

- разработке технологии изготовления гибридных антифрикционных ПКМ для опытно-промышленного производства.

Аппробация результатов. Результаты данной работы были представлены на: 20-конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» («КМУС-2023») в НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» (г. Санкт-Петербург 2023 г.); Международной научно-практической конференции «BALT TRIBO 2024» в СПбПУ (г. Санкт-Петербург 2024 г.); 21 конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» («КМУС»-2024) в НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» (г. Санкт-Петербург 2024 г.); XI Всероссийском молодежном научном форуме с международным участием «Open Science 2024» в НИЦ «Курчатовский институт»- ПИЯФ (г. Гатчина 2024 г.); Отраслевой научно-технической конференции «Новые технологии в судостроении» («НТС-2024») в АО «Центр технологии судостроения и судоремонта» (г. Санкт-Петербург 2024 г.); Научной конференция «АКСАЛИТ 2025» (г. Екатеринбург); II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «BALT TRIBO 2025» в СПбПУ (г. Санкт-Петербург 2025 г.); 16 Всероссийской научной и студенческой конференции с международным участием «Наноструктурные, волокнистые и композиционные материалы» имени профессора А.А. Лысенко в СПбГУПТД (г. Санкт-Петербург 2026 г.).

По теме диссертации опубликованы 19 научных трудов, в том числе 4 статьи в изданиях входящих в перечень ВАК, получен 1 патент РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 95 наименований и приложения. Основной текст изложен на 172 страницах, содержит 81 рисунок и 27 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи проведенных исследований, научная новизна работы и положения, вынесенные на защиту, теоретическая и практическая значимость работы, описан личный вклад соискателя, приведены сведения о достоверности и апробации полученных результатов.

Первая глава посвящена литературному обзору, в котором на основании опубликованных данных проведен анализ антифрикционных ПКМ с указанием главных преимуществ и недостатков. Описана причина возникновения коррозии металлических контртел и корпусов подшипника скольжения в морской воде – образование гальванической пары, в которой армирующее углеродное волокно антифрикционного ПКМ марки УГЭТ, высвобождаемое при трении, служит катодом, а металлическое контртело – анодом (рисунок 1).



Рисунок 1 – Вид образцов пар трения (стальной ролик и подшипник скольжения из УГЭТ) после длительной выдержки в морской воде.

Проведен анализ основных свойств органических и неорганических армирующих волокон и компонентов термореактивной матрицы, представленных на российском рынке, потенциально применимых при разработке гибридных ПКМ.

В результате выполненного анализа сформулирована проблема, на решение которой направлено исследование: предотвращение коррозии металлического контртела путем исключения углеродных наполнителей из состава антифрикционного ПКМ без потери показателей триботехнических характеристик и физико-механических свойств.

Во второй главе представлены свойства армирующих волокон и исходных материалов полимерной матрицы, выбранных для изготовления образцов гибридных антифрикционных ПКМ.

Особое внимание уделено процессу создания оптимальной гибридной структуры армирующих тканей, включая выбор способов плетения и определение рационального соотношения упрочняющих (например, стеклянных волокон) и функциональных (например, СВМПЭ) волокон. Разработаны гибридные армирующие ткани с использованием саржевого переплетения, которое обеспечивает возможность регулировать соотношение нитей разных типов в структуре ткани. Разработано и изготовлено 12 типов тканей с соотношением 80/20% и 60/40 % нитей основы (стеклянных волокон марки ВМПС8 и арамидной пряжи СВМ) и утка (из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) марок ПЭ-1, ПЭ-2, и С, арамидных нитей СВМ-Н, полиоксадиазольных волокон марки Арселон, полиамидных нитей, фторопластовых нитей Ф-4). Номенклатура армирующих тканей приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень разработанных и изготовленных гибридных армирующих тканей.

№	Марки нитей		Соотношение нитей, %	Вид плетения	Поверхностная плотность, гр/м ²	Толщина, мм	Плотность (количество нитей на единицу длины) н/см	
	Основа	Уток					По основе	По утку
1.	ВМПС8	СВМПЭ ПЭ-1	80/20	саржа 4/4	348	0,23	24	13
2.		СВМПЭ ПЭ-1	60/40	саржа 2/2	295	0,30	16	20
3.		СВМПЭ «С»	80/20	саржа 4/4	352	0,42	24	4
4.		СВМПЭ ПЭ-2	80/20	саржа 4/4	358	0,25	24	26
5.		Ф-4 нить	80/20	саржа 4/4	360	0,47	24	5
6.		СВМ-Н	80/20	саржа 4/4	357	0,32	24	13
7.		СВМ-Н	60/40	саржа 2/2	335	0,33	16	20
8.		Арселон	80/20	саржа 4/4	341	0,27	24	13
9.		Арселон	60/40	саржа 2/2	313	0,26	16	20
10.	Пряжа СВМ	СВМПЭ ПЭ-1	60/40	саржа 2/2	200	0,42	16	13
11.		Арселон	60/40	саржа 2/2	179	0,33	18	24
12.		Полиамид	60/40	саржа 2/2	197	0,35	20	24

Для изготовления образцов гибридных ПКМ выбрана эпоксидная полимерная матрица ЭТ-2 и модифицированная ЭТ-4 с возможностью отверждения при температуре не выше 120 °С и предотвращения плавления СВМПЭ волокон. Приведены составы и характеристики полимерных матриц.

Также глава посвящена описанию использованных при выполнении диссертационной работы методов исследований, которые позволяют комплексно оценить влияние состава и структуры гибридной армирующей ткани на физико-механические и триботехнические свойства гибридных антифрикционных ПКМ, а также прогнозировать их поведение в различных условиях эксплуатации, что является необходимым этапом для разработки материалов с заданными свойствами. Приведенные ниже методики исследований были использованы в последующих главах для анализа экспериментальных данных и выявления закономерностей, связывающих состав, структуру и свойства разработанных антифрикционных ПКМ: определение плотности по ГОСТ 15139-69; разрушающее напряжение при сжатии по ГОСТ 23803-79; изгибающее напряжение при разрушении по ГОСТ 4648-2014; разрушающее напряжение при межслойном сдвиге ГОСТ 23804-79; триботехнические испытания по методике экспрессных комплексных испытаний, разработанной в ИПМ РАН д. ф-м. н. проф. Б. М. Гинзбургом; измерение удельного объемного электрического сопротивления в соответствии с ГОСТ Р 50499-93; определение водопоглощения по ГОСТ 12020-2018; определение изменения линейных размеров в результате водопоглощения по ГОСТ 12020-2018; исследования жизнеспособности препрега гибридного антифрикционного ПКМ путем определения растворимой части связующего и определение содержания летучих веществ. исследование структуры и химического состава поверхности трения образцов ПКМ методом растровой электронной микроскопии (РЭМ).

В третьей главе представлены результаты комплексного экспериментального исследования триботехнических и физико-механических свойств образцов гибридных антифрикционных ПКМ, изготовленных методом горячего прессования препрега, пропитанного эпоксидным связующим ЭТ-2.

Разработанные гибридные антифрикционные ПКМ на основе гибридных тканей, предназначенные для применения в тяжелонагруженных узлах трения взамен антифрикционного углепластика УГЭТ, должны удовлетворять целому ряду требований: иметь высокую прочность (разрушающее напряжение при сжатии не менее 250 МПа), низкий коэффициент трения (не более 0,09), износостойкость при трении (не более 9 мкм/км), размерную стабильность при длительной эксплуатации в воде и при этом являться диэлектриком.

Триботехнические испытания проводились с целью определить зависимость коэффициента трения и величины интенсивности линейного изнашивания от состава гибридных антифрикционных ПКМ, представленных в таблице 1. Испытания проводились по схеме вал – колодка с частичным погружением в пресную воду. Ролик диаметром 50 мм был выполнен из стали 20Х13. Частота вращения ролика составляла 400 об./мин, что соответствует линейной скорости скольжения 1 м/с. Максимальная нагрузка на образец ПКМ во время испытания составила – 1800 Н. На рисунках 2 и 3 приведены зависимости

коэффициента трения и интенсивности изнашивания гибридных ПКМ от контактного давления.

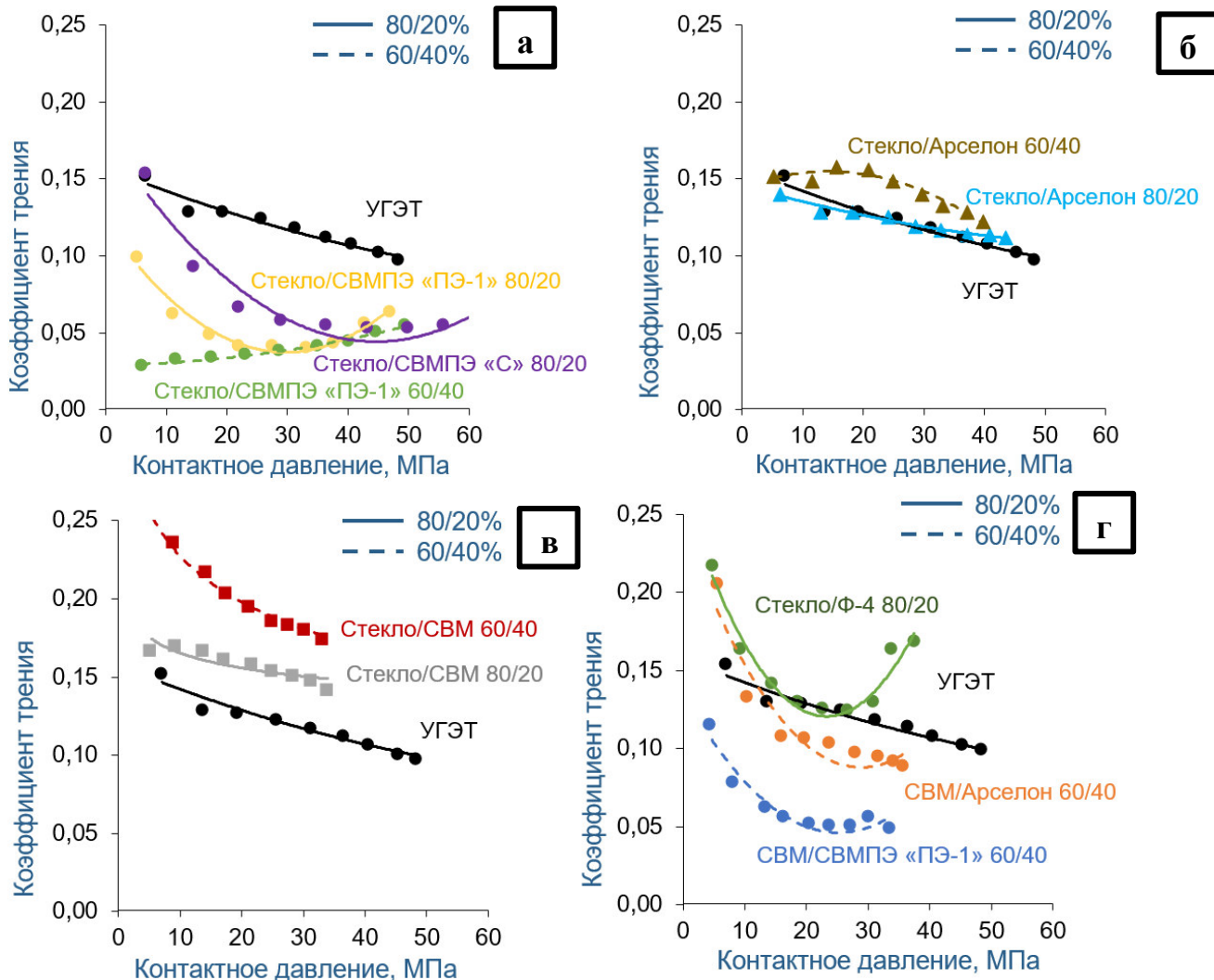


Рисунок 2 –Зависимости коэффициента трения гибридных антифрикционных ПКМ от контактного давления с различным составом армирующей ткани: а) стекло/СВМПЭ; б) стекло/Арселон; в) стекло/арамидная нить; г) ткань на основе пряжи СВМ.

Установлено, что применение СВМПЭ волокон в составе ткани значительно снижает коэффициент трения и повышает стойкость к изнашиванию. Образцы гибридных антифрикционных ПКМ на основе стеклянных и СВМПЭ волокон обладают коэффициентом трения при давлении 40 МПа в 2 раза ниже, чем у углепластика марки УГЭТ. При нагрузках свыше 10 МПа коэффициент трения снижается до 0,03–0,07. Образцы без СВМПЭ (стекло/СВМ, стекло/Арселон) имеют коэффициент трения выше 0,09, а стекло/СВМ – до 0,20 с одновременным абразивным износом стального ролика.

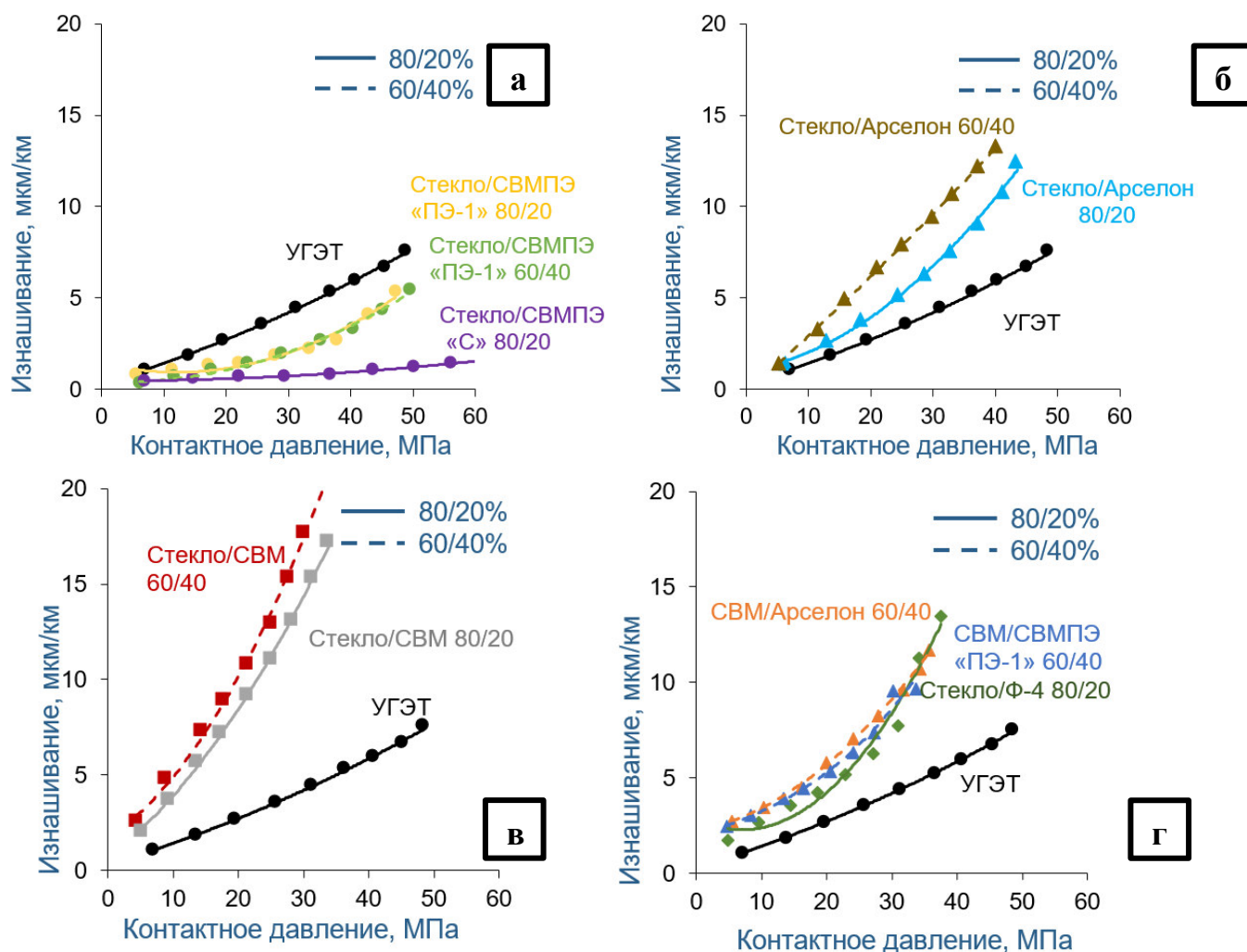


Рисунок 3 – Зависимости интенсивности изнашивания образцов гибридных антифрикционных ПКМ от давления с различным составом армирующей ткани: а) стекло/СВМПЭ; б) стекло/Арселон; в) стекло/арамидная нить; г) ткань на основе пряжи СВМ

После сравнительного анализа интенсивности изнашивания образцов гибридных антифрикционных ПКМ можно сделать вывод, что наименьшим износом обладают образцы на основе гибридной армирующей ткани из стеклянных и СВМПЭ волокон, при этом наибольшую стойкость к изнашиванию имеет образец с волокнами СВМПЭ марки «С» (180 текс).

На основе анализа изображений области трения, полученных методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) и рентгеноспектрального микроанализа был сделан вывод, что в процессе трения стеклянные волокна и полимерная матрица постепенно изнашиваются и вымываются из зоны трения, а волокна СВМПЭ, которые обладают большой текучестью и стойкостью к изнашиванию, наоборот, задерживаются в зоне трения.

Согласно литературным данным, СВМПЭ при трении образует на контртеле пленку обратного переноса, снижающую коэффициент трения и интенсивность изнашивания. При исследовании продуктов трибоконтакта установлено, что в основном они состоят из СВМПЭ, а значит СВМПЭ распределяется по поверхности металла, заполняя микронеровности поверхности, частично предотвращая прямой контакт стеклянных волокон с поверхностью металлического контртела, тем самым снижая коэффициент трения. На рисунке 4 представлены электронные фотографии поверхности трения образца

после лабораторных испытаний и фотография продуктов трибоконтакта из СВМПЭ, вытесненные из зоны трения, химический состав области трения гибридного антифрикционного ПКМ приведен в таблице 2.

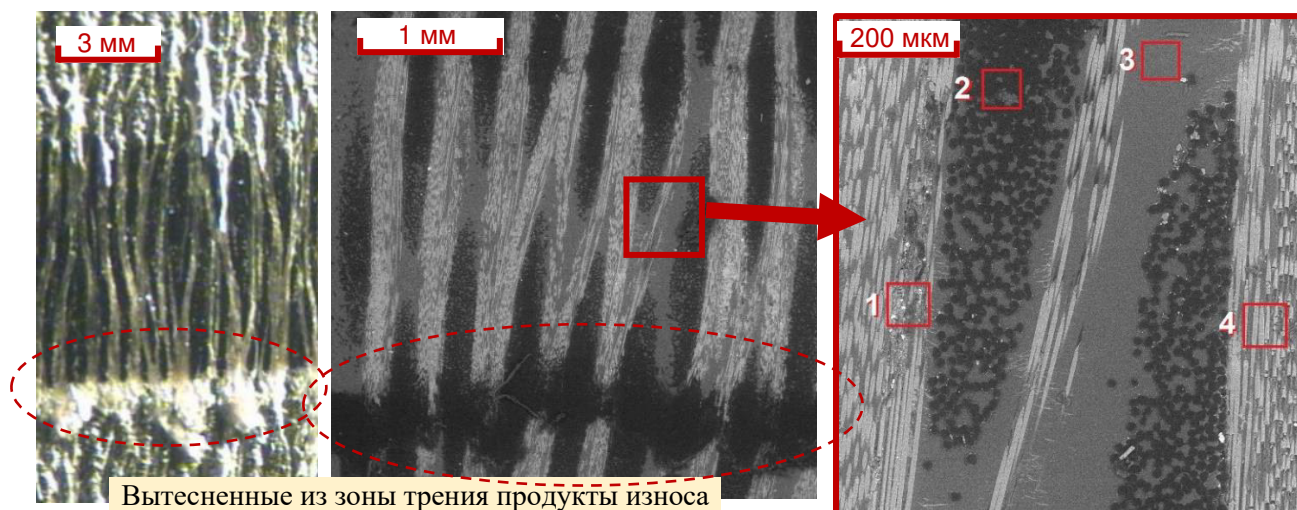


Рисунок 4 – Область трения образца ПКМ из стеклянных и СВМПЭ волокон:
а) фотография поверхности трения; б) электронная фотография продуктов износа, вытесненных из зоны трения; в) электронная фотография поверхности трения
(1 – продукты износа стального контртела, 2– волокна из СВМПЭ, 3 – полимерная матрица 4 – стеклянные волокна)

Таблица 2 - Химический состав разных областей зоны трения образца.

№	Область исследования	C, %	O, %	Mg, %	Al, %	Si, %	Cl, %	Cr, %	Fe, %
1	Продукты износа	26.76	34.14	0.96	1.15	2.00	2.58	4.28	28.13
2	Филаменты СВМПЭ	88.93	7.93	0.17	0.37	0.82	0.90	0.07	0.81
3	Полимерная матрица	62.26	22.64	1.04	1.20	2.40	9.68	0.11	0.68
4	Стеклянные филаменты	23.80	48.81	5.19	6.58	12.85	1.21	0.21	1.36

По сравнению с неорганическими волокнами органические нити имеют меньшую адгезию к полимерной матрице, пониженную прочность и жёсткость, что приводит к более низким значениям прочностных свойств органопластиков.

В разработанных гибридных антифрикционных ПКМ органические волокна играют роль антифрикционного наполнителя, способствующего снижению коэффициента трения и повышению стойкости к изнашиванию, в то время как роль армирующего материала берут на себя неорганические волокна, вплетаемые в армирующую ткань. Таким образом механическая прочность гибридного антифрикционного ПКМ напрямую зависит от свойств неорганических армирующих волокон и их соотношения в составе армирующей ткани.

Для исследования зависимости механических свойств от состава гибридной армирующей ткани и соотношения разных типов волокон в ее составе проводились разрушающие испытания на испытательной машине Shimadzu AG-50kNX и определялись следующие характеристики: разрушающее напряжение при сжатии, изгибающее напряжение при разрушении, разрушающее напряжение при межслойном сдвиге. Результаты механических испытаний образцов ПКМ, армированных разными гибридными тканями приведены в таблице 3 и на рисунке 5.

Таблица 3 - Результаты механических испытаний гибридных антифрикционных ПКМ.

№	Состав гибридной армирующей ткани			Максимальное напряжение при сжатии, МПа	Максимальное напряжение при изгибе, МПа	Межслойный сдвиг, МПа
	Основа	Уток	Соотнош.			
1	ВМПС8	СВМПЭ ПЭ-1	80/20%	215 ± 34	352 ± 23	25 ± 4
2		СВМПЭ ПЭ-1	60/40%	114 ± 27	204 ± 15	14 ± 2
3		СВМПЭ С	80/20%	300 ± 36	372 ± 23	33 ± 4
4		СВМПЭ ПЭ-2	80/20%	260 ± 41	327 ± 27	22 ± 3
5		Ф-4 нить	80/20%	292 ± 39	470 ± 38	40 ± 3
6		СВМ-Н	80/20%	346 ± 46	605 ± 50	61 ± 5
7		СВМ-Н	60/40%	283 ± 47	432 ± 48	41 ± 3
8		Арселон	80/20%	327 ± 25	612 ± 52	47 ± 5
9		Арселон	60/40%	264 ± 29	429 ± 37	34 ± 4
10	Пряжа СВМ	СВМПЭ ПЭ-1	60/40%	77 ± 19	124 ± 28	12 ± 3
11		Арселон	60/40%	113 ± 16	154 ± 17	10 ± 3
12		Полиамид	60/40%	122 ± 20	72 ± 14	20 ± 5

Разрушающее напряжение, МПа

Изгиб Сжатие

Сдвиг

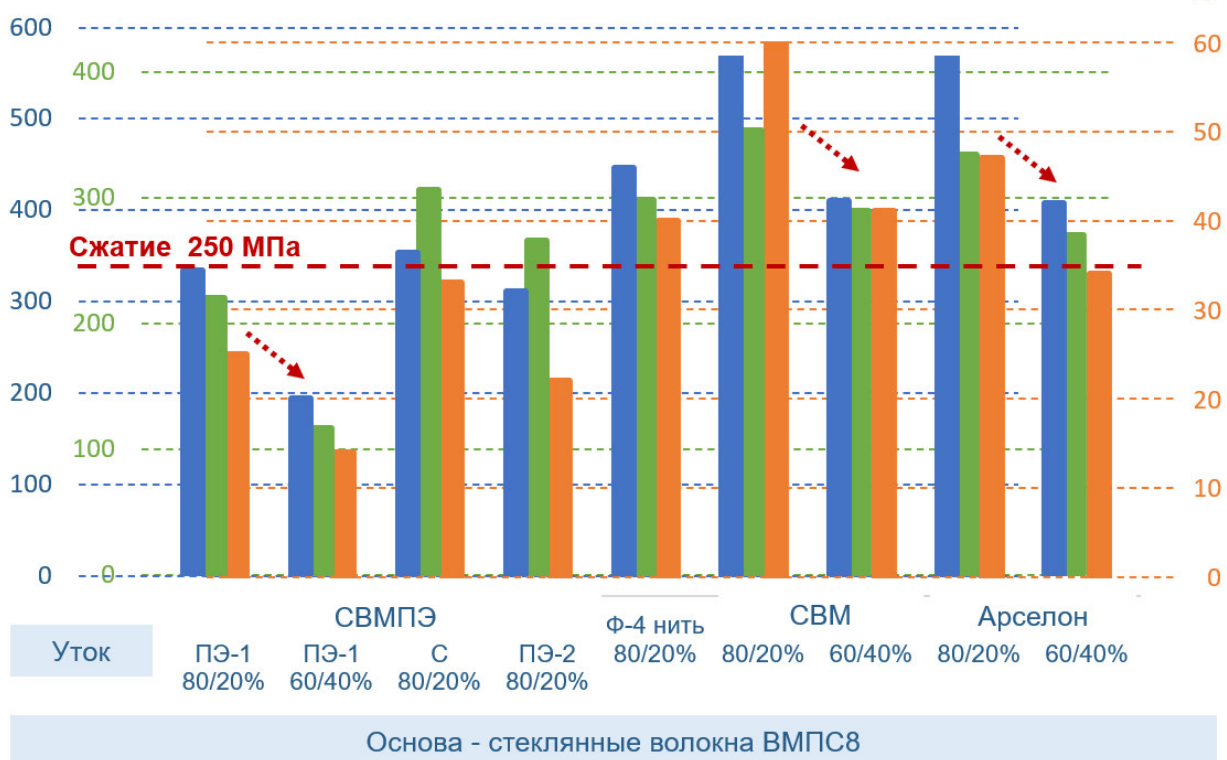


Рисунок 5 – Диаграмма зависимости механических свойств гибридных антифрикционных ПКМ на основе стеклянных волокон от состава и соотношения гибридной армирующей ткани

Как и предполагалось, наибольшей прочностью обладают гибридные антифрикционные ПКМ, в состав которых входят стеклянные волокна (ВМПС8). Из результатов разрушающих испытаний установлено, что уменьшение содержания стеклянных армирующих волокон ВМПС8 с 80% до 60% приводит к снижению прочностных характеристик гибридных антифрикционных ПКМ в среднем на 30%.

Вследствие высоких значений модуля упругости и благодаря наличию полярных гетероциклов и амидных групп у высокомолекулярных органических наполнителей: полиоксадиазольной (Арселон) и арамидной (СВМ) нитей, в сочетании с повышенной адгезией к эпоксидной матрице, гибридные антифрикционные ПКМ на базе ВМПС8 + Арселон и ВМПС8 + СВМ обладают на 30-50% более высокими прочностными характеристиками в сравнении с ПКМ на основе гибридной ткани из стеклянных нитей с добавлением волокон из линейных полимеров без полярных групп (сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и фторопласта (Ф-4)).

Для оценки диэлектрических свойств гибридных антифрикционных ПКМ проведены измерения удельного объёмного электрического сопротивления, в ходе которых было установлено, что все гибридные антифрикционные ПКМ являются диэлектриками. Значения электрического сопротивления составляют от $0,28 \cdot 10^{13}$ до $7,0 \cdot 10^{13}$ Ом·м, что на 10–11 порядков превышает показатель углепластика УГЭТ ($1,5 \cdot 10^2$ Ом·м). Это гарантирует отсутствие гальванических токов и предотвращает электрохимическую коррозию металлических контртел в морской воде. Результаты измерений удельного объёмного электрического сопротивления приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты испытаний по определению удельного объёмного электрического сопротивления

Состав гибридной армирующей ткани образца ПКМ	Удельное объёмное электрическое сопротивление, Ом·м
ВМПС8/СВМПЭ ПЭ-1(80/20%)	$7,5 \times 10^{13}$
СВМ и Арселон (60/40%)	$0,5 \times 10^{13}$
СВМ и СВМПЭ (60/40%)	$0,4 \times 10^{13}$
ПКМ марки УГЭТ	$1,5 \times 10^2$

Для исследования водопоглощения образцы гибридных антифрикционных ПКМ погружались в емкость с водой и выдерживались заданное время при определенной температуре в испытательной жидкости. Для определения количества сорбированной воды производились измерения массы образцов до и после выдержки в пресной воде, изменение линейных размеров в результате водопоглощения фиксировалось микрометром. В таблице 5 приведены результаты испытаний образцов гибридных антифрикционных ПКМ.

По результатам 24 часовых испытаний минимальное водопоглощение показали образцы № 1-8 (0,010–0,079% за 24 часа). Изменение линейных размеров у данных образцов также минимальное. Образцы № 8-12 на основе только органических волокон (СВМ/полиамид, СВМ/Арселон, СВМ/фторопласт) продемонстрировали значительно более высокое водопоглощение (0,457–0,667%) и набухание (0,55–1,36%).

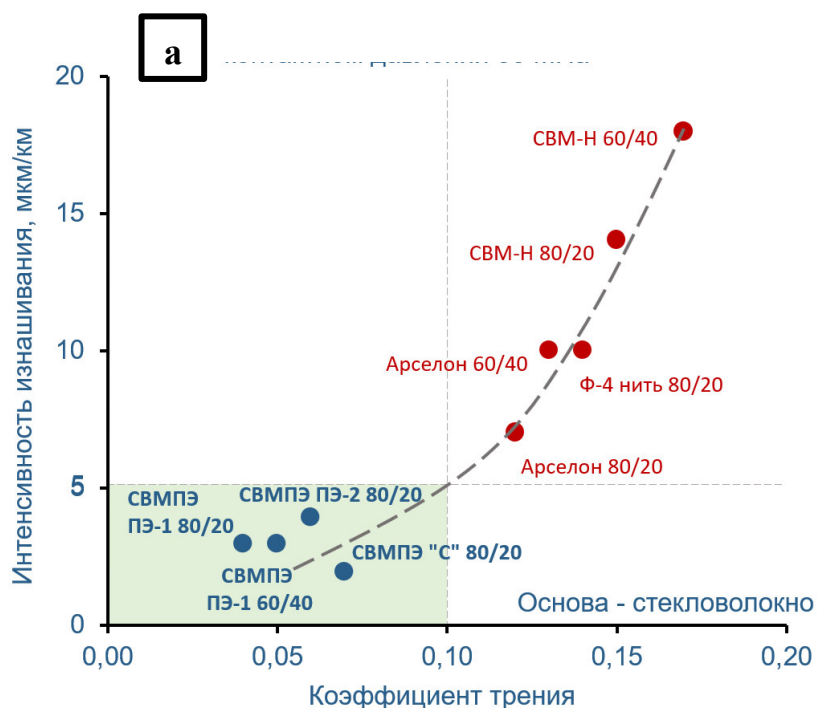
Установлено, что применение органических волокон марки «Арселон» приводит к большому значению коэффициента набухания в результате водопоглощения (в гибридном антифрикционном ПКМ на основе волокон СВМ и 40 % волокон «Арселон» коэффициент набухания достигает 1,4 % за 24 часа). Данные показатели связаны со строением и химической структурой полиоксадиазольных волокон. Для предотвращения набухания и, как следствие, заклинивания узла трения, рекомендуется исключать данные волокна из

состава ПКМ. Вторым негативным эффектом водопоглощения является постепенная деградация электроизоляционных свойств из-за увеличения количества воды в структуре ПКМ.

Таблица 5 – Результаты испытаний по определению водопоглощения и изменения линейных размеров в результате водопоглощения

№	Состав гибридной армирующей ткани			Водопоглощение за 24 ч., %	Коэф.набухания за 24 ч., %
	Основа	Уток	Соотнош.		
1	ВМПС8	СВМПЭ ПЭ-1	80/20%	0,023	0,00
2		СВМПЭ ПЭ-1	60/40%	0,067	0,00
3		СВМПЭ С	80/20%	0,045	0,00
4		СВМПЭ ПЭ-2	80/20%	0,072	0,00
5		Ф-4 нить	80/20%	0,061	0,00
6		СВМ-Н	80/20%	0,027	0,00
7		СВМ-Н	60/40%	0,010	0,05
8		Арселон	80/20%	0,015	0,05
9		Арселон	60/40%	0,079	0,22
10	Пряжа СВМ	СВМПЭ ПЭ-1	60/40%	0,111	0,11
11		Арселон	60/40%	0,457	1,36
12		Полиамид	60/40%	0,537	0,77

По результатам комплекса лабораторных исследований установлено, что ПКМ на основе стеклянных и СВМПЭ волокон обладает наилучшими триботехническими характеристиками (рисунок 6а) и достаточной прочностью. На рисунке 6б приведены основные сравнительные характеристики разработанных гибридных антифрикционных ПКМ.



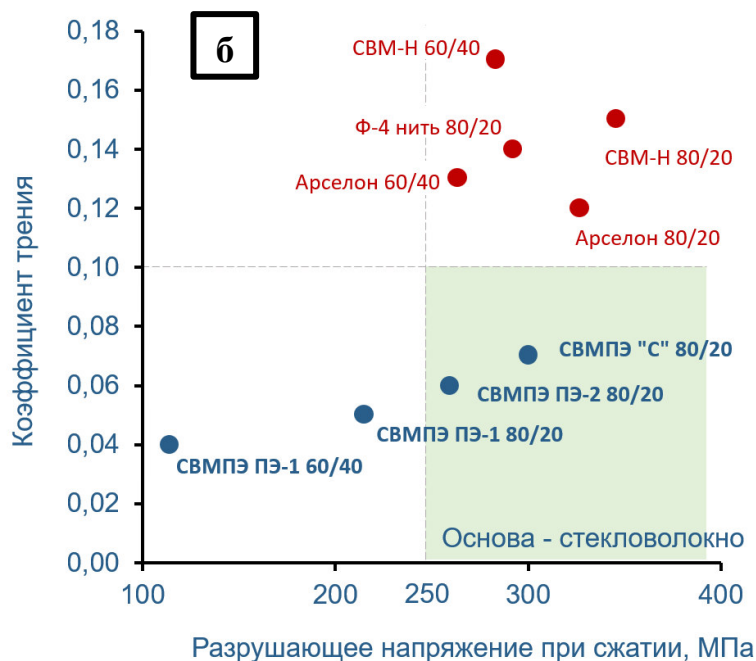


Рисунок 6 – результаты испытаний гибридных антифрикционных ПКМ на основе стеклянных волокон: а) Сопоставление величины коэффициента трения и интенсивности изнашивания при контактном давлении 30 МПа, б) Сопоставление прочностных и триботехнических характеристик гибридных антифрикционных ПКМ (б)

Проведя анализ результатов комплекса триботехнических и физико-механических испытаний, в качестве основного материала был выбран гибридный ПКМ на основе стеклянных и СВМПЭ волокон марки ПЭ-1 с соотношением 80/20, так как он обладает минимальным коэффициентом трения ($f_c=0,4$ при контактном давлении 30 МПа) и достаточной прочностью (предел прочности при сжатии 215 МПа). Гибридный антифрикционный материал, выбранный для дальнейших исследований, получил название ПЭСТ.

Для подтверждения того, что электроизоляционные свойства гибридного антифрикционного ПКМ на основе стеклянных и СВМПЭ волокон (образец №1 из ткани с составом ВМПС8/СВМПЭ ПЭ-1 в соотношении 80/20% далее ПЭСТ) не способствуют развитию коррозии, было проведено экспериментальное исследование, в ходе которого один ролик из 20Х13 помещался на пластину из антифрикционного ПКМ марки УГЭТ, а второй ролик на пластину из гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ, после чего обе гальванические пары по отдельности помещались в емкость с синтетической морской водой с полным погружением на 90 дней при 20° С.

Так как углепластик обладает положительным потенциалом в морской воде равным +0,43В, а сталь 20Х13 отрицательным потенциалом –0,30В (в активном состоянии в процессе трения), то при контакте этих материалов из-за большой разницы потенциалов процесс коррозии стали 20Х13 значительно ускоряется, в данной контактной паре углепластик выступает в роли катода, а стальной ролик в роли анода.

В результате предыдущих исследований было установлено, что гибридные антифрикционные ПКМ обладают электроизоляционными свойствами, что полностью исключает отрицательное влияние ПЭСТ на инициирование коррозии стали 20Х13.

По истечении срока выдержки (90 дней) в синтетической морской воде на поверхности ролика из стали 20Х13, контактирующей с углепластиком, образовались

коррозионные язвы, покрытые продуктами коррозии. В то время как состояние поверхности ролика, находящегося в среде с пластиной из гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ, визуально не изменилось. На рисунке 7 представлены фотографии пар образцов ПКМ-ролик до и после 90-дневного пребывания в синтетической морской воде.



Рисунок 7 – Фотографии гальванической пары образец ПКМ – ролик из 20Х13:
а) ПЭСТ и ролик до выдержки в воде; б) ПЭСТ и ролик после 90 дней выдержки в воде;
в) УГЭТ и ролик до выдержки в воде; г) УГЭТ и ролик после 90 дней выдержки в воде

В **четвертой главе** представлены результаты выбора оптимального состава гибридной армирующей ткани и отработка технологических параметров изготовления гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ (на основе стеклянных волокон и волокон СВМПЭ), направленные на повышение его прочностных, триботехнических и эксплуатационных свойств.

Как было установлено из результатов исследований, ПКМ марки ПЭСТ сочетает наилучшие триботехнические характеристики (коэффициент трения до $f_s = 0,07$, интенсивность изнашивания $I_h = 3$ мк/км), высокие прочностные (предел прочности при сжатии 215 МПа) и необходимые физические свойства (удельное электрическое сопротивление $7,0 \cdot 10^{13}$ Ом·м, водопоглощение 0,06%).

Однако, одним из требований к УГЭТ является уровень прочности при сжатии не менее 250 МПа (ТУ 5.966-11704-99 УГЭТ), а значит необходима была дальнейшая работа по увеличению прочности гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ без снижения триботехнических характеристик.

Основываясь на литературных данных и результатах проведенных механических испытаний, была предложена упрощенная линейная модель зависимости прочности при сжатии гибридного антифрикционного ПКМ от содержания в нем стеклянных волокон.

Согласно предварительным расчетам, были разработаны армирующие ткани с соотношением волокон основы/утка: 80%/20% и 60%/40%. Результаты проведенных механических испытаний (рисунок 8) образцов гибридных антифрикционных ПКМ на основе эпоксидной полимерной матрицы ЭТ-2 и гибридной армирующей ткани с разным соотношением стеклянных и СВМПЭ волокон не полностью совпали с расчетными, так как не учитывали адгезионные характеристики органических волокон. Дополнительно для

уточнения соотношения стеклянных и СВМПЭ волокон, был разработан состав с еще большим содержанием стеклянных волокон (80-85%).

Образец с содержанием СВМПЭ волокон 40% обладает прочностью при сжатии, равной 111 МПа. Данный показатель меньше, чем показатель прочности при сжатии полимерной матрицы без армирующей ткани, что наглядно демонстрирует негативное влияние СВМПЭ на прочность гибридного антифрикционного ПКМ. Низкая адгезия СВМПЭ настолько снижает прочность, что 60% стеклянных волокон в составе армирующей ткани недостаточно, чтобы компенсировать данный эффект.

На рисунке 9 приведены графики триботехнических характеристик гибридного материала марки ПЭСТ на основе трех гибридных армирующих тканей с разным содержанием стеклянных и СВМПЭ волокон.

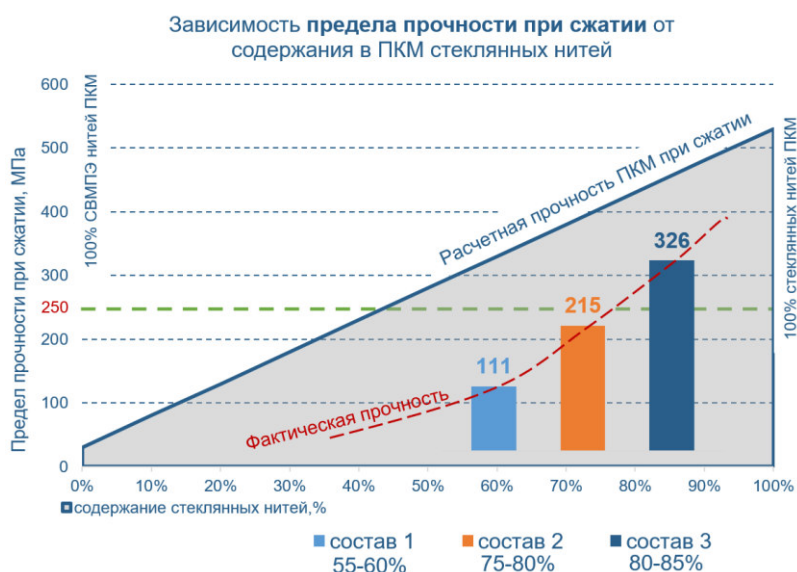


Рисунок 8 – Сравнение прогнозируемых результатов прочности при сжатии и полученных при испытаниях.

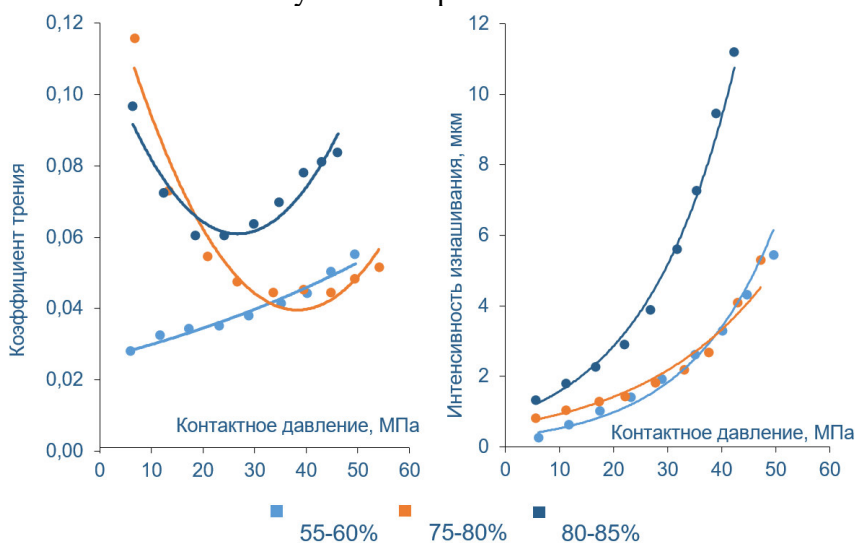


Рисунок 9 – Графики зависимости коэффициента трения и интенсивности изнашивания от давления гибридного материала марки ПЭСТ на основе трех гибридных армирующих тканей с разным содержанием стеклянных и СВМПЭ волокон.

Установлено, что у образца с большим содержанием стеклянных волокон (80-85%) значительно снизились триботехнические характеристики (рисунок 9), что в свою очередь показывает негативное влияние стеклянных волокон на процесс трения.

Таким образом, с учетом результатов триботехнических и прочностных испытаний для дальнейших исследований и увеличения прочности выбран наиболее сбалансированный состав 2, который сочетает прочность, низкий коэффициент трения и высокую стойкость к изнашиванию.

Изначально для изготовления гибридных антифрикционных ПКМ была выбрана эпоксидная матрица ЭТ-2 с температурой отверждения 150°C. Как было установлено методом дифференциально сканирующей калориметрии (рисунок 10), уже при 130 °C происходит процесс плавления волокна СВМПЭ марки ПЭ-1. В качестве новой эпоксидной матрицы была выбрана ЭТ-4 с возможностью отверждения до 120°C.

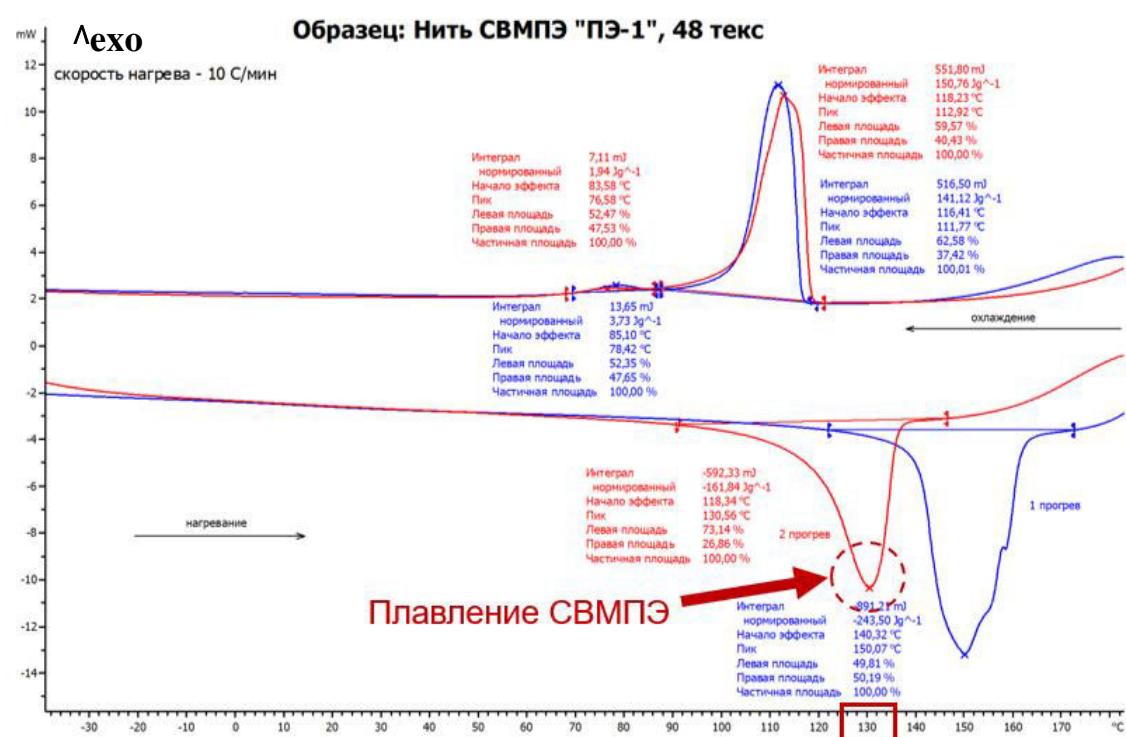


Рисунок 10 – График температур и фазовых переходов нити СВМПЭ марки ПЭ-1.

У полимерной матрицы ЭТ-4 в два раза больше показатель максимальной деформации при сжатии, на 10% больше предел прочности, а коэффициент трения на 30% ниже по сравнению с ЭТ-2. Гибридный антифрикционный ПКМ марки ПЭСТ на основе модифицированной полимерной матрицы ЭТ-4 получил название ПЭСТ-4.

ПЭСТ оптимально сочетает в себе необходимые прочностные свойства, обусловленные адгезионными характеристиками стеклянных волокон, и высокие триботехнические характеристики, приобретенные за счет включения в состав волокон из СВМПЭ. Однако, ввиду низкой адгезии СВМПЭ волокон к полимерной матрице, актуальной задачей остается дополнительное повышение прочностных характеристик материала за счет применения гибридной армирующей ткани, прошедшей процесс активации поверхности СВМПЭ волокон для ответственных узлов трения.

Для активации СВМПЭ волокон был выбран известный способ воздействия барьерного разряда. На рисунке 11 представлены электронные микрофотографии исходного

филамента волокна СВМПЭ и активированного в условиях низкочастотного плазменного разряда.

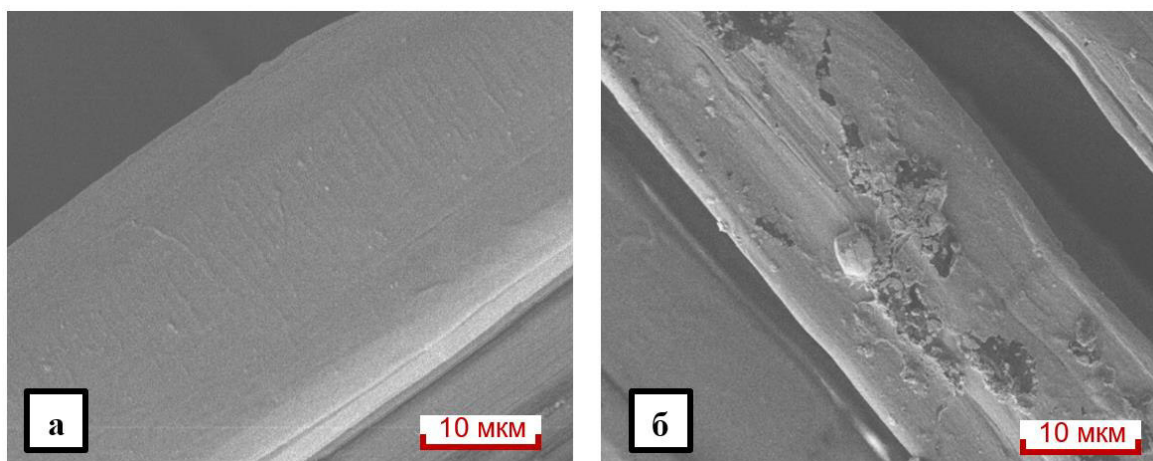


Рисунок 11 – Электронные микрофотографии: а) филамент волокна СВМПЭ до обработки; б) филамент волокна СВМПЭ после активирования поверхности в условиях НЧ – разряда

Отличительной особенностью волокон на основе СВМПЭ является их низкая поверхностная энергия (30 ± 3 мДж/м²), а для хорошего смачивания необходимо соблюдение условий: поверхностная энергия армирующего материала должна быть выше поверхностной энергии полимерной матрицы (40 ± 4 мДж/м²). В то же время, молекулы СВМПЭ имеют полностью насыщенные химические связи.

Обработка СВМПЭ волокон в плазме низкочастотного разряда приводит к образованию на их поверхности кислородсодержащих полярных групп и шероховатости (рисунок 11б), которые обеспечивают повышение межфазного взаимодействия (адгезии) со связующим. Гибридный антифрикционный ПКМ марки ПЭСТ на основе модифицированной полимерной матрицы ЭТ-4 и гибридной ткани, прошедшей активацию СВМПЭ волокон, получил название ПЭСТ-4 актив.

После выбора состава армирующей ткани, способа модификации поверхности волокна СВМПЭ и модифицированной полимерной матрицы были изготовлены образцы и проведены лабораторные испытания, из результатов которых было установлено, что применение новой полимерной матрицы ЭТ-4 привело к повышению предела прочности ПЭСТ-4 при сжатии на 20%, предела прочности при изгибе на 40% и предела прочности при межслойном сдвиге на 10%. Предел прочности ПЭСТ-4 актив на основе гибридной ткани, прошедшей активацию СВМПЭ волокон, при сжатии вырос на 46%, при изгибе - на 68% и при межслойном сдвиге - на 36%. Результаты механических испытаний гибридных антифрикционных ПКМ приведены в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты механических испытаний гибридных антифрикционных ПКМ

Характеристики	ПЭСТ	ПЭСТ-4	ПЭСТ-4 актив
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа	215	260	315
Разрушающее напряжение при изгибе, МПа	352	500	595
Модуль упругости при сжатии при 20-60 МПа, ГПа	4	4	4
Макс. Деформация при сжатии, %	5	6	7
Разрушающее напряжение при межслойном сдвиге, МПа	25	29	34

Триботехнические испытания образцов ПЭСТ-4 и ПЭСТ-4 актив проводились по уже описанной схеме вал – колодка с роликом из стали 20Х13. Линейная скорость скольжения составляла 1 м/с, а максимальная нагрузка на образец ПКМ во время испытания составила 1800 Н. Результаты триботехнических испытаний изображены в виде зависимостей на рисунке 12.

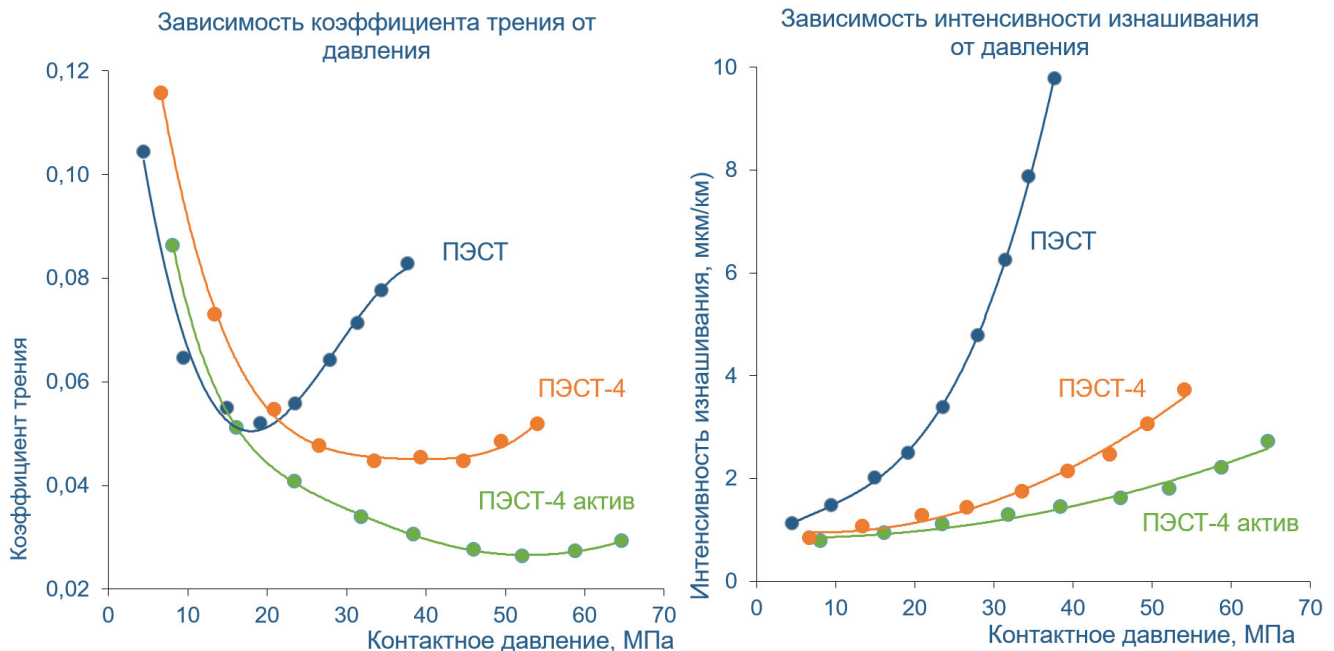


Рисунок 12 – Результаты триботехнических испытаний:

а) зависимость коэффициента трения от контактного давления; б) зависимость интенсивности изнашивания от контактного давления.

Из результатов исследования трибосвойств ПЭСТ, ПЭСТ-4 и ПЭСТ-4 актив установлено, что применение полимерной матрицы ЭТ-4 (ПЭСТ-4) на 40% снижает коэффициент трения при контактном давлении 30 МПа и в 5 раз увеличивает стойкость к изнашиванию при той же нагрузке.

Использование в качестве армирующего материала гибридной ткани, которая прошла процесс активации поверхности СВМПЭ волокон (ПЭСТ-4 актив) привело к снижению коэффициента трения при контактном давлении 30 МПа в два раза.

По результатам проведенных исследований в качестве основного материала для дальнейших стендовых испытаний был выбран материал ПЭСТ-4, так как он обладает высокой прочностью (при сжатии 260 МПа), низким коэффициентом трения (при давлении 30 МПа $F_c=0,4$) и высокой стойкостью к изнашиванию ($I_h=0,43$ мкм). Эффект повышения адгезии СВМПЭ волокон для гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4 актив имеет малый срок жизнеспособности - около семи суток, что значительно усложняет процесс производства подшипников скольжения. Данная технология рекомендована к применению для ответственных конструкций.

В пятой главе представлены результаты разработки и оптимизации технологического процесса изготовления гибридных антифрикционных ПКМ на основе

эпоксидной матрицы ЭТ-4 с возможностью отверждения при 120°C, основанной на технологии изготовления углепластика УГЭТ.

Разработана технология изготовления изделий из гибридного антифрикционного ПКМ, включающая четыре стадии: изготовление гибридной армирующей ткани на ткацком станке; пропитка ткани на вертикальной машине по оптимизированному режиму; горячее прессование препрега; механическая обработка отвержденной заготовки.

Оптимизирована технология пропитки на вертикальной пропиточно-сушильной машине УПСТ 1000. Установлено, что традиционные режимы сушки (температура более 130 °С) приводят к термической деструкции волокон СВМПЭ. Экспериментально подобраны щадящие режимы пропитки: снижение температуры в сушильных камерах при одновременном уменьшении скорости протяжки ткани, что позволяет удалить растворитель до остаточного содержания 0,2–8% без перегрева органических волокон. Обеспечена жизнеспособность препрега, пригодного для дальнейшего горячего прессования.

Оптимизированы параметры горячего прессования. Для предотвращения плавления СВМПЭ снижена температура отверждения до 120 °С, увеличено время отверждения до 9 часов для полной полимеризации эпоксидного связующего.

Выявлены особенности механической обработки гибридного ПКМ марки ПЭСТ. Предложен эффективный финишный метод обработки – шлифование на высоких оборотах.

В шестой главе представлены результаты стендовых испытаний подшипников скольжения, изготовленных из разработанного гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4, в условиях, максимально приближенных к условиям реальной эксплуатации механизмов морской техники, а также внедрения разработанного гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4 в конструкцию устройства имитации рулевых приводов перекаладки ЦАКИ.441431.017.

Стендовые испытания образцов подшипников скольжения из гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4 в паре с валом из стали 45 ГОСТ 1050-2013 с хромовым покрытием по ОСТ5.9048-96 проводились в ЗАО «Центральный научно-исследовательский институт Судового машиностроения» (ЗАО «ЦНИИ СМ»).

В результате испытаний было установлено, что ПЭСТ-4 работоспособен при контактном давлении 12 МПа, скорости вращения вала 0,5 м/с. Установлено, что при продолжительности испытаний 50 часов, износ исследуемой втулки составил 3 мкм/км. При этом контактные поверхности вала и втулки приобрели заполированный вид, без дефектов на поверхности трения. На рисунке 13 приведены фотографии втулок из гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4 и вала с хромовым покрытием после испытаний.

После успешных стендовых испытаний в ЗАО «ЦНИИ СМ» было принято решение о применении гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4 в конструкции устройства имитации рулевых приводов перекаладки ЦАКИ.441431.017 для испытаний рулевых машин.

Характерный режим работы устройства – качание в пределах углов $\pm 35^\circ$. Удельное давление на опоры возрастает с увеличением угла перекаладки. Период непрерывной работы до 5000 ч. При этом до 80% времени качание производится на малых углах до 10 градусов в любую сторону и характеризуется величинами нагрузок от 10% до 15% от максимальных расчетных.

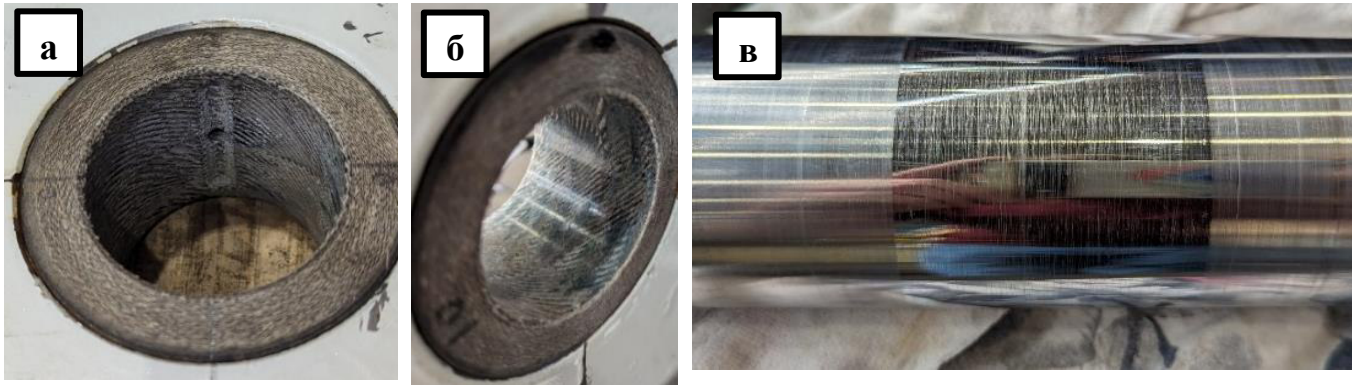


Рисунок 13 – Внешний вид пары трения после испытаний: а) втулка из материала ПЭСТ-4 до испытаний; б) втулка из материала ПЭСТ-4 после испытаний; в) хромированный вал после испытаний.

В настоящее время подшипники скольжения ЦАКИ.713192.018, ЦАКИ.713192.018-01, ЦАКИ.713342.025, ЦАКИ.713392.037, ЦАКИ.723323.044, ЦАКИ.714294.004, ЦАКИ.713192.018 из гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4 успешно эксплуатируются в составе устройства при следующих условиях:

- микроперемещения качающихся узлов на сравнительно низких скоростях скольжения от 0,02 до 0,05 м/сек и от 0,2 до 0,5 м/сек;
- типы смазки: постоянная и периодическая смазка водой;
- удельная нагрузка от 0,5 до 6 МПа.

После 500 часов исправной и стабильной работы был зафиксирован минимальный износ поверхностей трения, при котором размеры подшипников скольжения находились в допуске, а на поверхности стальных контртел не было обнаружено следов коррозии). На рисунке 14 приведены фотографии подшипников скольжения после 500 часов работы.

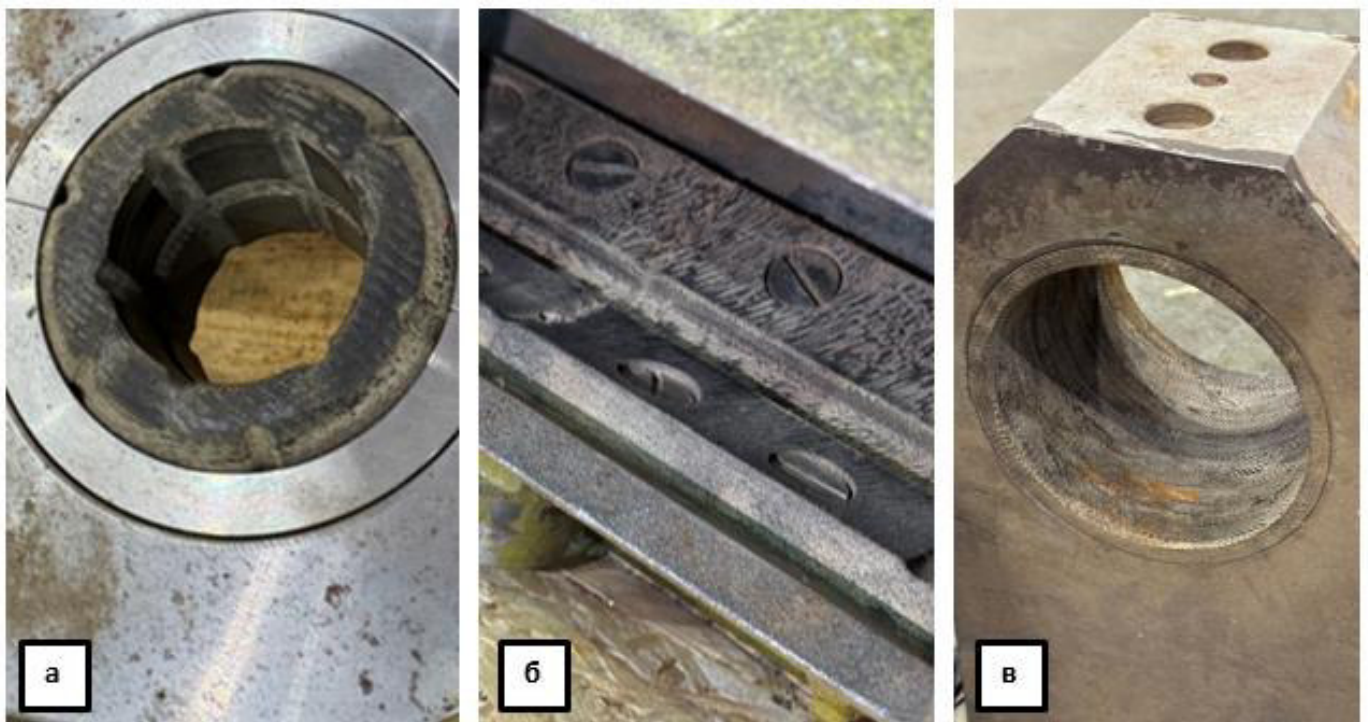


Рисунок 14 – Фотографии подшипников скольжения после стендовых испытаний:
а) Шар рулевого механизма; б) Накладка - направляющая; в) Втулка с буртом.

По результатам 500-часовой работы устройства при удельном давлении 0,5–6 МПа, режиме качания с углами до $\pm 35^\circ$ и с периодической водяной смазкой установлено, что износ втулок, накладок и шаров рулевого механизма находится в пределах нормы, материал сохранил целостность (сколов и расслоений не обнаружено).

В Приложении 1 представлен акт внедрения результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения диссертационной работы разработан состав и технология изготовления гибридного антифрикционного ПКМ на основе гибридной армирующей ткани и эпоксидной полимерной матрицы для высоконагруженных узлов трения, смазываемых водой, который обеспечивает стойкость к контактной коррозии металлических контртел за счет диэлектрических свойств.

1. В результате проведённого обзора научной литературы и анализа рынка армирующих волокон с учетом прочностных свойств, триботехнических характеристик и структуры выбраны органические и неорганические армирующие нити и соотношения разных типов волокон (80/20% и 60/40%) для создания гибридных армирующих тканей. Учитывая особенности переработки органических армирующих волокон, в том числе из СВМПЭ, выбрана модифицированная термореактивная полимерная матрица ЭТ-4 с возможностью отверждения при 90°C

2. Выбраны методики и проведены исследования влияния состава армирующей ткани на физико-механические, коррозионные свойства и триботехнические характеристики гибридных антифрикционных ПКМ, экспериментально установлено:

- прочностные свойства гибридных ПКМ, в состав которых входят стеклянные волокна (не менее 80%), не уступают прочностным свойствам углепластика УГЭТ и находятся в диапазоне показателя прочности при сжатии 250 МПа – 350 МПа

- коэффициент трения и величина линейного износа образцов гибридных антифрикционных ПКМ на основе стеклянных и СВМПЭ волокон при контактном давлении 30 МПа ($I_h = 1,3 \text{ мкм/км}$, $f_s = 0,04$) ниже в сравнении с углепластиком марки УГЭТ ($I_h = 4,9 \text{ мкм/км}$, $f_s = 0,07$)

- гибридные ПКМ, в состав которых не входят органические волокна марки Арселон, обладают высокой стойкостью к водопоглощению и не изменяют линейных размеров при нормальном давлении (в гибридном ПКМ на основе волокон СВМ и 40 % волокон «Арселон» коэффициент набухания достигает 1,4 % за 24 часа)

- продукты износа в основном состоят из частиц СВМПЭ, о чем свидетельствуют результаты исследований структуры и химического состава поверхности трения образцов гибридных антифрикционных ПКМ на основе стеклянных и СВМПЭ волокон, выполненные методом РЭМ с использованием растрового электронного микроскопа Tescan Vega

- образцы гибридных антифрикционных ПКМ разработанных составов являются диэлектриками, показатели удельного объемного электрического сопротивления гибридных ПКМ на 10 порядков превосходят показатели углепластика марки УГЭТ

- по результатам лабораторных испытаний образцов гибридных ПКМ, состоящих из разных по составу и соотношению типов волокон, выбран ПКМ на основе модифицированной эпоксидной полимерной матрицы ЭТ-4 и гибридной армирующей ткани из стеклянных и СВМПЭ волокон – марки ПЭСТ-4. В настоящей работе показано, что гибридный материал марки ПЭСТ-4 оптимально сочетает в себе необходимые прочностные свойства, обусловленные механическими и адгезионными характеристиками стеклянных волокон, и высокие триботехнические характеристики, обеспечиваемые волокнами из СВМПЭ

3. Разработана и внедрена в производство технология изготовления новых гибридных антифрикционных ПКМ на основе гибридной армирующей ткани и модифицированной полимерной матрицы.

4. Для проведения стендовых испытаний была изготовлена опытная партия подшипников скольжения из разработанного гибридного антифрикционного ПКМ

5. В ходе проведения стендовых испытаний опытных образцов подшипников скольжения в ЗАО «Центральный научно-исследовательский институт Судового машиностроения» при условиях, характерных для узлов трения судовых механизмов, установлено, что разработанный гибридный антифрикционный ПКМ марки ПЭСТ-4 полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к материалам, работающим в тяжело нагруженных узлах трения. При контактом давлении 12 МПа, скорости вращения вала 0,5 м/с и продолжительности испытаний 50 часов в паре с валом из стали 45 с хромированным покрытием, износ исследуемой втулки составил 3 мкм/км, что подтверждает эксплуатационную надежность материала ПЭСТ-4.

Основные результаты диссертационной работы представлены в следующих публикациях:

1. Александров А.С., Петров В.М., Шарко Е.А. «Методики исследования обрабатываемости резанием полимерных композиционных материалов и оценки параметров качества поверхностного слоя» // **Научно-производственный журнал «Металлообработка»**, 2021 № 5-6 DOI: 10.25960/mo.2021.5-6.10 с.10-19;

2. Лишевич И. В., Саргсян А. С., Дворянцев Д. Д., Шарко Е. А. Исследование физико-механических и триботехнических свойств антифрикционного углепластика на основе модифицированной термореактивной матрицы // **Вопросы материаловедения, 2024 № 2 (118)** DOI: 10.22349/1994-6716-2024-118-2-91-103 с. 91-103;

3. Анисимов А. В., Лишевич И. В., Саргсян А. С., Лобынцева И. В., Блышко И. В., Соболев М. Ю., Дворянцев Д. Д., Шарко Е. А. Разработка и исследование нового гибридного антифрикционного полимерного композиционного материала с диэлектрическими свойствами // **Вопросы материаловедения, 2025 № 1 (121)** DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-90-99 с. 90-99;

4. Дворянцев Д. Д., Анисимов А. В., Лишевич И. В., Саргсян А. С., Сорокина Е.П., Шарко Е.А. Получение препрега методом пропитки водной суспензией термопластичного полимера // **Вопросы материаловедения, 2025 № 1 (121)** DOI: 10.22349/1994-6716-2025-121-1-100-110 с. 100-110;

5. Шарко Е.А., Саргсян А.С., Лишевич И.В., Морозов Д.Л., Прокопов И.В. Особенности лезвийной обработки антифрикционных углепластиков // Сборник трудов

отраслевой научно-технической конференции «Новые технологии в судостроении» («НТС-2022») в АО «Центр технологии судостроения и судоремонта», с.229-235;

6. Шарко Е.А., Саргсян А. С., Блышко И.В., Соболев М.Ю., Дворянцев Д.Д.. Исследование стойкости антифрикционных ПКМ к тормозному гамма-излучению // Сборник тезисов 20-конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» («КМУС»-2023) в НИЦ «Курчатовский институт»- ЦНИИ КМ «Прометей», с.32;

7. Дворянцев Д. Д., Лишевич И. В., Саргсян А. С., Морозов Д. Л., Шарко Е. А. Исследование физико-механических и триботехнических свойств антифрикционного углепластика на основе модифицированной термореактивной матрицы // Сборник тезисов 20-конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» («КМУС»-2023) в НИЦ «Курчатовский институт»- ЦНИИ КМ «Прометей», с. 94;

8. Дворянцев Д. Д., Лишевич И. В., Саргсян А. С., Савелов А. С., Шарко Е. А. Антифрикционный углепластик на основе модифицированной термореактивной матрицы // Сборник тезисов Юбилейного X Всероссийского Молодежного научного форума с международным участием «Open Science 2023» в НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, 2023. с. 187;

9. Дворянцев Д. Д., Лишевич И. В., Саргсян А. С., Савелов А. С., Шарко Е. А. Новый антифрикционный углепластик на основе модифицированной термореактивной матрицы для судового машиностроения // Сборник статей XIII Международной конференции «Военно-морской флот и судостроение в современных условиях» (NSN'2024), с.202;

10. Шарко Е. А., Блышко И. В., Дворянцев Д. Д., Соболев М. Ю., Саргсян А. С., Лишевич И. В., Анисимов А.В. Исследование физико-механических и триботехнических характеристик гибридных антифрикционных полимерных композиционных материалов // Сборник статей Международной научно-практической конференции «BALT TRIBO 2024» в СПбПУ, с.25-31;

11. Шарко Е. А., Блышко И. В., Дворянцев Д. Д., Соболев М. Ю., Саргсян А. С., Лишевич И. В., Анисимов А. В. Гибридные антифрикционные полимерные композиционные материалы для высоконагруженных узлов трения, смазываемых водой // Сборник тезисов 21-конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» («КМУС»-2024) в НИЦ «Курчатовский институт»- ЦНИИ КМ «Прометей», с.69;

12. Дворянцев Д. Д., Лишевич И. В., Саргсян А. С., Морозов Д. Л., Шарко Е. А. Исследование физико-механических и триботехнических свойств антифрикционного углепластика УГЭТ-4 для узлов трения гидротурбин // Сборник тезисов 21-конференции молодых ученых и специалистов «Новые материалы и технологии» («КМУС»-2024) в НИЦ «Курчатовский институт»- ЦНИИ КМ «Прометей», с.16;

13. Анисимов А.В., Лишевич И. В., Саргсян А. С., Блышко И. В., Соболев М. Ю., Дворянцев Д. Д., Шарко Е. А. Гибридный антифрикционный полимерный композиционный материал для тяжелонагруженных узлов трения// Сборник тезисов 11 Всероссийского Молодежного научного форума с международным участием «Open Science 2024» в НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, с. 116;

14. Анисимов А.В., Лишевич И. В., Саргсян А. С., Блышко И. В., Соболев М. Ю., Дворянцев Д. Д., Шарко Е. А. Исследование физико-механических и триботехнических характеристик нового гибридного антифрикционного полимерного композиционного материала // Сборник трудов отраслевой научно-технической конференции «Новые технологии в судостроении» («НТС-2024») в АО «Центр технологии судостроения и судоремонта», с.36-44;

15. Анисимов А.В., Лишевич И. В., Саргсян А. С., Блышко И. В., Соболев М. Ю., Дворянцев Д. Д., Шарко Е. А. Исследование триботехнических и физико-механических характеристик модифицированных гибридных антифрикционных полимерных композиционных материалов // Сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «BALT TRIBO 2025» в СПбПУ, с. 374-380;

16. Анисимов А.В., Лишевич И. В., Саргсян А. С., Дворянцев Д. Д., Шарко Е. А. Высокопрочный антифрикционный полимерный композиционный материал на основе модифицированной термореактивной матрицы для узлов трения гидротурбин // Сборник статей II Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «BALT TRIBO 2025» в СПбПУ, с. 75-83;

17. Саргсян А. С., Дворянцев Д. Д., Шарко Е.А. Разработка гибридного антифрикционного полимерного композиционного материала марки ПЭСТ-4 // Сборник материалов 16 Всероссийской научной и студенческой конференции с международным участием и конкурса студенческих докладов «Наноструктурные, волокнистые и композиционные материалы» имени профессора А.А. Лысенко, СПбГУПТД, с.119-121;

18. Лишевич И.В., Дворянцев Д. Д., Шарко Е.А. Влияние режима полимеризации и термообработки при горячем прессовании на термические, физико-механические и триботехнические свойства антифрикционного полимерного композиционного материала на основе модифицированной матрицы марки ЭТ-4 и углеродной ткани // Сборник материалов 16 Всероссийской научной и студенческой конференции с международным участием и конкурса студенческих докладов «Наноструктурные, волокнистые и композиционные материалы» имени профессора А.А. Лысенко, СПбГУПТД, с.54-55;

19. Патент РФ №2823387 на изобретение «Высокопрочный антифрикционный электроизоляционный ПКМ на основе гибридных тканей» // А. В. Анисимов, А. С. Саргсян, И. В. Лишевич, И. В. Блышко, Шарко Е.А., Д.Д. Дворянцев,; Бюллетень № 21 опубликовано 05.10.2023 г.