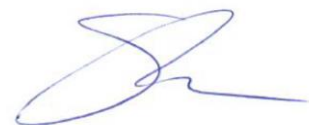


**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ «ПРОМЕТЕЙ» ИМЕНИ
И.В. ГОРЫНИНА НАЦИОНАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**

На правах рукописи

УДК 678.067:621.822.5
ГРНТИ 61.61.29



ШАРКО ЕВГЕНИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

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

Специальность 2.6.17. Материаловедение

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

Кандидат технических наук

Саргсян Артем Самвелович

г. Санкт-Петербург

2026 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПКМ.....	14
1.1 Обзор существующих антифрикционных материалов, их преимущества и недостатки.....	14
1.2 Обзор армирующих волокон.....	19
1.2.1 Волокна из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ).....	19
1.2.2 Фторопластовые волокна	23
1.2.3 Волокна из ароматических полиамидов	25
1.2.4 Углеродные волокна	29
1.2.5 Стекланные волокна	33
1.2.6 Базальтовые волокна.....	35
1.2.7 Обзор диэлектрических материалов для армирования ПКМ.....	36
1.3 Способы активации поверхности волокон и тканей	38
1.4 Полимерные матрицы антифрикционных ПКМ.....	39
1.4.1 Способы модификации полимерных матриц	43
1.5 Обзор видов армирующих тканей и способов их плетения	44
1.6 Обзор технологий получения ПКМ и способов их переработки в изделия....	49
Постановка задачи исследования	52
ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ	54
2.1 Армирующие материалы.....	54
2.2 Гибридные армирующие ткани	57
2.3 Полимерные матрицы.....	61
2.4 Методика исследования структуры ПКМ	63

2.5 Методика исследования триботехнических характеристик гибридных ПКМ	67
2.6 Методика исследования прочностных свойств ПКМ	78
2.7 Методики исследования физических свойств ПКМ.....	79
Измерение удельного объемного и поверхностного сопротивления на постоянном токе при комнатной температуре	79
Исследование водостойкости образцов ПКМ	82
2.8. Исследования жизнеспособности препрега гибридного антифрикционного ПКМ.....	84
Выводы по главе 2.....	86
ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА АРМИРУЮЩЕЙ ТКАНИ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГИБРИДНЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПКМ	89
3.1 Исследование триботехнических характеристик опытных образцов гибридных антифрикционных ПКМ	91
3.2 Исследование поверхности трения гибридного антифрикционного ПКМ.....	96
3.3 Исследование зависимости прочностных свойств гибридных антифрикционных ПКМ от состава армирующей ткани	105
3.4 Исследование электроизоляционных свойств	110
3.5 Исследование влияния водопоглощения на размерную стабильность образцов ПКМ.....	111
3.6 Исследование влияния гибридного антифрикционного ПКМ на коррозию металлического контртела.....	114
3.7 Основные принципы выбора состава армирующей ткани гибридных антифрикционных ПКМ	116
Выводы по главе 3.....	119

Глава 4 ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПКМ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОЙ АРМИРУЮЩЕЙ ТКАНИ	122
4.1 Уточнение состава армирующей ткани в гибридном антифрикционном ПКМ марки ПЭСТ	123
4.2 Изготовление гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ на основе модифицированной эпоксидной матрицы ЭТ-4	126
4.3 Изготовление гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ на основе СВМПЭ волокон, прошедших процесс активации поверхности	128
4.4 Исследование влияния модификации полимерного связующего и обработки поверхности волокон СВМПЭ на прочностные и триботехнические характеристики гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ	130
Выводы по главе 4	133
ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПКМ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ ТКАНЕЙ	135
5.1 Оптимизация технологии пропитки	136
5.2 Оптимизация технологических параметров прессования	140
5.3 Особенности механической обработки гибридного антифрикционного ПКМ на основе стеклянных и СВМПЭ волокон	142
ГЛАВА 6 СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ВНЕДРЕНИЕ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ИЗ ГИБРИДНОГО АНТИФРИКЦИОННОГО ПКМ МАРКИ ПЭСТ-4	148
6.1 Изготовление опытных образцов подшипников скольжения	150
6.2 Результаты стендовых испытаний опорных малогабаритных подшипников скольжения из гибридного антифрикционного ПКМ	150
6.3 Внедрение разработанного гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4	152

Выводы по главе 6.....	157
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	159
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	162
Приложение А	171

ВВЕДЕНИЕ

Эффективность узлов трения определяется их ресурсными характеристиками, экономичностью, технологичностью и функциональными возможностями. Основной тенденцией совершенствования узлов трения, в первую очередь, является снижение коэффициента трения, увеличения контактных давлений, а также увеличения требуемого срока эксплуатации.

Долгое время в качестве материала для подшипников скольжения судовых механизмов, насосов и гидротурбин использовалась бронза. Бронзовые подшипники способны работать только с масляной смазкой [1,2,4].

В связи с развитием техносферы заметно увеличилось влияние смазочных материалов и специальных жидкостей на экосистему в период работы машин и механизмов. Смазки и присадки представляют собой существенную экологическую опасность. Данный факт подчеркивает необходимость отказа в узлах трения кораблей и гидростанций от систем масляной смазки с переходом на смазку водой. Антифрикционные полимерные композиционные материалы (ПКМ), которые заменили металлические материалы в узлах трения, способны работать со смазкой водяной и при высоких контактных давлениях [5].

Имеющиеся в настоящее время антифрикционные ПКМ обладают высокими физико-механическими свойствами и триботехническими характеристиками. Однако, кроме положительных свойств антифрикционные ПКМ имеют ряд особенностей и ограничений по применению. Так, например, графитсодержащие материалы, армированные углеродной тканью или наполненные рубленым углеродным волокном и углеродным порошком, способствуют появлению коррозии в узлах трения, которые большую часть времени не находятся в эксплуатации.

Из-за большой разницы потенциалов в морской воде происходит процесс коррозии стальных контртел в момент длительной остановки, который усугубляется наличием контакта углепластика (с потенциалом +0,43В) и нержавеющей стали (с потенциалом + 0,03В (в пассивном состоянии) и -0,32В (в активном состоянии)). Процесс трения способствует повреждению пассивной

пленки на поверхности металла, обуславливая его переход в активное состояние [2,5].

Предполагаемым подходом к решению вопроса замедления коррозии при длительной остановке узла трения является снижение разницы потенциалов между валом и подшипником за счет замены углеродного армирующего наполнителя в составе антифрикционного ПКМ на альтернативный (диэлектрический), который будет обеспечивать низкий коэффициент трения материала без потери прочности и наделять его электроизоляционными свойствами. Однако диэлектрические наполнители (органические и неорганические наполнители) по отдельности не обладают необходимыми свойствами.

Объединение разных типов волокон в структуре гибридной армирующей ткани позволит компенсировать недостатки материалов, которые состоят из одного типа армирующих волокон. Органические волокна, обладающие низким коэффициентом трения, высокой стойкостью к изнашиванию, высокой химической стойкостью, но низкой адгезией к полимерным матрицам, обеспечат функциональные свойства материала, а неорганические волокна, обладающие высокой прочностью и адгезией к связующим, компенсируют низкую конструкционную прочность материала. Электроизоляционные свойства гибридного антифрикционного ПКМ исключат развитие коррозии металлических контртел при длительной остановке узла трения, находящегося в морской воде [6].

Актуальность работы обусловлена востребованностью высокопрочного антифрикционного ПКМ для узлов трения, работающих в воде и при высоких нагрузках, способного повысить надежность и ресурс металлических контртел и корпусов.

Целью настоящей **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.

Для достижения поставленной цели решались 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.

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.

Объектом исследования являются новые гибридные антифрикционные ПКМ, работоспособные при высоких контактных давлениях и со смазкой водой.

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 сверхмолекулярного 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 ($f_c \leq 0,09$) 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 результатов работы:

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 перекладки 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).

Апробация 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 опубликовано 19 научных работ, из них 4 в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ, получен патент РФ.

Основные 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.

ГЛАВА 1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПКМ

Первая глава посвящена литературному обзору, в котором на основании опубликованных данных проведен анализ антифрикционных ПКМ с указанием главных преимуществ и недостатков, в том числе описана причина возникновения коррозии металлических контртел и корпусов.

Проведен анализ российского рынка органических и неорганических армирующих волокон и компонентов терморезактивной матрицы для разработки гибридных антифрикционных ПКМ.

Также в первой главе сформулирована проблема, на решение которой направлено исследование: исключение углеродных наполнителей из состава гибридного антифрикционного ПКМ без потери показателей триботехнических характеристик и физико-механических свойств.

1.1 Обзор существующих антифрикционных материалов, их преимущества и недостатки

На работающие в морской воде тяжелонагруженные узлы трения (рулевые машины и устройства) приходится около 90% дефицитных олово- и медьсодержащих сплавов (Бр.ОФ10-1, Бр.ОЦ10-1 и Ба.А.Мц9-2), применяемых в этих изделиях.

Бронзовые сплавы, которые используют для изготовления подшипников скольжения, обладают низким коэффициентом трения, высокой стойкостью к изнашиванию, стойкостью к коррозии в агрессивных средах [4,7].

Однако, специфические условия эксплуатации узлов трения, работающих в воде, требуют постоянной подачи смазки к трущимся поверхностям, что вызывает необходимость в применении специальной системы смазки, включающей в себя устройства, подающие в определенные места смазку, которая

обладает высокой вязкостью и адгезионной способностью. Подвод смазки осуществляется с помощью устройств для смазки через специальные распределители, а также трубопроводы, что значительно усложняет и утяжеляет как конструкцию машин, так и монтажные работы. Также смазка, применяемая в подшипниках скольжения из бронзовых сплавов, неизбежно попадает в акваторию, что приводит к ее загрязнению.

В 1980-х годах в НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» Бахарева В.Е. и другими учеными был разработан материал, не требующий масляной смазки для применения в подшипниках скольжения, работающих в воде [1]. Разработанный антифрикционный ПКМ марки УГЭТ представляет собой углепластик на основе реактопластичной полимерной матрицы и низкомолекулярной углеродной армирующей ткани (УГЭТ). Антифрикционный ПКМ марки УГЭТ обладает необходимым комплексом триботехнических характеристик, высокой прочностью, низкой плотностью, высокой стойкостью к агрессивным средам и низким водопоглощением. УГЭТ способен работать с водяной смазкой, что исключает необходимость подводить масляную смазку к узлу трения. Продукты износа антифрикционного ПКМ марки УГЭТ в основном состоят из измельченных углеродных волокон, напоминающих по своей структуре графит, что вовремя трибоконтакта значительно снижает коэффициент трения [1,2,7,9].

Антифрикционный ПКМ марки УГЭТ предназначен для работы в узлах трения с высокими нагрузками, например, в узлах трения рулевых машин.

Величину нагрузок в элементах рулевых машин, в том числе в узлах трения, рассчитывают, исходя из скорости движения и угла перекладки. Зачастую нагрузка в таких узлах трения краткосрочно может превышать 60 МПа.

За многолетний опыт эксплуатации подшипников скольжения из антифрикционного ПКМ марки УГЭТ сформировалась преимущественно положительная статистика применения данного материала за исключением редких случаев.

Однако недостатком антифрикционного ПКМ марки УГЭТ из-за высокого содержания углеродных волокон является то, что он обладает положительным

электродным потенциалом ($\approx +0,46\text{В}$), что в некоторых узлах трения вследствие длительного простоя в морской воде приводит к ускорению коррозии металлических контртел и корпусов подшипников, которые обладают отрицательным электродным потенциалом. Процесс образования продуктов коррозии в ряде случаев приводит к заклиниванию механизмов и деградации качественных характеристик трущихся поверхностей узлов трения, что в конечном итоге приводит к сокращению эксплуатационного ресурса узлов трения. На рисунке 1.1 показан внешний вид пар трения: а) ролик из стали марки 08Х18Н10Т и подшипник скольжения из антифрикционного ПКМ марки УГЭТ; б) ролик из стали марки 20Х13 и подшипник скольжения из антифрикционного ПКМ марки УГЭТ после продолжительной выдержки в морской воде.



Рисунок 1.1 – Фотография гальванической пары из стальных роликов и подшипников скольжения из антифрикционного ПКМ марки УГЭТ после длительной выдержки в морской воде: а) ролик из 08Х18Н10Т, б) ролик из 20Х13.

Решением указанной проблемы является удаление электроположительных углеродных наполнителей из зоны трения. Для исключения негативного влияния проводящих углеродных наполнителей на процесс коррозии необходимо применение антифрикционных ПКМ с армирующими наполнителями, обладающими диэлектрическими свойствами.

В научной литературе и патентах описаны антифрикционные ПКМ, в которых решён вопрос коррозии металлических контртел, однако, данные ПКМ имеют определенные недостатки:

- Антифрикционный материал, используемый для изготовления крупногабаритных деталей скольжения, работающих с водной смазкой: Thordon XL и SXL фирмы Thordon Bearings Inc., Канада. Thordon XL и SXL это полиуретановый эластомер, работоспособный в морской воде в паре с контртелами, изготовленными из нержавеющей стали, без риска возникновения коррозии металла. К недостаткам данных материалов относится их недостаточная механическая прочность, высокая скорость изнашивания и изменение линейных размеров при эксплуатации в воде. Совокупность недостатков материалов марки Thordon XL и SXL значительно ограничивает область его применения. [2,9]

- Антифрикционный материал на основе полиуретановой композиции, используемый для изготовления износостойких антифрикционных изделий (RU 2287539C1). Недостатками данного полиуретанового эластомера являются недостаточная механическая прочность, сравнительно низкие триботехнические характеристики (коэффициент трения $f_s = 0,22-0,24$, высокая скорость изнашивания) и значительное изменение линейных размеров при экспозиции в воде, что ограничивает области его применения.

- Антифрикционная композиция, содержащая СВМПЭ, ультрадисперсный β -сиалон и дисульфид молибдена (Патент RU № 2126805). Несмотря на высокую стойкость к изнашиванию, материал обладает недостаточной прочностью, деформационной стойкостью и несущей способностью для применения в тяжело нагруженных узлах трения.

- Антифрикционная полимерная композиция на СВМПЭ и неорганического модификатора, в качестве которого выступает терморасширенный графит (ТРГ) (Патент RU № 2535216). Композиция обладает малой интенсивностью износа, однако, наличие графита способствует снижению объемного электрического сопротивления, что в ряде случаев приводит к коррозии узлов скольжения.

Наиболее близким по совокупности существенных признаков к разрабатываемому материалу является антифрикционный ПКМ, включающий углеродную ткань и полимерное термореактивное связующее (RU № 2153107, МПК C08L63/00, 2000). Данный антифрикционный ПКМ обладает высокой прочностью, износостойкостью при трении в воде и успешно применяется в судостроении. Недостатком указанного антифрикционного материала являются его электропроводящие свойства (удельное объемное электрическое сопротивление $(1,5 \pm 1,0) \cdot 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Углеродная ткань в композите обладает положительным потенциалом и выступает в роли катода, что в некоторых случаях его применения в морской воде приводит к коррозии металлических контртел и корпусов и, как следствие, к снижению работоспособности узла трения.

В таблице 1.1 приведены сравнительные характеристики антифрикционных ПКМ, описанных выше.

Таблица 1.1 – Характеристики антифрикционных ПКМ [1,2,2,9]

Наименование показателей	Антифрикционные ПКМ					
	УГЭТ	УГЭТ-4	ФУТ	Тордон XL	АСМ Marine	Orkot TXM
	Углеродное волокно			Диэлектрические наполнители		
Плотность, кг/м ³	1430	1340	1400	1200	1380	1550
Предел прочности при сжатии, МПа	250	250	130	35	80	95
Предел прочности при изгибе, МПа	250	350	220	-	100	90
Предел прочности при межслойном сдвиге, МПа	35	35	20	-	10	-
Водопоглощение за 24 ч, %	0,07	0,07	0,06	1,3	0,55	0,05
Коэффициент трения при смазке водой	0,12	0,09	0,06	0,08	0,08	0,09
Интенсивность изнашивания при смазке водой и контактном давлении 30 МПа, мкм/км	12	5	-	-	20	-
Допустимое контактное давление, МПа	60	60	5	15	30	7,5
Электроизоляционные свойства	нет	нет	нет	да	да	да

Учитывая все вышеупомянутое, цель представленного исследования заключается в создании гибридного антифрикционного ПКМ, позволяющего исключить коррозию металлических контртел и повысить ресурс узлов трения, которые работают при высоких контактных давлениях.

1.2 Обзор армирующих волокон

Армирующие волокна и нити, которые применяются для получения антифрикционных ПКМ, должны обладать высокими прочностными, адгезионными свойствами и триботехническими характеристиками. Армирующие волокна, которые используются в производстве ПКМ, делятся на три большие группы – это природные, органические и неорганические. К первой группе волокон относятся целлюлозные и хлопковые, к органическим волокнам – полиамидные, полиэфирные, фторопластовые и полиэтиленовые, а к неорганическим волокнам – углеродные, стеклянные, керамические, базальтовые и асбестовые волокна [9,10,11].

С учетом постоянного роста применения ПКМ в различных отраслях машиностроения и судостроения, а также с учетом разработки новых технических процессов производства армирующих материалов увеличивается и база новых, высокоэффективных исходных материалов для изготовления ПКМ различных назначений.

Большую часть рынка в качестве армирующих материалов для изготовления ПКМ заняли неорганические материалы, которые используют для создания высокопрочных композиций с различными видами полимерных матриц. Последние 20 лет заметна тенденция более частого использования различных видов органических материалов. На рынке органических волокон представлен большой перечень материалов, обладающих уникальным набором свойств, таким как низкий коэффициент трения, высокая прочность на разрыв, низкая электропроводность и высокая стойкость к агрессивным средам [10,11,12].

1.2.1 Волокна из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ)

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) – это полимер линейной структуры, молекулярная масса которого находится в диапазоне от 1,5

до 10 млн. Молекулы СВМПЭ состоят из последовательно повторяющихся звеньев $(-\text{CH}_2 - \text{CH}_2-)_n$ (рис 1.2)[10,11,12].

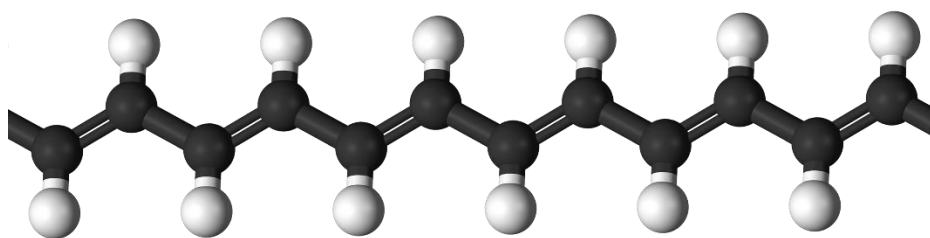


Рисунок 1.2 – Структура молекулы полиэтилена [11]

СВМПЭ обладает высокой механической прочностью и ударопрочностью, низким коэффициентом трения и высокой стойкостью к изнашиванию. Благодаря большой молекулярной массе СВМПЭ также обладает высокой вязкостью [12,13,16,19]. Свойства СВМПЭ приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Свойства сверхвысокомолекулярного полиэтилена [11]

Наименование	Показатель
Плотность, г/см ³	0,92 – 0,94
Прочность при разрыве, не менее, МПа	48
Относительное удлинение при разрыве, не менее, %	350
Модуль упругости при растяжении, не менее, ГПа:	
- при 23 °С	0,69
- при -269 °С	2,97
Коэффициент трения по стали:	
- при сухом трении	0,1 – 0,2
- в водной среде	0,05 – 0,1
- в среде масел	0,01 – 0,08
Температура перехода в пластическое состояние, °С	138 – 142
Твердость по Шор А	62 – 66
Коэффициент линейного расширения, 10 ⁻⁴ /К:	
- от -200 до -100°С	0,5
- от 20 до 100 °С	2
Диэлектрическая прочность, кВ/см	900
Предельная рабочая температура, °С	100

Переработка СВМПЭ происходит методами спекания, прессования, рэм-экструзии, напыления и гель-формования. Метод гель-формование позволяет добиться качественной аморфно – кристаллической структуры вследствие того,

что СВМПЭ переходит из струи прядильного раствора в твердое волокно за счет ориентационного сверхвытягивания и кристаллизации. Полученная нить СВМПЭ представляет из себя пучок из 1000 – 1200 филаментов диаметром 5 – 12 мкм, и имеет прочные химические связи на молекулярном уровне с энергией от 260 до 400 кДж/моль.[16]

Волокна из СВМПЭ обладают высокой механической прочностью и гибкостью, устойчивостью к истиранию, изгибам, стойкостью в химических и биологических средах, устойчивостью к влаге и ультрафиолетовому излучению, высокими диэлектрическими показателями. Однако, кроме положительных свойств волокна СВМПЭ имеют также и набор отрицательных. Так, например, довольно низкая граница температуры при длительной эксплуатации 120 ± 5 °С, превышая эту температуру аморфно – кристаллическая структура СВМПЭ волокон необратимо меняется, что приводит к потере уникальных свойств волокон. Наиболее важным негативным фактором, влияющим на свойства ПКМ, армированных СВМПЭ волокнами, является слабое адгезионное взаимодействие поверхности волокна и полимерной матрицы, связанное с низкой поверхностной энергией СВМПЭ волокон и отсутствием ненасыщенных химических связей. На рисунке 1.3 представлена морфологическая структура волокна СВМПЭ [12,17,18,19].

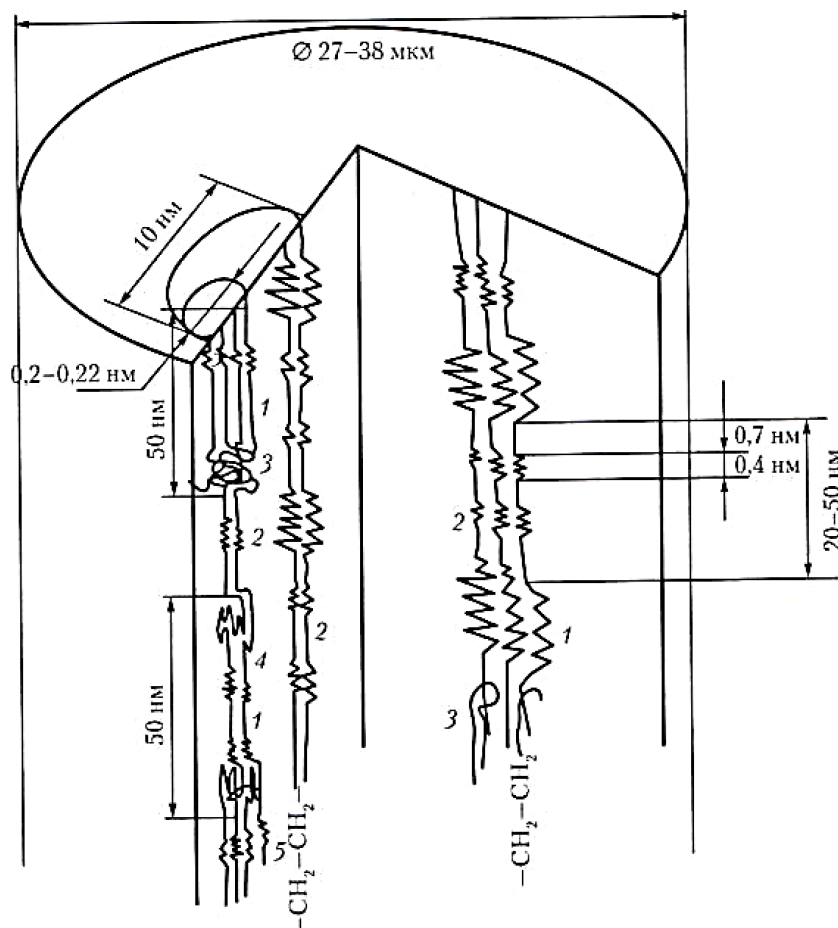


Рисунок 1.3 – Морфологическая структура СВМПЭ гель-волокна марки Spectra :

1. Кристаллиты СВМПЭ-фибриллы «шиш-кебабной» структуры (L50 нм, Ø10 нм);
2. Последовательность (Ø0,20-0,22 нм) вытянутоцепных орторомбических кристаллических блоков (0,7 нм) и неупорядоченных дефектных областей (0,4 нм); 3. Дефекты, концы молекулярных цепей, перехлесты; 4. Внутрифбриллярные проходные цепи (97%);
5. Межфбриллярные проходные цепи [19].

В 1993 г. в России впервые методом гель-технологии были получены высокопрочные, высокомодульные полиэтиленовые волокна марки «Эспелен», а в 2006 г. в АО «ВНИИСВ» (г. Тверь) был введен в эксплуатацию первый модуль опытно-промышленного производства волокон марок П-1 и П-2 из СВМПЭ отечественного производства (г. Томск) с производительностью 18 тонн/год. Сравнительные характеристики, в том числе и зарубежных волокон из СВМПЭ, приведены в таблице 1.3 [9,16,19,20].

Таблица 1.3 – Характеристики волокон из СВМПЭ [9].

Марка	Плотность, г/см ³	Прочность, ГПа	Модуль Юнга, ГПа	Разрывное удлинение, %
Волокно СВМПЭ П-1 (РФ)	0,97	2,7	85-93	3-5
Волокно СВМПЭ П-2 (РФ)	0,97	3,9	140-145	4-6
СВМПЭ волокно Dyneema® SK-75	0,97	3,1	107 110	3,8
СВМПЭ волокно Spectra® 1000	0,97	3,2	120	3-6

Основным сдерживающим фактором в использовании СВМПЭ для производства подшипников скольжения методом горячего прессования является его температура плавления.

1.2.2 Фторопластовые волокна

Фторопласты – это обширная группа пластиков на основе фторсодержащих полимеров, которые получают с помощью около десяти фтормономеров. Наиболее удачным комплексом свойств обладает политетрафторэтилен (ПТФЭ, фторопласт-4, 4Д тефлон) [23,2]. Уникальные свойства ПТФЭ, такие как высокая температура деструкции, малое водопоглощение, высокие и стабильные диэлектрические свойства, химическая стойкость и низкий коэффициент трения определяются структурой и строением высокомолекулярного и высококристаллического полимера.

Благодаря большому ван-дер-ваальсову радиусу фтора и закручиванию углеродной цепи, молекула ПТФЭ образует цилиндр, на внешней части которого располагаются атомы фтора (рис. 1.4). Именно жёсткая стержнеобразная структура молекулы и обеспечивает низкий коэффициент трения, хладотекучесть и высокую пластичность при низких температурах. Одним из отрицательных свойств ПТФЭ является низкая смачиваемость и, как следствие, низкая адгезия к полимерным матрицам из-за низкой поверхностной энергии [9].

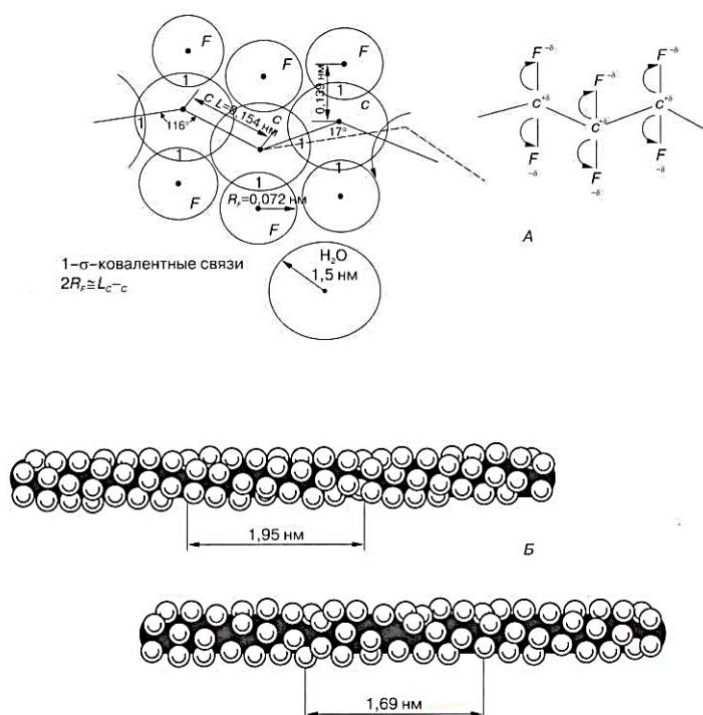


Рисунок 1.4 – Структурные параметры (А) и модель цепи (Б, приведены размеры элементарной ячейки) ПТФЭ [22]

Так как ПТФЭ - кристаллизующийся неплавкий и нерастворимый полимер, то он не может быть переработан в волокно обычными методами формирования химических волокон (из раствора или расплава). Технологический процесс состоит в формировании волокна из вспомогательного полимера (загустителя), наполненного частицами ПТФЭ, с последующей термической обработкой полученного волокна, в процессе которой вспомогательный полимер удаляется, а частицы ПТФЭ спекаются, превращаясь в волокно. После спекания фторволокно подвергается ориентационному упрочнению вытягиванием при повышенной температуре. [24, 25, 26].

Волокно формируют по мокрому способу на прядильных машинах. Прядильная композиция состоит из водной дисперсии ПТФЭ, загустителя и стабилизатора коллоидной системы. В качестве полимера-загустителя с волокнообразующими свойствами используют поливиниловый спирт или вискозу. В первом случае стабилизатором служат поверхностно-активные вещества типа ОП-7, во втором - глицерин.

Производство фторволокон исключительно сложное и трудоемкое. Впервые такие волокна были выпущены в США в 1953 г. под названием тефлон, а в Японии они имеют марку тойфлон [9,23].

1.2.3 Волокна из ароматических полиамидов

Арамидные волокна получают на основе ароматических полимеров алифатической линейной структуры, а также алифатического ряда. Высокие физико-механические свойства данных волокон достигаются за счет высокоориентированной структуры полимера.

Ароматические полиамиды (АПА) кроме повышенной прочности обладают также высокими значениями температур стеклования (свыше 200°C) и температур плавления (больше 300°C), высокими диэлектрическими характеристиками и низким коэффициентом трения [9,30]. Также АПА относятся к волокнообразующим термопластам со специфической структурой полимерных цепей. АПА параструктуры образуются в растворах лиотропной жидкокристаллической структуры. Для получения твердых полимерных волокон удаляется растворитель из раствора полимера либо выпариванием, либо экстрагированием. Так, например, волокна «Кевлар», Терлон, СВМ ekstrудированы из жидкокристаллических волокнообразующих растворов полимера в концентрированной H_2SO_4 , а волокна «Русар» - из сополимерного АПА ekstrудированы из жидкокристаллических волокнообразующих растворов в амидных растворителях. На рисунке 1.5 представлена химическая модель структуры арамидного волокна. [11]

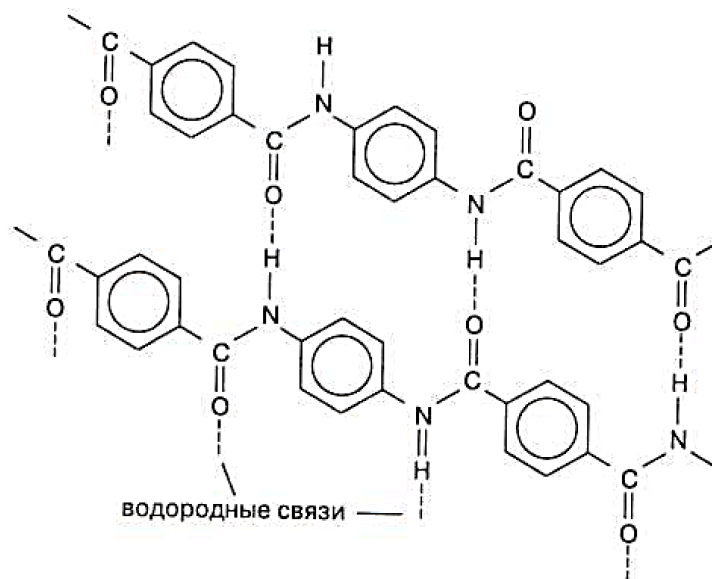


Рисунок 1.5 – Химическая структура арамидного волокна [11]

Волокна, используемые в настоящей работе, являются ароматическими полиамидами с гетероциклами в цепи на основе гетероциклического диамин и терефталилхлорида и имеют марку СВМ (синтетические высокомодульные волокна).

У АПА волокон есть значительный недостаток, ограничивающий использование данных нитей при производстве антифрикционных ПКМ, работающих с жидкостной смазкой – это высокое равновесное водопоглощение [31]. Дело в том, что микрокомпозитная модель филамента АПА включает фибриллы, их несущие структурные единицы и межфибрилярную анизотропную среду. В дефектах и аморфных областях волокна, за счет адсорбции третичным азотом волокнообразующего полиамида, происходит удержание воды. На рисунке 1.6 представлена схематическая модель структуры арамидного волокна марки «Кевлар». Свойства арамидных волокон приведены в таблице 1.4 [9, 30].

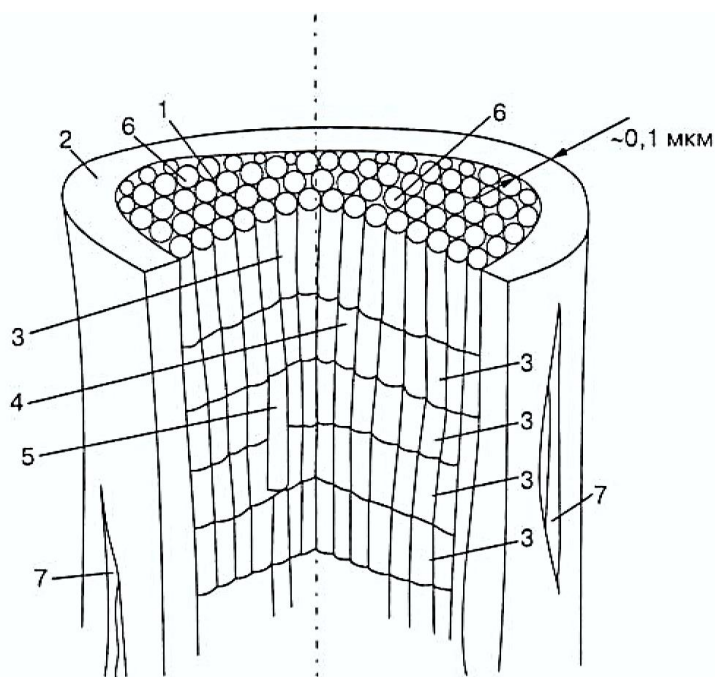


Рисунок 1.6 – Схематическая модель структуры волокна марки «Кевлар»

(электронномикроскопическое исследование в темном поле, травление аргоновой плазмой): 1.

Ядро, образованное параллельными слоями 3, перпендикулярными продольной оси волокна;

2. Оболочка (толщина 0,1-0,2 d_B). $d_B = 9-11$ мкм (11,9 мкм для 135 текс), модуль упругости выше, чем у ядра, слабо связана с нижележащими слоями. Поверхность состоит из множества глобулярных частиц и желобков, преимущественно ориентированных в продольном направлении (малодефектная поверхность с аксиальной ориентацией микроструктур); 3.

Параллельные слои из плотноупакованных палочкообразных кристаллов. Фибриллярные структуры - стержни размером до 0,5 мкм, состоящие из плотноупакованных слоев толщиной $< 0,05$ мкм; 4. Палочкообразные кристаллиты, образующие слой (средний диаметр = 50 нм,

длина - функция молекулярной массы полимера). Размер кристаллитов 45. Угол разориентации $6,5^\circ$ (Кевлар), 11° (Армос), $12-17^\circ$ (СВМ, Терлон); 5. Кристаллиты, проходящие через несколько слоев (увеличение продольной прочности волокна), организованы в более сложные ориентированные структуры, размеры > 700 Å; 6. Поры (длина 15-200 Å, диаметр 0,05-0,1 мкм, адсорбция 4-6 %масс. H_2O). В межфибриллярных областях, сливаясь, образуют микрополости и трещины; 7. Трещины длиной 100-5000 Å, шириной ≈ 20 Å. [9]

Таблица 1.4 – Свойства арамидных волокон [9]

Волокна (нити)	Плотность, г/см ³	Модуль деформации, ГПа		Прочность, ГПа	Удлинение при разрыве, %	Влажность (при норм. усл.), %
		Динамический	Статический			
ВМ: терлон, тварон (НМ), кевлар (НМ)	1,45 – 1,47	140 – 150	95 – 120	2,7 – 4,5	2,7 – 3,2	2 – 3
ВП: терлон, тварон (НТ), кевлар (НТ)	1,45 – 1,47	130 – 140	70 – 80	2,7 – 4,5	3,0 – 3,5	2,5 – 3,5
ВМ: СВМ	1,45 – 1,46	130 – 160	95 – 115	4,0 – 4,5	3,0 – 3,5	2,5 – 4,5
ВМ: русар, армос	1,45 – 1,46	140 – 160	100 – 120	4,5 – 5,5	3,5 – 4,0	3,0 – 3,5
ВП: технора	1,39 – 1,40	–	70 – 80	3,0 – 3,5	4,0 – 5,0	–

* ВМ – высокомодульные; ВП – высокопрочные; НТ – сверхпрочные;
НМ – сверхвысокомодульные.

Еще одним видом ароматических волокон являются волокна полиарилен-1,3,4-оксадиазола (оксалона), известные под маркой «Арселон».

Основными достоинствами волокна «Арселон» являются прочность, высокая стойкость к воздействию повышенных температур и химических реагентов, электроизоляционные свойства. Благодаря высокой температуре стеклования, волокно «Арселон» имеет высокую рабочую температуру в атмосферном воздухе 200 – 250 °С, а также сохраняет прочность и эластичность на воздухе при высоких и низких температурах. Свойства волокна «Арселон» приведены в таблице 1.5. [9].

Таблица 1.5 – Свойства синтетического термостойкого волокна «Арселон» [9]

Показатель	«Арселон»
Линейная плотность, текс	0,1 - 0,4
Удельная разрывная нагрузка, мН/текс	250
Удлинение при разрыве, %	20
Массовая доля замасливателя, %	0,5-3,0
Число витков на 1 см	3,0
Кислородный индекс, %	27
Длина резки, мм	33-90
Температура эксплуатации, °С	200-250

1.2.4 Углеродные волокна

Углеродные волокна характеризуются высокой прочностью и модулем упругости, стойкостью к пониженным и повышенным температурам, химстойкостью к кислотам и щелочам, а также водостойкостью [30,31,32]. Для создания ПКМ с определенными свойствами используют разные виды углеродных волокон. Для создания конструкционных ПКМ преимущественно используют высокомодульные, высокопрочные волокна, а для антифрикционных ПКМ используют низкоимодульные углеродные волокна. Классификация углеродных волокон по физико-механическим показателям представлена в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Классификация углеродных волокон [9]

Углеродные волокна	Плотность, кг/м ³	Предел прочности, МПа	Модуль упругости, ГПа
Низкомодульные средней прочности	1500	300-500	30-50
Высокомодульные	1900	1800-2000	400-600
Высокопрочные	1700	2500-3200	200-300

Углеродные волокна получают путем термообработки природных или синтетических волокон. Исходным сырьем служит вискозное кордное волокно и полиакрилонитрильные волокна. Изготовление углеродных волокон происходит

в три этапа: подготовка волокна, низкотемпературная обработка при температуре меньше 1500°C и высокотемпературная обработка волокна при температуре от 1500°C до 3000°C .

Во время подготовки волокон происходит удаление замасливателя и обработка антипиренами, солями переходных металлов и кислотами для ускорения химических превращений.

При низкотемпературной обработке волокна осуществляется карбонизация полимера. В зависимости от вида исходного сырья, этот процесс может занимать от 4 до 200 часов. Фибриллярная структура углеродного волокна показана на рисунке 1.7.

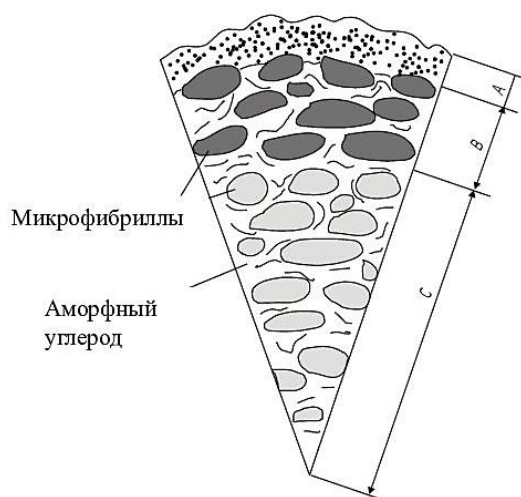


Рисунок 1.7 – Фибриллярная структура углеродного волокна:

А – поверхностный слой, В – высокоориентированная зона,

С – низкоориентированная зона [26]

Высокотемпературная обработка волокна называется графитация. Она проводится в течение короткого времени (несколько минут). Для низко модульных волокон характерен процесс карбонизации в последних этапах обработки, также волокно проходит процесс вытягивания для повышения прочности и модуля упругости. В ходе карбонизации из исходных волокон удаляются все примеси и на их месте образуются поры, которые не уменьшают прочностные свойства волокна, а наоборот обеспечивают высокую прочность ПКМ. Так как связующее имеет относительно низкую адгезию к армирующим углеродным волокнам,

именно за счет проникновения связующего в поры волокна и обеспечивается большая прочность ПКМ. Межслойный сдвиг ПКМ на основе карбонизированных, низкомодульных волокон намного выше ПКМ на основе высокомодульных в связи с их инертностью.

В процессе фрикционного взаимодействия антифрикционного ПКМ на основе низкомодульных углеродных волокон и контртела на поверхности ПКМ происходит активное диспергирование углеродных волокон на мельчайшие фрагменты. Таким образом, продукты износа, которые находятся в зоне трения, представляют собой разрушенное углеродное волокно и частицы графита, которые образуют тонкую пленку, равномерно распределяясь по поверхности трения. [1,9,34]

Графит имеет слоисто-решетчатую структуру. В кристаллической решетке графита атомы углерода расположены в параллельных слоях, расположенных на расстоянии 0,34 нм, а в каждом слое атомы углерода размещаются в вершинах правильных шестиугольников с длиной стороны 0,14 нм (рис. 1.8). Так как силы взаимного притяжения между атомами тем меньше, чем больше расстояние между ними, то связи между атомами в слоях значительно прочнее, чем между слоями. Соответственно при большом сопротивлении графита сжатию перпендикулярно слоям, сопротивление параллельно слоям мало. Если учесть, что незакрепленные агрегаты пластинчатых кристаллов располагаются на металлической поверхности плоскостями спайности, то образовавшийся граничный слой из цепочек, нормальных к поверхности, обладает прочностью и сопротивлением деформации, характерными для граничных слоев, образованных смазочными маслами. [1,35]

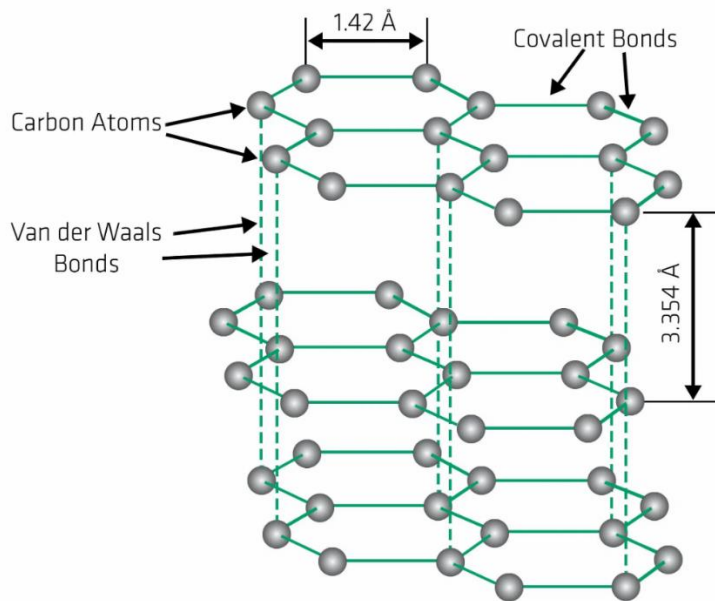


Рисунок 1.8 – Кристаллическая структура графита. Слои плотно упакованных атомов углерода разделены большими расстояниями

Вследствие этого, во всех случаях применения смазки графитом металлический контакт поверхностей трения частично или полностью отсутствует; даже при значительной пластической деформации контактирующих поверхностных слоев, сдвиги протекают под пленкой смазочного материала или внутри него. Благодаря слабому сопротивлению графита по плоскостям, параллельным плоскостям спайности при трении послойное скольжение в нанесенных на поверхностях пленках графита обеспечивает низкий коэффициент трения.

Таким образом, антифрикционные ПКМ, армированные углеродными волокнами, являются самосмазывающимися и обеспечивают низкий коэффициент трения, высокие допустимые нагрузки, малое водопоглощение и стойкость к агрессивным средам.

Однако у углеродных волокон, как и у ПКМ на их основе, есть ряд особенностей, ограничивающих их использование в некоторых конструкциях и узлах трения. Например, высокая проводимость исключает их применение в электроизоляционных целях, а положительный потенциал материала приводит к

ускорению коррозии металлических контртел и корпусов при взаимодействии в электролите.

1.2.5 Стекланные волокна

Не менее половины состава стекланных волокон занимает диоксид кремния (SiO_2), а основные технологические и эксплуатационные свойства стеклу придают добавленные во время варки стекла различные компоненты: оксиды щелочных металлов, оксид кальция (CaO), оксид алюминия (Al_2O_3) и борный ангидрид (B_2O_3) [36,37]. Основные прочностные и технологические свойства стеклнного волокна обеспечивают разные соотношения этих компонентов. При увеличении процентного соотношения оксидов щелочных металлов снижаются упругие свойства и водостойкость стекланных волокон. С добавлением оксидов бериллия меди и титана увеличивается адгезия волокна к полимерной матрице, а также улучшаются упругие свойства. Для повышения твердости и водостойкости увеличивают добавление оксида кальция. При введении оксида алюминия повышаются водостойкость, атмосферостойкость и улучшаются текстильные свойства [9,38].

Изготовление стекланных волокон проходит по одностадийной или двухстадийной технологиям. Во время двухстадийной технологии исходные компоненты смешивают с определенным соотношением и получают заготовки в виде стекланных шариков. После чего шарики помещают в тигель, на дне которого располагаются фильеры диаметром от 5 до 20 мкм. Стекланные шарики расплавляются и через фильеры вытягиваются непрерывные стекланные волокна, которые пучком собираются в нить и обрабатываются замасливателем. [9,36,38].

Одностадийная технология минует стадию шариков, исходные компоненты загружаются непосредственно в тигель с фильерами. Схематическая структура стеклнного волокна (филамента) фильерной вытяжки представлена на рисунке 1.9 [36].

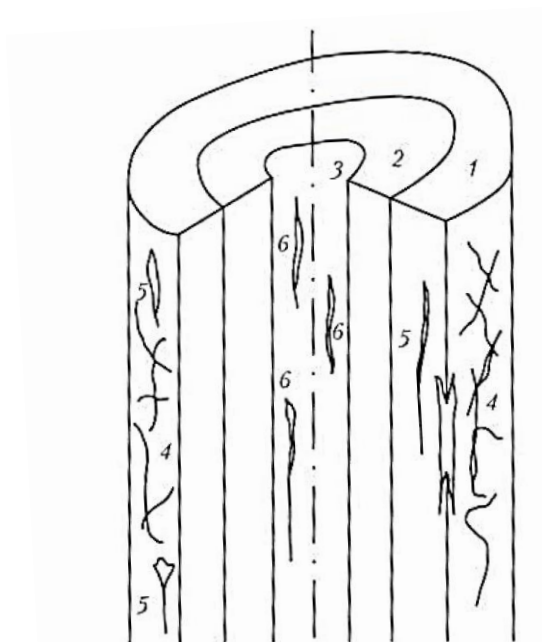


Рисунок 1.9 – Схематическая структура стеклянного алюмоборосиликатного филамента фильерной вытяжки : 1. Поверхностный слой толщиной около 100 нм с дефектами, снижающими прочность; 2. Промежуточный кольцевой бездефектный слой, имеющий высокую степень полимеризации Si-O каркаса, толщина 8000-10000 нм; 3. Центральный цилиндрический слой с газовыми аксиальными дефектами; 4. Сетка поверхностных поперечных субмикротрещин, возникающая из-за разрывов поверхностной пленки при охлаждении. Количество трещин $\approx 10^2 - 10^3$ на см^2 зависит от диаметра волокна и скорости вытяжки. Именно они вносят основной вклад в снижение прочности волокна; 5. Сглаженные дефекты, ямки, царапины; 6. Тонкие каналы с заостренными концами, возникающие при вытяжке пузырьков в расплаве [20].

Стеклянные волокна применяют для создания конструкционных ПКМ, потому что они обладают высокой прочностью, модулем упругости, адгезией к полимерным матрицам, термо- и химстойкостью, водостойкостью, высоким удельным объёмным электрическим сопротивлением от 10^{14} Ом·см [38].

Однако, стеклянные волокна имеют ряд существенных недостатков, которые исключают их использование для изготовления антифрикционных ПКМ. Стеклопластики обладают высоким коэффициентом трения, а их высокая твёрдость приводит к появлению дефектов на поверхности стальных контртел узлов трения. Также стеклопластики сами не обладают стойкостью к истиранию.

Стекланные волокна, которые после механической обработки ПКМ открыто выступают на поверхность, имеют низкую стойкость к атмосферной влаге.

При контакте связующего с поверхностью стекланных волокон в зоне действия адсорбционных сил проходят процессы, изменяющие состав и структуру полимерной матрицы, которые создают напряженность в межфазном объеме композиционного материала. Этот процесс приводит к зарождению трещин и их прорастанию по границе контакта волокон и полимерной матрицы.

Исходя из прочностных свойств, стекланные волокна делят на три группы: высокопрочные ($\sigma_b=3,6-4,6$ ГПа и выше), повышенной прочности ($\sigma_b=2,4-3,4$ ГПа) и нормальной прочности ($\sigma_b=1,4-2,4$ ГПа).

Для получения высокопрочных стекланных волокон используют магнийалюмосиликатные стекла, характеристики и марки высокопрочных стекланных волокон представлены в таблице 1.7. [9].

Таблица 1.7 – Основные свойства волокон на основе магнийалюмосиликатных стекол [9].

Параметр	ВМП	Е	S (США)
Плотность, г/см ³	2,58	2,54	2,49
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	4500	3500	4700
Модуль упругости при растяжении, МПа	95000	72000	94500
Относительное удлинение, %	4,8	4,5	5,4
Скорость звука, м/с	-	5330	5370
Диэлектрическая проницаемость при частоте 10 ¹⁰ Гц и 23°С	5,93	6,23	5,21

1.2.6 Базальтовые волокна

Базальт – это минерал, состав которого содержит не менее 9 оксидов, большая доля которых составляет диоксид кремния SiO₂ - до 60% и оксид алюминия Al₂O₃ - до 20 %. Переработка базальта в волокна происходит формованием из расплава и схожа с технологией получения стекланных волокон. Главными параметрами в технологии формования базальтовых волокон являются вязкость расплава горных пород и температура их кристаллизации, так как при

верхнем пределе кристаллизации $\approx 1270^{\circ}\text{C}$ изготовление непрерывных волокон становится невозможным [39].

Базальтовые волокна работоспособны в большом диапазоне температур от -260°C до 700°C , для сравнения стеклянные волокна разрушаются при температуре ниже -60°C и выше 500°C [40]. Также волокна из базальта обладают высокими физико-механическими и химическими свойствами, устойчивы к агрессивным средам и вибрациям, имеют хорошую адгезию к полимерным матрицам. ПКМ на основе базальтовых волокон обладают теплозвукоизоляционными и диэлектрическими свойствами. [9,41]

Однако, как и стеклянные, базальтовые волокна имеют высокий коэффициент трения и нестабильность свойств, которые напрямую зависят от исходного сырья в виде горных магматических пород.

Базальтовые волокна изотропны по своим свойствам, не имеют заметной ориентации и имеют аморфное строение [42]. Характеристики базальтовых волокон приведены в таблице 1.8.

Таблица 1.2.8 – Характеристики базальтовых волокон [9]

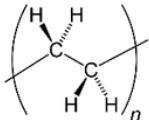
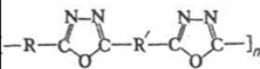
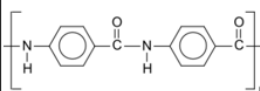
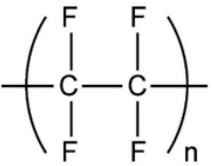
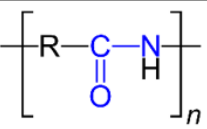
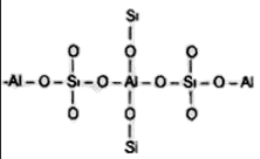
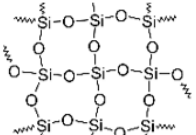
Характеристика	Значения
Диаметр поперечного сечения, мкм	1-20
Плотность, г/см ³	2,55-2,95
Модуль упругости, ГПа	80-85
Прочность, ГПа	3,4-4,0
Температура плавления, $^{\circ}\text{C}$	1000-1200

1.2.7 Обзор диэлектрических материалов для армирования ПКМ

Таким образом, для замены углеродных наполнителей на непроводящие волокна были выбраны диэлектрические наполнители ПКМ, которые делятся на две группы: это органические и неорганические. Органические материалы обладают необходимыми триботехническими свойствами (таб. 1.2.9), но при этом обладают низкой прочностью и адгезией к полимерным матрицам, а

неорганические материалы, наоборот, обладают прочностью и адгезией, но при этом отличаются высоким коэффициентом трения.

Таблица 1.9 – Сравнительные свойства органических и неорганических материалов для армирования ПКМ.

Диэлектрические наполнители ПКМ		Структурная формула	Преимущества	Недостатки
Органические наполнители	СВМПЭ (сверхвысокомолекулярный полиэтилен)		• Низкий коэффициент трения	• Низкая адгезия • Низкая термостойкость
	Поли-оксадиазол		• Высокая адгезия	• Высокое водопоглощение
	Арамид (ароматический полиамид)		• Высокая прочность	• Цена и доступность
	Фторопласт		• Низкий коэффициент трения • Высокая хим. стойкость	• Низкая смачиваемость • Низкая адгезия
	Полиамид		• Термостойкость • Высокая смачиваемость	• Низкая прочность
Неорганические наполнители	Стекло		• Высокая прочность • Высокая адгезия • Высокая термостойкость	• Высокая твердость • Высокий коэффициент трения
	Базальт		• Высокая адгезия • Высокая термостойкость	• Низкая стабильность свойств

Объединение разных типов волокон в структуре гибридного ПКМ позволит исключить недостатки материалов, которые состоят из одного вида армирующего волокна. В гибридном ПКМ органические волокна будут отвечать за

функциональные свойства материала, такие как коэффициент трения, а неорганические волокна - за механическую прочность.

1.3 Способы активации поверхности волокон и тканей

В полимерном композиционном материале от адгезии армирующих волокон к полимерной матрице зависит механическая прочность материала, пористость, трещиностойкость.

Согласно теории монолитности, именно адгезия вносит наибольший вклад в создание высокопрочных, устойчивых к различным деформациям ПКМ. [11].

Как уже было описано ранее, органические волокна из-за химического строения и структуры инертны и имеют низкую адгезию к полимерным матрицам, что является основным сдерживающим фактором при изготовлении армированных органическими волокнами ПКМ. Межфазное взаимодействие на границе раздела между полимерной матрицей и армирующими волокнами происходит при физическом контакте между ними только за счет смачивания, а хорошее смачивание может быть достигнуто только когда поверхностная энергия волокна выше энергии полимерной матрицы.

Для активации поверхности органических волокон используют методы воздействия низкотемпературной плазмы высокочастотного, низкочастотного и барьерного разрядов, обработку малыми дозами радиации, а также обработку широким спектром химических реагентов [43,44].

Воздействие низкотемпературной плазмы является наиболее современным и экологически чистым методом. Важной особенностью данного метода является тот факт, что изменениям подвергается очень тонкий приповерхностный слой, в то время как основная масса материала не изменяется, сохраняя прежние физико-механические свойства [45].

В работе Гиллера С.А., Канторовича В.М. описана обработка низкочастотным плазменным методом, она происходит на плазмохимической установке низкочастотного тлеющего разряда переменного тока частотой 50 Гц, схема которого приведена на рисунке 1.10. [46].

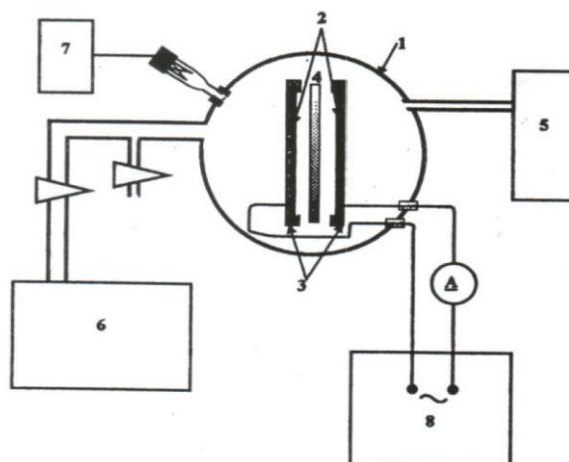


Рисунок 1.10 – Схема плазмохимической установки: 1 – вакуумная реакционная камера; 2 – металлические электроды с диэлектрической изоляцией; 3 – система перемотки; 4 – модифицируемый образец; 5 – система напуска рабочего газа; 6 – система вакуумирования (магистраль, клапаны, вакуумный насос); 7 – система измерения вакуума (лампа ПМТ – 2, вакуумметр ВТ-2А); 8 – блок питания разряда [40].

В вакуумную реакционную камеру (1) между металлическими электродами (2) с диэлектрической изоляцией с помощью системы перемотки (3) помещается образец волокна или ткани (4) таким образом, чтобы образец при зажигании тлеющего низкочастотного разряда находился в области катодного падения. В вакуумированную камеру через систему напуска (5) подается рабочий газ до давления (от 1,5 до 25 Па), которое определяется с помощью системы измерения вакуума (7). От блока питания разряда (8) на электроды подается напряжение и зажигается разряд с частотой тока 50 Гц, силой тока 30 - 120 мА.

1.4 Полимерные матрицы антифрикционных ПКМ

Существует две основные категории полимеров, которые применяются для создания антифрикционных ПКМ: термопластичные и термореактивные полимеры, которые обладают различной структурой, свойствами и способами обработки. Их различия обусловлены химической природой и цепной структурой, что влияет на процесс изготовления и эксплуатационные характеристики ПКМ на их основе.

Термопластичные полимерные матрицы состоят из линейных или разведённых цепей. При нагревании термопласты размягчаются и переходят в вязкотекучее состояние, и при охлаждении снова затвердевают и принимают заданную им форму [47].

К положительным свойствам термопластов можно отнести возможность многократной переработки без изменения структуры, легкость в обработке и формованию. Среди недостатков отмечают ограниченный срок термостойкости, зависимость физико-механических свойств от температуры и процесса изготовления.

Термореактивные полимерные матрицы состоят из жестких трехмерных сетей, которые образуются в результате реакции полимеризации, сшивания молекул между собой. После прохождения реакции термореактивные полимеры теряют возможность переходить в вязкотекучее состояние [48,49].

Термореактивные полимеры обладают высокой термостойкостью, прочностью, стабильностью размеров и диэлектрическими свойствами [9,38,47].

Так как процесс изготовления ПКМ на основе термопластов возможен только при повышенных температурах свыше 250 °С, а волокна из СВМПЭ переходят в вязкотекучее состояние при 130 °С, в качестве полимерной матрицы для создания гибридных антифрикционных ПКМ в данной работе были выбраны термореактивные полимеры, в частности эпоксидные [47].

Большая часть эпоксидных смол представляет собой смесь макромономеров (олигомеров с высокой молекулярной массой от сотен до нескольких тысяч единиц). Как правило, такие макромомеры содержат в своей молекулярной структуре алифатические, ароматические и гетероциклические структурные элементы, а также, две и более эпоксидных функциональных групп. Олигомеры, содержащие в молекуле одну эпоксидную группу, относят к активным разбавителям или, другими словами, пластификаторам.

Структурно молекула эпоксидной группы имеет вид треугольника, сформированный атомами углерода и кислорода. Эпоксидные циклы могут располагаться как внутри цепи, так и на концах полимерной цепи. Кроме того,

эпоксидные смолы могут представлять собой алициклические соединения с несколькими эпоксидными функциональными группами, одна из которых замыкается внутри цикла.

Стандартные эпоксидные смолы получают взаимодействием протонодонорных компонентов с эпихлоргидрином. Синтез модифицированных эпоксидных смол протекает как по другому механизму, так и гибридно из-за наличия других функциональных групп [9,38,47,50,51].

Эпоксидные смолы на основе бисфенола А

Эпоксидно-диановые смолы представляют собой простые эфиры – продукты поликонденсации бисфенола А с эпихлоргидрином. Содержат в своей структуре ароматические кольца и гидроксильные группы. Из используемых в работе рассмотрены эпоксидно-диановые смолы ЭД-20 и ЭД-16 (ГОСТ 10587). ЭД-20 имеет средний показатель вязкости ($M_n = 1000 - 2000$), а смола ЭД-16 является высоковязкой ($M_n = 2000 - 3600$). Структурная формула эпоксидных смол на основе бисфенола А приведена на рисунке 1.11. Характеристики компонентов приведены в таблице 1.10. [9, 52]

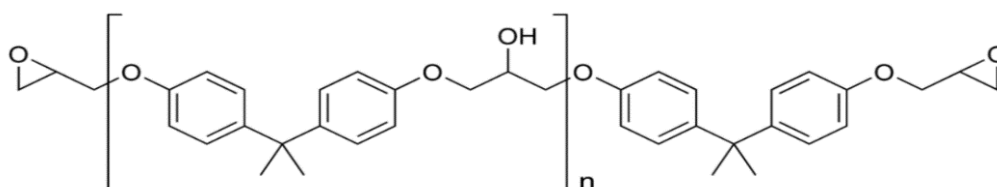


Рисунок 1.11 – Структурная формула эпоксидной смолы на основе бисфенола А[0].

Таблица 1.10 – Свойства эпоксидно-диановых смол [52].

Наименование	Плотность, г/см ³	Молекулярная масса	Динамическая вязкость, Па·с	Массовая доля эпоксидных групп, %	Время желатинизации, ч, не менее
ЭД-20	1,16	382 – 430	12 – 25	20,0 – 22,5	4 – 8
ЭД-16	1,16	480 – 540	5 – 20	16,0 – 18,0	3 – 4

Низковязкая ЭД-20 имеет высокое содержание эпоксидных групп на единицу массы полимера, что позволяет применять её без использования токсичных экологически вредных растворителей. При малом нагреве (40 – 60°C)

легко перерабатывается для пропитки армирующего материала. В связи с такой вязкостью – композиции на основе ЭД-20 образуют композиции с высокой степенью сшивки и обладают повышенной диффузией в пористые поверхности, из-за чего хорошо совместимы со многими армирующими материалами.

Если связующие на основе ЭД-20 лучше применимы в мокрой намотке, контактном формовании, инфузии, то смола ЭД-16 более применима в той области, где необходимо получение переходных полуфабрикатов – препрегов, в связи с высокой вязкостью. Данный метод переработки оптимален для горячего/холодного прессования.

Как и остальные эпоксидно-диановые смолы ЭД-20 и ЭД-16 имеют хорошую стойкость к галогенам, сильным кислотам, щелочам, отличаются высокой адгезией к металлам. Сшитые композиции имеют высокую температуру стеклования. Для переработки компоненты хорошо растворимы в ацетоне, спирте. Имеют малую усадку при отверждении. [9,53,54]

Галогенсодержащая эпоксидная смола ЭХД представляет собой продукт взаимодействия эпихлоргидрина и хлорсодержащего ароматического диамина, далее дегидрохлорированного гидроксидом натрия. Смола имеет вид высоковязкой жидкости желто-зеленого цвета. Смола хорошо растворяется в ацетоне, ароматических и хлорированных углеводородах. Структурная формула эпоксидной смолы ЭХД приведена на рисунке 1.12.

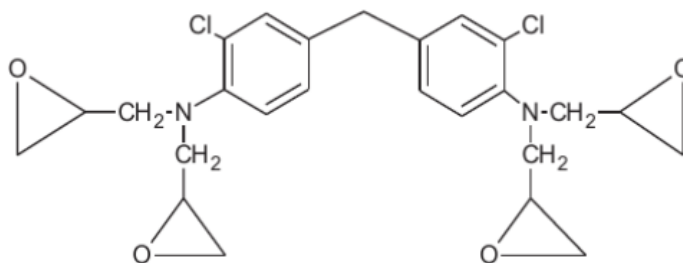


Рисунок 1.12 – Структурная формула смолы ЭХД [54].

В композиции с отвердителями горячего отверждения образует сшитые полимеры с высокой теплостойкостью, пониженной горючестью, самозатуханием, высокой прочностью отвержденных композиций, низким

водопоглощением и химической стойкостью. Имеет массовую долю эпоксидных групп в пределах 25 – 32% и динамическую вязкость при 50°C не менее 14 Па·с. В связи с высокой молекулярной массой и наличием 2 хлорных заместителей – отличается высокой реакционной способностью по отношению к отвердителям. [55,56]

1.4.1 Способы модификации полимерных матриц

Для повышения технологичности переработки связующего, увеличения смачиваемости и деформационной стойкости материала нередко в эпоксидных системах применяются пластификаторы (активные разбавители). Слово «активные» говорит о том, что в отличие от инертных разбавителей (ацетон, спирт, ксилол, толуол и др.), такой класс соединений при введении в систему может изменять её свойства. Степень изменения напрямую зависит от количества введенного компонента, но обычно используется от 5 до 20 массовых частей. Такое соотношение обусловлено низкой молекулярной массой пластифицирующего олигомера ($M_n = 200 - 350$). Введение активных разбавителей увеличивает степень и качество отверждения системы из-за увеличения молекулярной подвижности (движение свободных радикалов, реакционных групп), предел прочности при сжатии и величину деформации. [9,57]

При введении определенного количества пластификатора стоит учитывать, что повышение эластичности сшитого полимера или понижение частоты образующихся узлов из-за неразветвленной структуры таких олигомеров может приводить к потере жесткости и термостойкости материала. Однако, чрезмерно высокая жесткость повышает коэффициент трения и линейный износ ПКМ, поэтому правильно подобранное соотношение компонента на массу всего компаунда приводит к положительному эффекту - росту физико-механических и триботехнических свойств [51,56,57].

Эпоксидная алифатическая смола диэтиленгликоль (ДЭГ-1) – представляет собой продукт конденсации эпихлоргидрина с диэтиленгликолем. При нормальных условиях ДЭГ-1 имеет вид жидкости светло-коричневого цвета.

Имеет низкую вязкость и используется в качестве активного разбавителя смол, отлично смешиваясь при комнатной температуре. Кроме уменьшения вязкости композиции, значительно увеличивает эластичность отвержденной композиции, устойчивость к перепадам температур при добавлении не более 15%. Структурная формула приведена на рисунке 1.13.

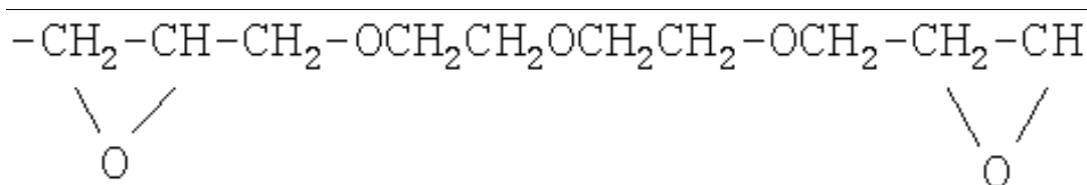


Рисунок 1.13 – структура пластификатора ДЭГ-1 [52].

Эпоксидная смола Э-181 – продукт поликонденсации эпихлоргидрина с последующим дегидрохлорированием. Имеет вид низковязкой жидкости светло-желтого цвета. Данный пластификатор придает композиции высокие электроизоляционные и деформационные свойства. Кроме того, из-за особенности сшивки в полимерах, Э-181 повышает устойчивость композита к ударным нагрузкам и вибрации. Несмотря на аналогичную динамическую вязкость, как у алифатической смолы ДЭГ-1 (0,07 Па * с), дольше смешивается со смолами ввиду химической природы, поэтому для упрощения смешения композицию можно нагревать. [14, 16]

Для изготовления антифрикционных ПКМ смола Э-181 выступает не только разбавителем высоковязких смол, но и придает композиту свойства гашения вибрации и увеличения жесткости и прочности ПКМ. Свойства используемых пластификаторов приведены в таблице 1.11. [54,56]

Таблица 1.11 – Свойства пластификаторов для эпоксидных смол [54].

Характеристика	ДЭГ-1	Э-181
Массовая доля эпоксидных групп, %	26,0	25,0
Динамическая вязкость при 25°C, Па·с	0,07	0,07
Массовая доля летучих веществ, %	2,5	7,0

1.5 Обзор видов армирующих тканей и способов их плетения

Армирующей тканью называется текстильное изделие, образуемое в

результате переплетения нескольких систем нитей, используемое для формирования структуры ПКМ. Как правило, этих систем две – основа, нити которой расположены по длине ткани, и уток, нити которого перпендикулярны основе (рис. 1.14). Возможно наличие нескольких систем нитей основы или утка, образующих слои в ткани. Существуют и трехосные ткани, когда три системы нитей пересекаются под углом 60 градусов [58,59].

Ткань имеет фон и кромки. Кромки формируют края ткани. Ширина кромки тканей составляет 0,25 – 1 % от ширины ткани. Кромки предохраняют ткань от чрезмерного сужения в процессе ее формирования и отделки, в результате чего они испытывают большее напряжение, чем фон ткани. Поэтому кромки должны быть достаточно прочными.

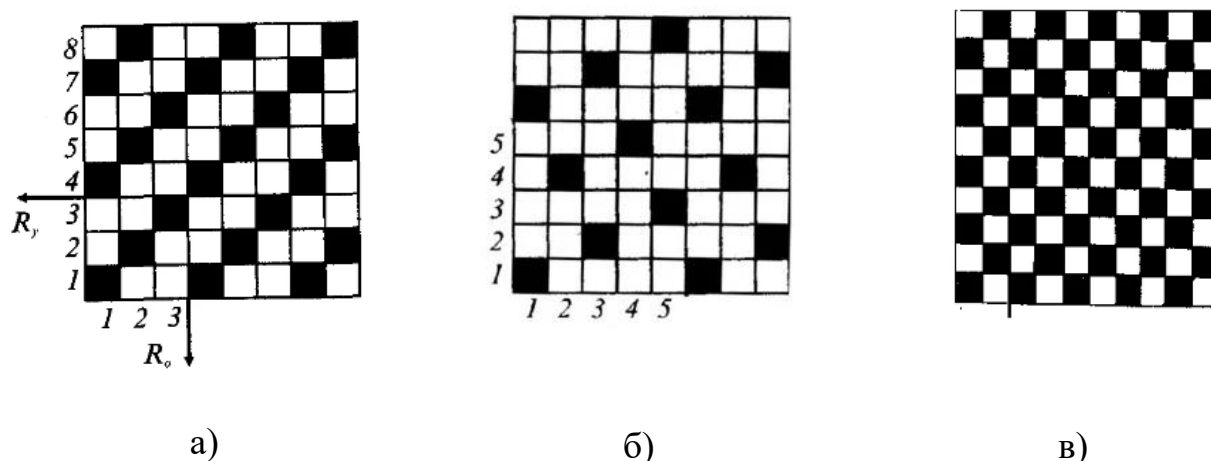


Рисунок 1.14 – Изображение рисунков переплетений:

а – саржевое; б – сатиновое; в – полотняное [58].

Свойства ткани являются производными от трех групп факторов: свойств нитей или пряжи, из которых соткана ткань; рисунка ткацкого переплетения и внутреннего строения ткани (характера изгиба нитей в ткани).

Ткацким переплетением называется способ соединения нитей основы и утка в процессе формирования ткани.

Ткацкие переплетения условно изображаются на клетчатой бумаге: основные нити вертикальными полосами, уточные – горизонтальными.

Счет основных нитей ведется слева направо, уточных – снизу вверх. Каждая клетка на рисунке обозначает перекрытие – пересечение нитей основы и утка: она

закрашена, если на лицевой поверхности ткани находится нить основы (основное перекрытие m_0), и не закрашена, если нить утка (уточное перекрытие – m_y).

Раппортом переплетения R называется минимальная повторяющаяся часть рисунка переплетения. Раппорт по основе (утку) R_0 (R_y), – это количество основных (уточных) нитей в раппорте переплетения [58].

Сдвиг по основе (утку) одиночного переплетения S_0 (S_y) – это положительное или отрицательное число, показывающее, на сколько нитей отстоит это перекрытие от одноименного одиночного перекрытия на смежной нити.

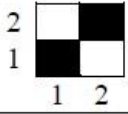
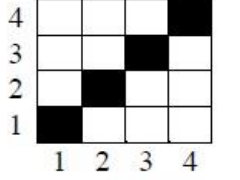
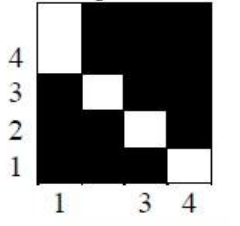
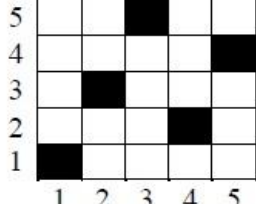
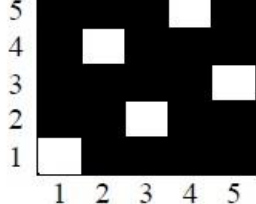
Положительный сдвиг – это сдвиг перекрытия слева направо, отрицательный – справа налево.

Ткацкие переплетения делят на следующие классы: главные (простые), мелкоузорчатые, сложные и крупноузорчатые. Мелкоузорчатые, сложные и крупноузорчатые применяются для создания декоративных тканей. В данной работе задачи разработки декоративных тканей не стоит, поэтому рассматриваются только главные переплетения.

Главные переплетения. Главными называют такие переплетения, в которых в пределах раппорта на каждой основной или уточной нити имеются одиночные перекрытия. В таких переплетениях раппорт по основе равен раппорту по утку ($R_0 = R_y$) [58].

К главным переплетениям относятся полотняное, саржевое, сатиновое и атласное (таблица 1.12) [59].

Таблица 1.12 – Виды плетений армирующих тканей для изготовления ПКМ [59].

Название переплетения	Обозначение	Рисунок переплетения	Характерные особенности
Плотняное	-		$m_o=m_y=1$ $R_o=R_y=2$ $S_o=S_y=1$
Саржевое	$\frac{m_o}{m_y}$	  правая уточная саржа 1/3 левая основная саржа 3/1	$R_o=R_y=m_o+m_y \geq 3$ $S_o=S_y=+1$ (правая саржа) $S_o=S_y=-1$ (левая саржа) $m_o=1, m_y=R-1$ (уточная саржа) $m_y=1, m_o=R-1$ (основная саржа)
Сатиновое	$\frac{R}{S_y}$	 сатин 5/3	$m_o=1, m_y=R-1$ $R_o=R_y \geq 5$ $S_o \neq S_y$ R и S_o не кратны
Атласные	$\frac{R}{S_o}$	 атлас 5/3	$m_y=1, m_o=R-1$ $R_o=R_y \geq 5$ $1 < S_y < R-1$ $S_o \neq S_y$ R и S_o не кратны

Характерной особенностью плотняного переплетения является наличие на поверхности ткани одиночных основных и уточных перекрытий, расположенных в шахматном порядке.

Таким образом, ткани плотняного переплетения имеют на лицевой и изнаночной стороне одинаковое число основных и уточных перекрытий, то есть являются двухлицевыми тканями. Плотняное переплетение при прочих равных

условиях позволяет вырабатывать наиболее прочные ткани, так как оно обеспечивает наибольшее число связей между нитями основы и утка [58,59].

Плотняное переплетение широко применяется во всех отраслях текстильной промышленности. В хлопчатобумажной промышленности этим переплетением вырабатывают большое количество бельевых, платьевых, рубашечных и одежных тканей (это ткани типа бязи, миткаля, шифона, майи, батиста и др.); в шерстяной – различные суконные ткани. В шелковой промышленности плотняным переплетением вырабатывается ткань сравнительно ограниченного числа артикулов. К преимуществам плотняного плетения относятся высокая прочность и стабильность формы ткани, равномерное распределение нагрузки вдоль основы и утка. Недостатком данного плетения является плотность расположения нитей из-за чего нити утка сильно деформируются [58].

Ткани *саржевого* переплетения имеют на их поверхности диагональные полосы из уточных и основных перекрытий. На лицевой стороне ткани диагональные полосы чаще всего направлены снизу слева вверх направо. Знак сдвига показывает направление наклона диагоналей саржи. Если на лицевой стороне саржи преобладают уточные перекрытия, то она называется уточной, а если преобладают основные перекрытия, саржа называется основной.

Саржевое переплетение позволяет регулировать соотношение нитей основы и утка, при этом диагональная структура ткани распределяет нагрузку по основе. Ткань с данным плетением сложно драпируется (требуется усиление кромок) [58].

Сатиновое переплетение характеризуется наличием на лицевой стороне ткани длинных уточных и одиночных основных перекрытий, равномерно расположенных на площади раппорта. Для получения ровной блестящей поверхности лицевой стороны в тканях необходимо сформировать уточный застил, то есть плотность ткани по утку должна быть больше плотности ткани по основе [58].

Ткани *атласного* переплетения характеризуются наличием на лицевой стороне длинных основных и одиночных уточных перекрытий, равномерно

расположенных по площади раппорта. Для атласных переплетений необходимо сформировать основной застил, то есть плотность ткани по основе должна превышать плотность ткани по утку [58,59].

При выборе сдвига в сатиновом и атласном переплетении рекомендуется располагать одиночные перекрытия каждой нити ближе к середине длинного перекрытия предыдущей нити. Это делается для предупреждения раздвижек нитей в ткани. Сатины и атласы, имеющие постоянный сдвиг, называют правильными.

Сатиновое и атласное переплетение получило широкое применение в хлопчатобумажной, шелковой, а также льняной и шерстяной отраслях промышленности.

Как правило, ткани с атласным переплетением на ткацких станках вырабатывают лицевой стороной вниз. Это делается для уменьшения числа одновременно поднимающихся нитей основы с целью уменьшения их обрывности, а также затрат энергии.

1.6 Обзор технологий получения ПКМ и способов их переработки в изделия

Для получения изделий из армированных ПКМ применяют следующие методы:

1. Контактное (ручное) формование. Данный метод заключается в послойном нанесении армирующей ткани на форму, заранее смазанную разделительным антиадгезионным слоем. После нанесения каждого армирующего слоя происходит его пропитка связующим непосредственно на форме с помощью кистей, роликов, стремясь обеспечить хороший контакт между слоями и максимальное удаление воздуха. При использовании связующих холодного отверждения форму с заготовкой изделия выдерживают необходимое время при комнатной температуре до полного отверждения связующего. При применении связующего горячего отверждения форма с заготовкой изделия помещается в термокамеру. Температура и продолжительность термообработки зависят от вида

применяемого связующего. После отверждения связующего изделие снимают с формы [60,61].

Отсутствие давления на изделие, полученное методом контактного формования, обуславливает его пониженные прочностные характеристики и повышенную пористость, особенно в случае использования связующих, содержащих инертные растворители.

2. Метод вакуумного формования. Вакуумный метод формования предусматривает такую же технологию укладки и пропитки армирующей ткани, как и метод контактного формования, однако после набора необходимого объема материала его помещают в герметичный чехол, под которым создается вакуум. С помощью атмосферного давления происходит процесс прессования. Таким образом получается создать равномерное давление на формируемое изделие, что позволяет достичь высокие прочностные свойства ПКМ и не допускает образование дефектов в материале [61].

Так как давление на прессуемое изделие методом вакуумного формования не может быть более 0,1 МПа, данный метод не подходит для создания высококачественных материалов [62].

3. Метод горячего прессования. Одним из наиболее распространённых методов переработки ПКМ является метод горячего прессования препрегов. Данный метод за счет одновременной комбинации высокого давления прессования (до 10 МПа) и температуры позволяет обеспечить высокое качество изделий. Отпрессованные ПКМ обладают низкой пористостью, и как следствие, высокой прочностью и низким водопоглощением [9,60, 61]. Технологию горячего прессования можно разделить на несколько стадий:

- Приготовление пропиточных лаков. Пропиточный лак представляет собой сложную композицию из олигомера, отвердителя, ускорителя отверждения, модификаторов, пластификатора и растворителя. Приготовление пропиточных лаков производится в специальных реакторах с перемешивающим устройством.

- Изготовление препрега растворным методом в вертикальной пропиточной машине. Армирующая ткань, помещённая в установку для пропитки, проходит

стадию пропитки лаком с последующей сушкой. После приготовления препрега его нарезают на листы или ленты.

- Укладка препрега в пресс-форму или намотка на оправку. При изготовлении плит из армированных ПКМ препрег нарезают на заготовки пресс-материала по одному шаблону, соответствующему контуру изделия и его ориентации относительно нитей основы ткани. В процессе изготовления контрольных плит слои ткани укладываются таким образом, чтобы направление нитей основы и нитей утка каждого слоя совпадали между собой. Для изделий в виде тел вращения применяют метод намотки. Сущность метода состоит в непрерывной намотке ленты препрега на вращающуюся оправку, образуя слои и формируя таким образом требуемую толщину и структуру стенки [60].

- Прессование. Данный процесс является основной и заключительной стадией горячего прессования ПКМ на основе термореактивных связующих, армированных тканым наполнителем. Большое внимание уделено этому методу переработки полимерных материалов в работе А.В. Анисимова, В.Е. Бахаревой, И.В. Блышко [9,60]. После загрузки препрега в пресс-форму ее помещают под специальный пресс, в большинстве случаев гидравлический, оборудованный обогревом. В процессе прессования полимерное связующее, входящее в состав пресс-материала, находящегося под действием давления и высокой температуры, расплавляется, заполняя формирующее пространство. После установления постоянного давления, свидетельствующего о заполнении всех пор и пустот, и требуемой температуры пресс-материал выдерживается до полного отверждения полимерной матрицы. По окончании времени выдержки, зависящей от скорости отверждения материала, обогрев пресс-форм отключается, и происходит естественное охлаждение готового изделия под давлением для предотвращения изменения формы под влиянием остаточных напряжений.

Заключительной стадией любого метода создания армированных ПКМ является механическая обработка, которая производится для удаления острых кромок, облоя, а также получения требуемых геометрических размеров изделия.

Постановка задачи исследования

Исследования в направлении темы диссертационной работы известны в научно-технической литературе. Наибольший вклад в разработку антифрикционных ПКМ и исследования их характеристик внесли такие ученые, как Бахарева В.Е., Сими́на В.Н., Рубин М.Б., Анисимов А.В., Лишевич И.В., Гинзбург Б.М. и другие. Однако анализ рассмотренных литературных данных свидетельствует о том, что в настоящее время не существует гибридных антифрикционных ПКМ на основе гибридной армирующей ткани из органических и неорганических волокон для тяжело нагруженных узлов трения, смазываемых водой, которые сочетают в себе достаточную прочность для работы при давлении 60 МПа, низкий коэффициент трения и электроизоляционные свойства.

Разработка гибридных антифрикционных ПКМ для применения в тяжело нагруженных узлах трения, подверженных электрохимической и контактной коррозии, является особенно актуальной задачей, достижимой за счет применения современных диэлектрических армирующих материалов, полимерных матриц, разработанных методов изготовления, современных методов исследования антифрикционных ПКМ и опыт предыдущих ученых.

Таким образом, целью настоящей работы является разработка и определение рационального состава гибридного антифрикционного ПКМ на основе термореактивной полимерной матрицы и гибридной армирующей ткани для узлов трения, работающих при высоких нагрузках и со смазкой водой, который не способствует развитию коррозии металлических контртел.

Для достижения поставленной цели были реализованы следующие задачи:

1. Анализ физико-механических свойств армирующих материалов, применяемых для производства гибридных 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 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.

ГЛАВА 2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Во второй главе приведены выбранные армирующие волокна и исходные материалы полимерной матрицы 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, обеспечивающего эластичность и повышенную плотность ткани, разработано 12 типов тканей с варьированием соотношения стеклянных, а также СВМ волокон по основе и органических волокон по утку.

Также глава посвящена описанию использованных при выполнении диссертационной работы методов исследований, которые позволяют комплексно оценить влияние состава и структуры гибридных антифрикционных ПКМ на их физико-механические и триботехнические свойства, 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 гибридных антифрикционных ПКМ.

2.1 Армирующие материалы

В результате литературного анализа физико-механических и триботехнических характеристик армирующих волокон, представленных в первой главе, для изготовления гибридной армирующей ткани были выбраны органические и неорганические нити. Важным критерием для выбора

армирующих нитей являлась их доступность и наличие налаженного производства на территории РФ.

Ниже представлены выбранные волокна и обоснование их выбора.

1) Стекланные волокна производства АО «НПО Стеклопластик», (г. Солнечногорск, Московская обл.). В таблице 2.1 представлены свойства стеклонитей из высокомодульных высокопрочных волокон (ВМПС). Упруго-прочностные характеристики волокон ВМПС более, чем на 30% превосходят аналогичные показатели алюмоборосиликатных волокон (Е-стекло), а также обладают более высокой длительной прочностью, термо- и водостойкостью.

Таблица 2.1 – Свойства нитей ВМПС 28х4

Характеристика	Значение
Номинальный диаметр элементарной нити, мкм	8
Результирующая линейная плотность, текс	112 ± 6
Тип замасливателя	№78, №14
Разрывная нагрузка, не менее, Н	58,8

2) Волокна из СВМПЭ производства АО «ВНИИСВ» (г. Тверь) марок ПЭ-1 и ПЭ-2 и производства ООО «Фторопласт» (г. Санкт-Петербург) марки «С» (таб.2.2). Данные нити были выбраны для изготовления гибридных тканей за счет стабильности их свойств и достаточного объема производства на предприятиях. Также необходимо отметить, что нити ПЭ-2 производят из нитей ПЭ-1 путем вытягивания, что практически в два раза уменьшает диаметр нити и значительно увеличивает разрывную нагрузку.

Таблица 2.2 – Свойства СВМПЭ нитей

Характеристика	ПЭ-1	ПЭ-2	С
Линейная плотность, текс	48	27	170
Удельная разрывная нагрузка, сН/текс	288	380	-
Начальный модуль при растяжении, сН/текс	9250	13800	8000
Удлинение при разрыве, %	4,4	3,6	5
Количество филаментов	249	249	150
Температура плавления, °С	130	130	130
Условный диаметр филамента, мкм	14,7	9,6	2-5
Среднее значение прочности, МПа	2700	-	1500

3) Арамидные нити производства АО «КАМЕНСКВОЛОКНО» (г. Каменск-Шахтинский, Ростовская обл.) являются наиболее качественными из представленных на российском рынке и обладают оптимальным, с точки зрения регулирования состава ткани, значением линейной плотности. В таблице 2.3 представлены свойства нитей (СВМ-Н).

Таблица 2.3 – Свойства нитей СВМ-Н

Характеристика	Значение
Номинальная линейная плотность	29,4
Удельная разрывная нагрузка нити, сН/текс	181
Удлинение нити при разрыве, %, не менее	3,0
Число кручений на 1м нити, кр/м	100 ± 10
Массовая доля замасливателя, %	1,0 – 2,2
рН нити	5,1 – 8,0

4) Полиоксадиазольная нить марки «Арселон» производства ОАО «СветлогорскХимволокно» (табл. 2.4).

Таблица 2.4 – Свойства полиоксадиазольных нитей марки «Арселон»

Характеристика	Значение
Линейная плотность, текс	29,4
Удельная разрывная нагрузка, мН/текс, не менее	370
Удлинение нити при разрыве, %, не менее	3,0
Фактическая влажность, %, не более	8,0
Массовая доля замасливателя или антистатика, %	1,0 – 2,0
Число кручений на 1 метр, кр/м	90 ± 10
Термостойкость, %, не менее	25

5) Высокопрочные (высокомодульные) волокна для кордных тканей из полиамида 6 (66) производства ООО «Курскхимволокно» (г. Курск, Курская обл.). В таблице 2.5 представлены свойства нитей.

Таблица 2.5 – Свойства полиамидных нитей

Характеристика	Значение
Номинальная линейная плотность, текс	47,0
Фактическая линейная плотность, текс	45,6 – 48,4
Удельная разрывная нагрузка, не менее, сН/текс	66
Удлинение нити при разрыве, не более, %	23
Линейная усадка нити, не более, %	9,5
Количество кручений на 1 м, Кр/м	0
Массовая доля замасливателя на нити, не более, %	1,2
Тип замасливателя (наименование растворителя)	Fasavin
Количество пневмосоединений на 1м, не более, шт/м	15
Количество элементарных нитей в комплексной, шт	105
Масса нити на паковке, кг	5,0 ± 0,2

6) Фторопластовые волокна производства ООО «Фторопласт» (г. Санкт-Петербург) являются уникальными в своем роде. Выбранная нить Ф-4 представляет собой крученную нить из 3 монопитей вытянутых из пленки Ф-4. За счет кручения и способа изготовления нить обладает повышенной прочностью в сравнении с другими нитями из Ф-4. В таблице 2.6 представлены свойства фторопластовой крученой нити;

Таблица 2.6 – Свойства крученой нити из Ф-4

Характеристика	Значение
Линейная плотность, текс	125
Разрывная нагрузка, Н	30
Удлинение при разрыве, %	6
Диапазон рабочих температур	От -210 до +260
Количество филаментов	3
Число кручений на метр	400
Условный диаметр нити, мм	0.25
Среднее значение прочности, МПа	600

2.2 Гибридные армирующие ткани

Гибридная армирующая ткань – это система, состоящая из нитей разного типа. По основе ткани были направлены наиболее прочные стеклянные волокна, а в уток вплетались нити другого типа: СВМ, СВМПЭ, Арселон, Ф-4 и другие. Прочностные свойства ПКМ зависят от нескольких факторов: свойств полимерной матрицы, свойств армирующей ткани, адгезии полимерной матрицы

и армирующей ткани, соотношения полимерной матрицы и армирующей ткани в составе ПКМ, способа изготовления ПКМ, степени полимеризации полимерной матрицы, наличия технологических дефектов в структуре ПКМ. Большое количество переменных факторов делает затруднительным точный расчет прогнозируемых свойств при разработке новых ПКМ. Использование гибридной армирующей ткани добавляет еще некоторые переменные в расчет прочностных характеристик гибридных ПКМ: свойства и соотношения разных типов нитей, из которых соткана ткань; рисунок ткацкого переплетения и внутреннее строение ткани (характер изгиба нитей в ткани).

Поскольку целью данной работы была разработка гибридного антифрикционного ПКМ, который должен обладать свойствами, которые не уступают свойствам антифрикционного ПКМ марки УГЭТ, сочетая одновременно прочность при сжатии не менее 250 МПа и низкий коэффициент трения, то для прогноза прочностных свойств гибридного антифрикционного ПКМ использовался закон смесей, была проведена оценка, учитывающая содержание высокопрочных стеклянных волокон с высокой адгезией. При добавлении СВМПЭ волокон прочность гибридного антифрикционного ПКМ значительно снижается из-за того, что СВМПЭ волокна обладают меньшей прочностью и практически нулевой адгезией к полимерной матрице, тем самым волокна СВМПЭ создают дефекты в структуре ПКМ.

Так как СВМПЭ обладают низкой адгезией и не являются армирующими волокнами, положительно влияющими на прочность материала, было принято решение не учитывать влияние СВМПЭ волокон в прочностных расчетах. Зависимость предела прочности при сжатии от соотношения стеклянных волокон в составе армирующей ткани была установлена с помощью экспериментальных данных.

Для прогноза прочностных свойств материала была предложена упрощенная линейная модель, представленная на рисунке 2.7, которая учитывает прочность при сжатии ПКМ, состоящего только из стеклянных волокон (550 МПа) и прочность при сжатии ПКМ, состоящего только из СВМПЭ волокон (30 МПа).



Рисунок 2.7 – Диаграмма зависимости расчетного предела прочности гибридного антифрикционного ПКМ от содержания стеклянных волокон

По результатам анализа расчетов прочности гибридного антифрикционного ПКМ можно сделать вывод о нецелесообразности снижения содержания стеклянных нитей в составе армирующей ткани ниже 60%. Таким образом для экспериментального исследования зависимости прочностных показателей ПКМ от состава гибридных армирующих тканей было выбрано соотношение стеклянных волокон к волокнам другого типа 60%/40%, как минимально обеспечивающее требуемую прочность и 80%/20%, как промежуточное между минимальным и максимальным значением содержания стеклянных волокон для обеспечения прочностных характеристик [64,66].

Исходя из того, что некоторые типы нитей имеют разную линейную плотность, и для поддержания определенных ранее процентных соотношений разных типов нитей в ткани применялись различные типы плетений. Для изготовления армирующих тканей было применено саржевое плетение, так как ткань с саржевым плетением обладает эластичностью, что положительно влияет на процессы изготовления ПКМ ручным формованием, намотку ткани на оправку при формировании заготовки в виде втулки и укладку ткани в прессформу. Также

ткани с саржевым переплетением значительно плотнее тканей с полотняным плетением, что влияет на структуру ПКМ, которая становится плотнее, за счет чего повышается стойкость материала к изнашиванию. Саржевое плетение позволило регулировать соотношение органических и неорганических нитей в составе ткани.

Характеристики разработанных гибридных армирующих тканей представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Гибридные армирующие ткани и их характеристики.

№	Марка нитей основы	Марка нитей утка	Соотношение нитей, основа/уток	Вид плетения	Поверхностная плотность, г/м ²	Толщина, мм	Плотность (количество нитей на единицу длины) н/см	
							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

По выбранным схемам плетения и составам ткани (таблица 2.1) были изготовлены гибридные армирующие ткани на базе АО «НПО Стеклопластик» на ткацких станках СТБ 2-180, дополнительно оснащенных системами вытяжной вентиляции и удаления стеклопыли.

На рисунке 2.8 представлены фотографии некоторых образцов разработанных гибридных армирующих тканей со стеклянными нитями (ВМПС8 28х4) в основе и СВМПЭ, полиамидными, СВМ-Н, полиоксадиазольными (Арселон) нитями в утке

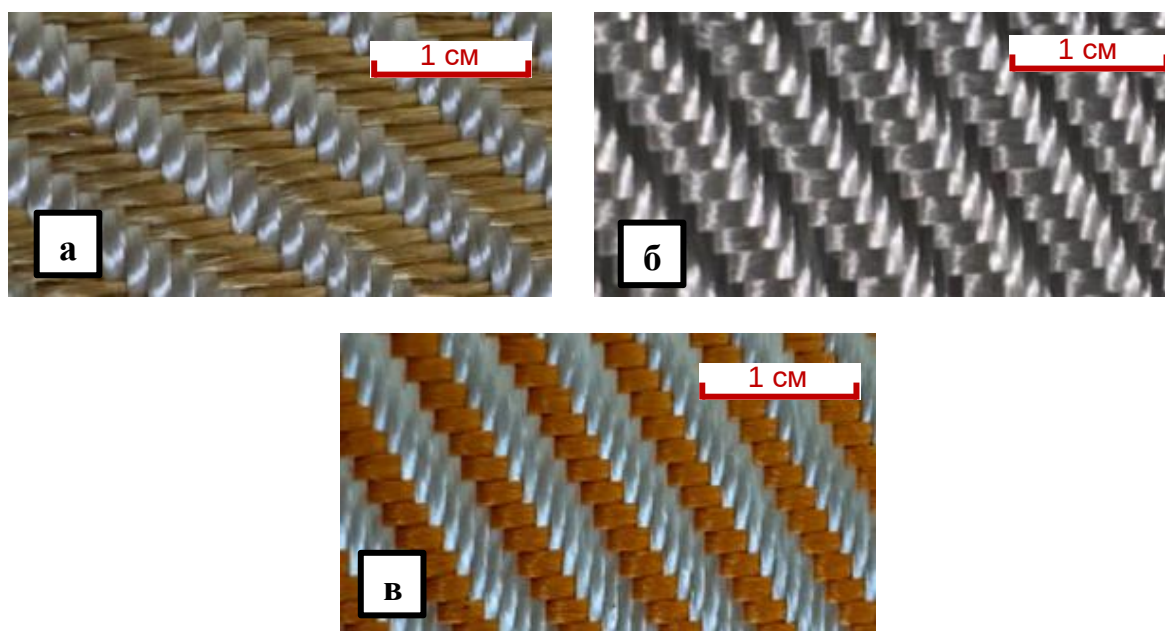


Рисунок 2.8 – Внешний вид образцов гибридных армирующих тканей:
 а) ткань из стеклянных нитей и нитей СВМ, б) ткань из стеклянных и СВМПЭ нитей,
 в) ткань из стеклянных нитей и полиоксидазольных нитей марки «Арселон»

В основу ткани были заправлены прочные неорганические нити (ВМПС8 28х4), так как они должны обеспечить прочность ткани при натяжении во время пропитки полимерной матрицей и во время намотки препрега на оправку [60].

2.3 Полимерные матрицы

Эпоксидные матрицы обладают высокими когезионной и адгезионной прочностью к различным наполнителям, водостойкостью, теплостойкостью, малой усадкой при отверждении, что обусловило их применение для изготовления гибридных антифрикционных ПКМ [60].

Как известно, эпоксидные матрицы имеют густосетчатую структуру гетерополимера, которая образуется в результате реакции полиприсоединения эпоксидного олигомера и отвердителя. Для реализации идеи создания гибридного антифрикционного ПКМ путем замены углеродных наполнителей в составе ПКМ марки УГЭТ на гибридную армирующую ткань (полимерная матрица ЭТ-2 при этом оставалась без изменения). Как было установлено еще со времен разработки материала УГЭТ, полимерная матрица ЭТ-2 обладает оптимальными

триботехническими характеристиками и высокими прочностными свойствами. В настоящей работе в качестве эпоксидной матрицы был выбран хлорсодержащий олигомер ЭХД марки производства ЗАО «Химэкс Лимитед», который получают из эпихлоргидрина и 3,3'-дихлор-4,4'-диаминодифенилметана (структурная формула представлена на рисунке 2.9), а также высокомолекулярный аминный отвердитель марки «Диамет-Х» [9].

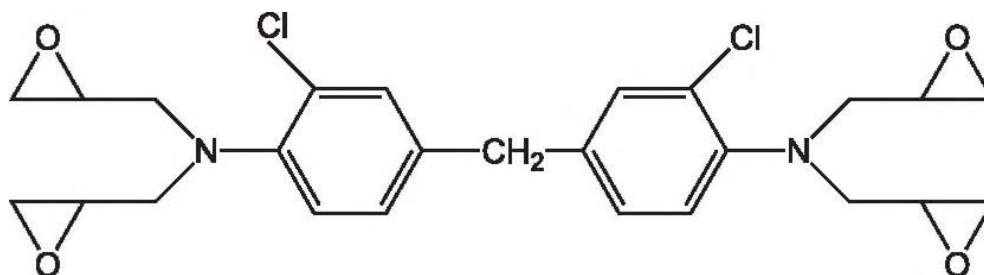


Рисунок 2.9 – Структурная формула эпоксидного олигомера ЭХД.

Олигомер ЭХД образует в отвержденном состоянии высокопрочную структуру и имеет высокую стойкость к истиранию. Интенсивность изнашивания ненаполненных композиций олигомера ЭХД в 20 раз ниже, чем эпоксидиановых (типа ЭД-20).

На втором этапе работы при модификации разработанного гибридного антифрикционного ПКМ эпоксидная матрица ЭТ-2 была заменена на ЭТ-4, матрицу на основе ЭХД, среднетемпературного отвердителя Этал-200Т и пластификатора Э-181. [67].

Из-за замены отвердителя на Этал-200Т появилась возможность отверждения полимерной матрицы при температуре до 120° С, что позволило избежать изменения структуры СВМПЭ волокон. Сравнительные свойства связующих ЭТ-2 и ЭТ-4 приведены в таблице 2.2, а на рисунке 2.10 приведены графики разрушающих испытаний и режимы отверждения [67].

Таблица 2.2 – Характеристики эпоксидных связующих ЭТ-2 и ЭТ-4 [67].

Характеристики	ЭТ-2 (ЭХД+ ДиаметХ+ резарцин)	ЭТ-4 (ЭХД+ Этал200Т+ Э-181)
Предел прочности при сжатии, МПа	184	200
Коэффициент трения при 25 МПа	0,10	0,07
Интенсивность изнашивания, мкм/км	17	19

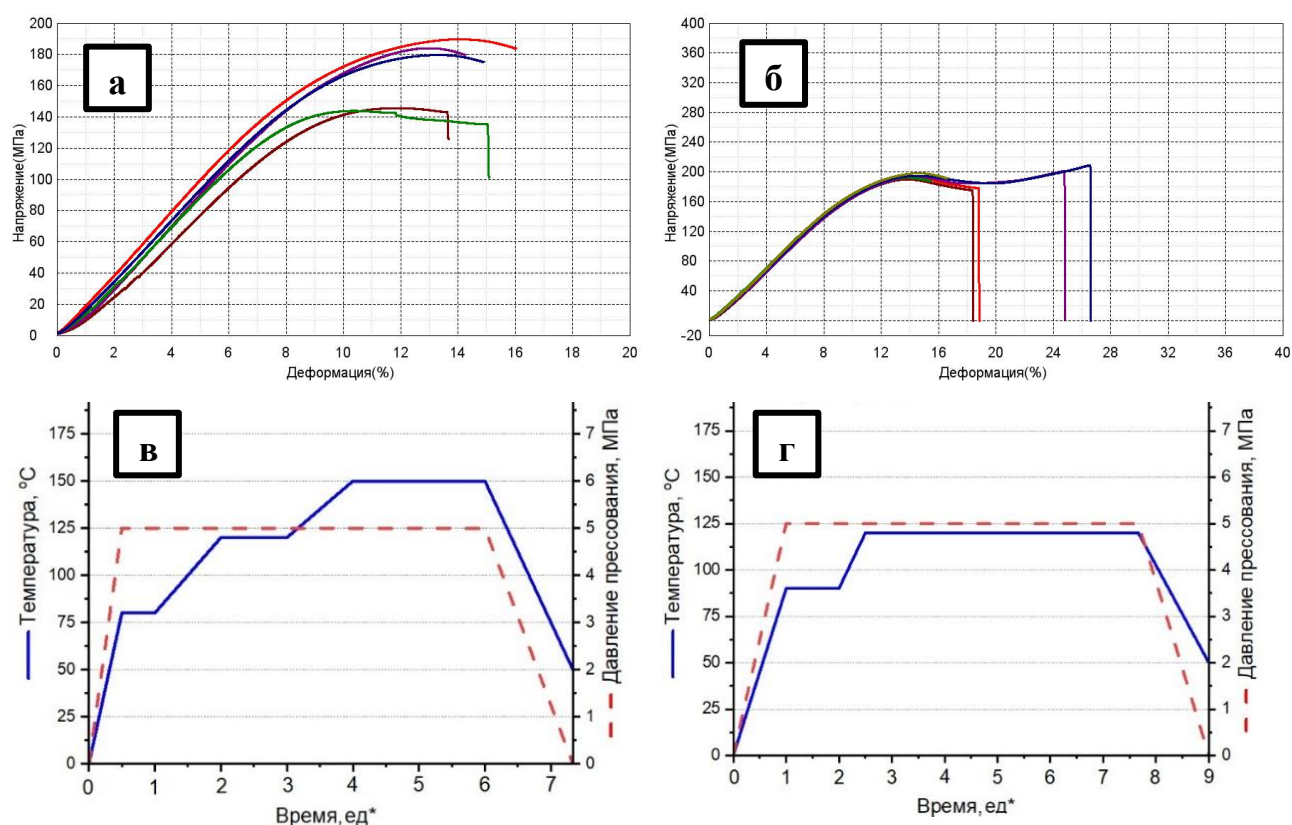


Рисунок 2.10 – Графики разрушающих испытаний: а) образцы из ЭТ-2, б) образцы из ЭТ-4;
Графики отверждения: в) ЭТ-2, г) ЭТ-4

2.4 Методика исследования структуры ПКМ

Для исследования области трения образцов из гибридных антифрикционных ПКМ использовался рентгеноспектральный микроанализ на растровом электронном микроскопе (РЭМ):

Методика основана на применении растрового двухлучевого электронного микроскопа Tescan Vega (рис.2.11) для определения элементного состава структурных компонентов материалов. Анализ осуществляется посредством

обработки изображений и рентгеновских спектров, полученных с образцов. Микроструктурные особенности могут включать отдельные частицы, агломераты, структурные фазы (слои, включения, кристаллиты с различной кристаллографической ориентацией, области с отклонениями в составе от основной матрицы), которые выявляются посредством специфической подготовки поверхности или детекции аналитических сигналов. Высокая пространственная разрешающая способность метода обеспечивает возможность исследования распределения элементов в переходных зонах с градиентным изменением состава (диффузионные пары, границы сплавления, диффузионные покрытия). Визуализация элементного распределения достигается за счет модуляции интенсивности сигнала в зависимости от интенсивности характеристического рентгеновского излучения элемента, отражая его концентрацию в сканируемой области.

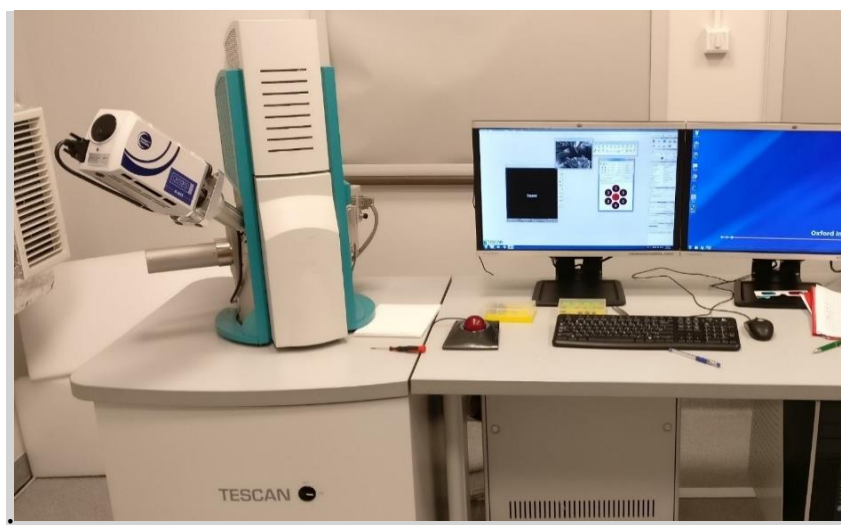


Рисунок 2.11 – Внешний вид растрового электронного микроскопа Tescan Vega

Методология базируется на возбуждении и регистрации спектра характеристического рентгеновского излучения образца при бомбардировке ускоренными электронами (энергетический диапазон 1-30 кэВ). Локализация анализа обеспечивается фокусировкой электронного пучка посредством электронно-оптической системы микроскопа, интегрированной с энергодисперсионным рентгеновским спектрометром. Качественный состав образца определяется наблюдаемым набором характеристических рентгеновских

линий, а количественная оценка выполняется по измерению интенсивности линий, пропорциональной массовой доле элемента в облучаемой области. Использование РСМ позволяет одновременно визуализировать структуру объекта, определять взаимное расположение структурных составляющих и осуществлять целенаправленный выбор областей для анализа. Детекция вторично- и обратнорассеянных электронов используется для формирования изображения.

Энергодисперсионный рентгеновский спектрометр функционирует на основе измерения амплитуды электрического импульса, возникающего при взаимодействии рентгеновского кванта с полупроводниковым детектором. Энергия кванта преобразуется в электронно-дырочные пары, которые мигрируют под действием электрического поля, формируя импульс, пропорциональный энергии кванта. Последующая обработка и измерение амплитуды импульса производятся специализированной электронной схемой. "Мертвое время" детектора, связанное с процессом обработки импульса, учитывается при расчете "живого времени" накопления данных. Накопление рентгеновского спектра происходит путем увеличения количества импульсов в спектральных ячейках, соответствующих энергии рентгеновского кванта.

Рентгеноспектральный микроанализ позволяет определять все элементы периодической таблицы, за исключением водорода и гелия. Ограничения в регистрации легких элементов связаны с поглощением их характеристического рентгеновского излучения в окне спектрометра.

Для количественного анализа состава выбранной области используют метод определения относительной интенсивности $I_{\text{отн}}$ рентгеновской линии соответствующего элемента:

$$I_{\text{отн}} = \frac{I_p - I_b}{I_{ps} - I_{bs}} \quad (2.4.1)$$

где. I_p – измеренное значение интенсивности линии данного элемента, I_{ps} – значение интенсивности линии данного элемента на эталоне известного состава,

I_b и I_{bs} - интенсивность фона на образце и эталоне. Для большинства металлических элементов наиболее часто используются эталоны с 100% содержанием исследуемого элемента.

Массовую долю определяемого элемента $C_{эл}$ определяют по относительной интенсивности выбранной рентгеновской линии путем введения поправок на различие в рассеянии электронов, поглощении рентгеновского излучения данной линии, вторичной флуоресценции в образце и эталоне (метод ZAF-поправок):

$$C_{эл} = I_{отн} \frac{Z_{эл} A_{эл} F_{эл}}{Z_s A_s F_s} \quad (2.4.2)$$

где $I_{отн}$ – измеренная интенсивность рентгеновской линии, $Z_{эл} A_{эл} F_{эл}$ и $Z_s A_s F_s$ поправочные коэффициенты на различие в рассеянии электронов, поглощении рентгеновского излучения данной линии, вторичной флуоресценции в образце и эталоне. Для эталонов с 100% содержанием исследуемого элемента $Z_s A_s F_s$ равны единице. Существует несколько моделей расчета поправок, основанных на различных методах расчета параметров, описывающих рассеяние электронов в твердом теле. Расчет поправочных коэффициентов заложен в программе обработки результатов. Поскольку значения поправочных зависят от состава, расчет $C_{эл}$ производится методом итераций. На первой итерации значения коэффициентов $Z_{эл} A_{эл} F_{эл}$ приравниваются единице, затем производится расчет значений коэффициентов $Z_{эл} A_{эл} F_{эл}$ для состава полученного при первой итерации и т.д. Как правило, при расчете $C_{эл}$ выполняется 5-6 итераций.

Программное обеспечение системы вычисляет интегральную интенсивность аналитической линии элемента с учетом фона. Для определения относительной интенсивности используется встроенная библиотека прецизионно измеренных интенсивностей эталонов, а расчет поправок осуществляется итерационным методом.

2.5 Методика исследования триботехнических характеристик гибридных ПКМ

Для проведения триботехнических испытаний использовалась серийная машина трения модели ИИ 5018 производства завода «Точприбор» (рисунок 2.12), имеющая следующие основные характеристики:

- Рабочий диапазон регистрации и записи момента трения 0,05 – 20 Нм
- Число оборотов контртела (ролика) 15 -1500 мин⁻¹
- Максимальная нормальная нагрузка на узел трения 5000 Н
- Диапазон измерения и записи температур образца 0 – 800°C
- Габаритные размеры машины 400х700х1300мм
- Масса машины 500 кг

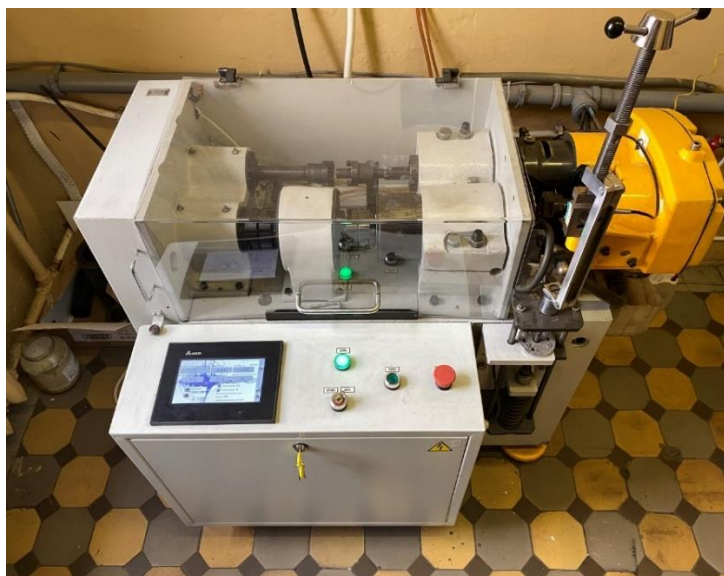


Рисунок 2.12 – Внешний вид машины трения модели ИИ 5018

Методика экспрессных комплексных триботехнических испытаний антифрикционных полимерных материалов (АПМ), разработанная в ИМП РАН (лаборатория д. ф-м. н. проф. Б.М. Гинзбурга), адаптирована для оценки коэффициента трения и интенсивности изнашивания в диапазоне температур 20-160 °С. Методика позволяет определять трибологические характеристики АПМ при трении скольжения по металлу в различных условиях нагружения, смазки и типах трибоконтакта [71,72].

Экспериментальная установка включает в себя образец АПМ в виде пластины прямоугольного сечения, закрепленный на подъемной каретке и контртело в виде вращающегося металлического ролика. Предусмотрена возможность реализации различных режимов смазывания (сухое трение, капельное смазывание, смазывание с использованием ванны с жидкой смазкой). Термостатирование рабочей среды обеспечивается циркуляцией горячего воздуха, с мониторингом температуры датчиками, расположенными в камере и на образце.

Параметры ролика (материал, обработка поверхности, шероховатость, частота вращения) выбираются с целью имитации реальных условий эксплуатации. Конструкция узла трения позволяет проводить промежуточные измерения износа образца с последующим восстановлением трибоконтакта.

Испытания проводятся методом ступенчатого нагружения трибоконтактов. Давление в трибоконтакте пропорционально приложенной нагрузке. Экспериментальные данные используются для построения зависимостей коэффициента трения и линейной интенсивности изнашивания от давления в трибоконтакте при установившемся режиме работы и сравнительно низких скоростях изнашивания [71,73].

Нагружение трибоконтактов осуществляется последовательно увеличивающимися ступенчатыми нагрузками без промежуточных остановок, с регистрацией моментов трения и температуры образца и смазочной жидкости. По результатам измерений определяются коэффициент трения и работа сил трения для каждой ступени нагрузки. В конце испытаний измеряются параметры канавки износа (ширина, длина, глубина) для расчета площади трибоконтакта, объемного износа и суммарных изменений глубины и объемного износа за весь период испытаний. На рисунке 2.13 представлена схема и модель узла трения машины ИИ5018.

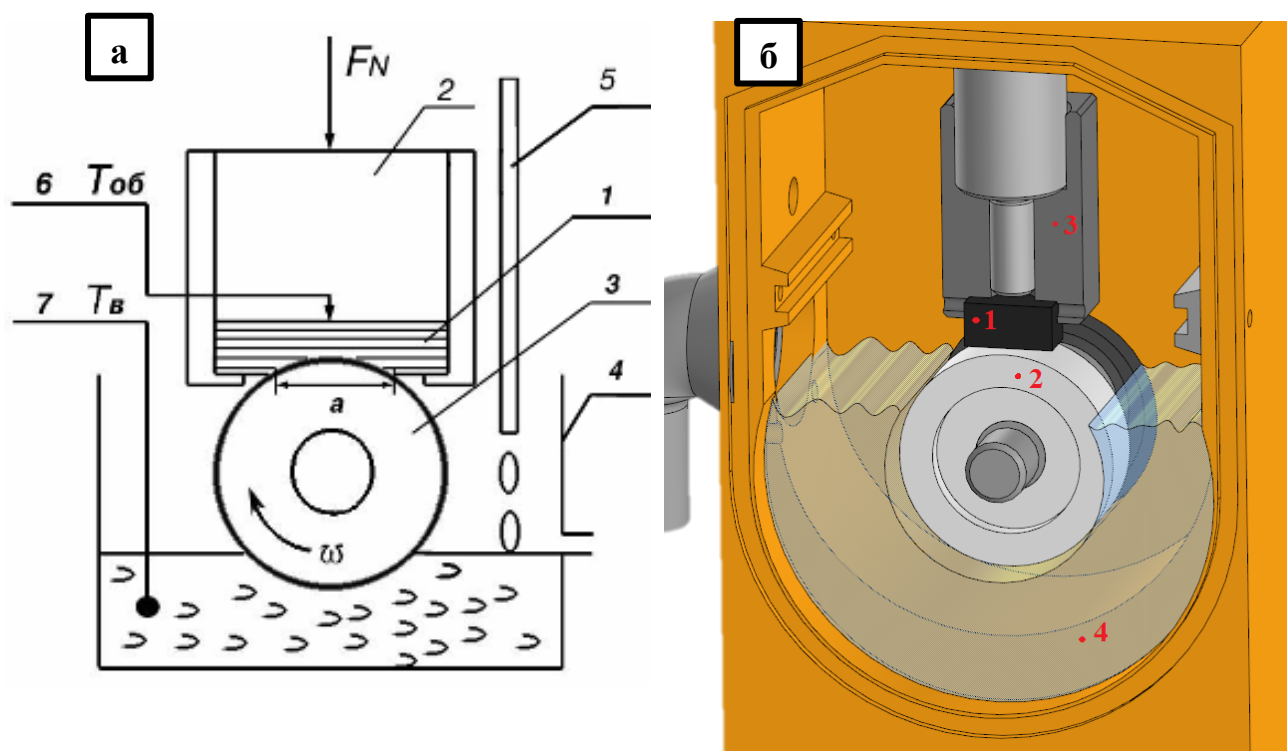


Рисунок 2.13 – а) Схема узла трения с водяной ванной: 1 – образец антифрикционного ПКМ; 2 – держатель образца; 3 – вращающийся стальной ролик; 4 – водяная ванна; 5 – устройство подачи воды; 6 – термопара для измерения температуры образца; 7 - термопара для измерения температуры воды

б) Модель узла трения: 1 – образец антифрикционного ПКМ; 2 – вращающийся ролик (контртело); 3 – держатель образца; 4 – вода (смазка)

В качестве основных показателей, характеризующих интенсивность протекания процессов при трении и изнашивании для выбранных условий испытаний приняты [71]:

$A_{тр}$ – работа сил трения (энергопотери при трении);

V – объемный износ;

f_c – средний за испытание коэффициент трения;

I_h – линейная интенсивность изнашивания;

I_v – энергетическая интенсивность изнашивания;

P_{pm} – максимальное допустимое рабочее давление в трибоконтакте;

T_k – температура разогрева трибоконтакта.

Во время испытаний на машине трения ИИ-5018 с точностью до 1 % непрерывно регистрируется и записывается момент трения – M_i и нагрузка F_N . По усредненным за время испытаний t при данной нагрузке F_N значениям момента трения M_{cp} по формуле (2.1) определяются средний коэффициент трения и по формуле (2.2) работа сил трения:

$$f_c = \frac{M_{cp}}{0.5DF_N} ; \quad (2.1)$$

$$A_{mp} = f_{mp} F_N v t, \quad (2.2)$$

где v – скорость относительного скольжения в трибоконтакте: $v = \pi D \omega$.

После испытания поднимают каретку машины трения и с помощью измерительного микроскопа определяют ширину a и длину l канавки износа, по значениям которых по формуле (2.3) рассчитывают номинальную площадь трибоконтакта, а номинальные контактные давления определялись, как начальное по формуле (2.4), так и конечное по формуле (2.5):

$$S = al, \quad (2.3)$$

$$P_n = F_N / S_n, \quad (2.4)$$

$$P_k = F_N / S. \quad (2.5)$$

Глубину h и объемный износ V_w канавки, образовавшейся в результате изнашивания, определяется по соотношениям (2.6) и (2.7), полагая, что h / D менее 1. Из этого по формуле (2.8) рассчитывается величина линейной интенсивности изнашивания и по формуле (2.9) величина энергетической интенсивности изнашивания.

$$h = a^2 / 4D, \quad (2.6)$$

$$V = (2/3) h S_k. \quad (2.7)$$

Значения V и h используются для расчета линейных интенсивностей изнашивания I_h и энергетической интенсивности изнашивания I_v .

$$I_h = \Delta h / L, \quad (2.8)$$

$$I_v = \Delta V / A_{mp}, \quad (2.9)$$

где Δh и ΔV – увеличение глубины и объема канавки износа при испытаниях с нагрузкой F_N за время испытания t .

Путь трения вычисляется выражением (2.10), как:

$$L = v t. \quad (2.10)$$

Энергетическая интенсивность изнашивания $I_v = \Delta V / A_{mp}$, мм³/Дж показывает, какой объем изношенного материала приходится на 1 Нм (Джоуль) работы силы трения A_{mp} и может рассматриваться как комплексный показатель соотношения противоизносных и антифрикционных свойств материала.

Малая величина этого показателя наблюдается при сочетании в материале достаточно низких интенсивности изнашивания I_h и коэффициента трения f_c и положительно характеризует свойства этого материала.

Снижение величины I_v при изменении состава, технологии получения или условий работы возможно в следующих случаях:

1. при одновременном снижении износов и энергопотерь на трение;
2. при более интенсивном увеличении энергопотерь, чем износа;
3. при более интенсивном снижении износов, чем увеличение энергопотерь на трение.

Увеличение значений I_v наблюдается при более интенсивном увеличении износов, чем энергопотерь на трение.

Величина I_v определяется свойствами материала и условиями изнашивания. При увеличении нагрузок и давлений I_v существенно изменяется в процессе

приработки материала, и сравнительно мало в условиях приработанных трибоконтактов.

Исследования триботехнических показателей АПМ начинаются с проведения предварительных испытаний, в процессе которых определяются максимально допустимые нагрузки на образец F_{NM} , при которых сохраняются рабочие свойства материала (трение без задира и резких увеличений износов и энергопотерь на трение) при заданных скоростях скольжения и условий смазывания.

Эти предварительные испытания осуществляются при последовательном ступенчатом увеличении нагрузки до значений F_{NM} по выражению (2.11):

$$F_{NM}/n, \quad (2.11)$$

где n - выбираемое число ступеней, равное $n = 5 - 10$.

После определения значений F_{NM} и возможных диапазонов нагрузочных режимов для принятых условий смазывания и скоростей скольжения производится комплекс триботехнических испытаний по различным схемам, отличающимися вариантами начального трибоконтакта и порядком нагружения.

Испытания по схеме 1 проводятся при ступенчатом нагружении одного трибоконтакта последовательно увеличивающимися нагрузками F_N до значений F_{NM} . Применительно к условиям трения таких АПМ как углепластики по стали, ступени нагружения составляют от 100 Н до 200 Н, а диапазон нагружения от 100 Н до 1000 Н - при трении без смазывания и от 100 Н до 1600 Н при смазывании водой.

По схеме 1 начальный трибоконтакт между контртелами цилиндр - плоскость осуществляется по линии вдоль образующей цилиндрической поверхности ролика при нормальной нагрузке $F_N = 100$ Н (для углепластиков). Выработанная при первой ступени нагружения канавка износа используется для дальнейших испытаний по схеме 1. При последующем ступенчатом повышении нагрузки размеры канавки износа увеличиваются. Площадь канавки износа,

определенная в конце испытания при данной нагрузке S_k , рассматривается как площадь начального трибоконтакта S_n для последующей ступени нагружения.

Таким образом, испытания по схеме 1 проводятся при ступенчатом нагружении трибоконтактов различной площади. При этом происходит приработка трибоконтактов, сопровождающаяся повышенными скоростями изнашивания.

При испытаниях по схеме 1 определяются зависимости от нагрузки F_N общих энергопотерь на трение $\Sigma A_{тр}$ нарастающих объемных износов ΣV_w , коэффициентов трения f_c , энергетических интенсивностей изнашивания I_v .

Испытания при последовательном нагружении и изнашивании одного трибоконтакта по схеме 1 позволяют также оценить величины допустимых максимальных рабочих давлений P_{pm} для принятых условий смазывания и скоростей скольжения.

При определении величины P_{pm} , использовалась методика, основанная на испытаниях по схеме 1 и связанная с получением зависимостей давлений в трибоконтакте в конце ступени нагружения P_k от величины возрастающей нагрузки F_N .

При последовательном ступенчатом нагружении узла трения после возрастания до определенной величины F_N^n , давление в трибоконтакте в конце ступени ($P_k^n = F_N^n / S_k^n$) стабилизируется на определенном уровне и не возрастает (и даже может несколько уменьшаться) при дальнейшем повышении нагрузки до ($F_N^n + \Delta F$), т.к. при этом также пропорционально возрастает площадь трибоконтакта ($S_k^n + \Delta S$), в результате чего по формуле (2.12) P_k^n :

$$P_k^n = \frac{F_N^n}{S_k^n} \approx \frac{F_N^n + \Delta F}{S_k^n + \Delta S}. \quad (2.12)$$

Величина P_k^n зависит от прочностных и противоизносных свойств материала допустимого рабочего давления в трибоконтакте для принятых условий смазывания.

Испытания по схеме 2 проводились путем ступенчатого нагружения трибоконтактов максимальной площади, ранее полученных при испытаниях по схеме 1. При этих испытаниях площади трибоконтактов меняются незначительно, в связи с чем давления в трибоконтакте P_n пропорциональны нагрузке F_N и влияние нагрузки и давления на триботехнические показатели практически одинаковы. Полученные при испытаниях по схеме 2 экспериментальные данные используются для получения зависимостей коэффициентов трения f_c и линейных интенсивностей изнашивания I_h от давления в трибоконтактах P_n в условиях достаточно приработанных трибоконтактов и сравнительно низких скоростей изнашивания, характерных для испытаний по схеме 2.

С целью исключения влияния на указанные показатели эффектов от остановок и последующих пусков, нагружение трибоконтактов при испытаниях по схеме 2 производится выбранными последовательно увеличивающимися ступенчатыми нагрузками F_{Ni} до значений F_{NM} без промежуточных остановок с регистрацией лишь моментов трения M_{cp} , температур образцов $T_{об}$ и смазочной жидкости $T_{ж}$. По величинам M_{cp} для каждой ступени нагрузки определяются значения коэффициента трения f_c и работы сил трения A_{mpi} . В конце испытаний по схеме 2 после подъема каретки определяются значения ширины a_m и длины l_m канавки износа, по которым рассчитываются конечные значения площади трибоконтакта $S_{км}$, объемного износа ΣV_m и глубины износа канавки h_m , а также суммарные увеличения глубины канавки $\Sigma \Delta h_m$ и объемного износа $\Sigma \Delta V_m$ за весь период испытаний по схеме 2.

По результатам измерений момента трения рассчитываются также значения суммарных энергопотерь ΣA_{mpi} с начала испытаний, включая испытания на ступени с нагрузкой F_{Ni} и общая работа сил трения за весь период испытаний по схеме 2 – $\Sigma A_{тр.м.}$

Определение значений I_h и I_v для этой схемы испытаний производится исходя из предложения, что при нагружении приработанных трибоконтактов

значения I_v практически одинаковы и, следовательно, по формуле (2.13) и (2.14) выражение ΣV_i и соотношение с ΣV_m :

$$\Sigma V_i = I_v \cdot \Sigma A_{mpi}, \quad (2.13)$$

где I_v – энергетическая интенсивность изнашивания.

$$\frac{\Sigma V_i}{\Sigma V_m} = \frac{\Sigma A_{mpi}}{\Sigma A_{mpm}}, \quad (2.14)$$

где: ΣV_i и ΣA_{mpi} – суммарный объемный износ и суммарная работа сил трения после последовательного нагружения трибоконтакта на ступени с нагрузкой F_{Ni} ;

ΣV_m и ΣA_{mpm} – суммарные объемный износ и работа сил трения за весь период испытания по схеме 2 вычисляется по формуле 2.15:

$$\Sigma V_i = \Sigma V_{wm} \frac{\Sigma A_{mpi}}{\Sigma A_{mpm}}. \quad (2.15)$$

Полученные расчетные значения объемного износа ΣV_{wi} позволяют определить расчетную величину ширины канавки a_i после каждой ступени нагружения, учитывая значение ΣV_i в соответствии с формулой (2.16):

$$\Sigma V_i = (2/3)h_i S_{ki} = a^3 \cdot l_i / 6D, \quad (2.16)$$

где: a_i , l_i , h_i и S_{ki} – соответственно ширина, длина, глубина и площадь канавки после работы на ступени F_{Ni} .

При испытаниях по схеме 2 значение длины канавки l_i , как правило, не меняется и остается равной длине l , полученным в конце испытаний по схеме 1 и обычно мало отличающейся от ширины образца.

Отсюда величины a_i и h_i могут быть определены из соотношения (2.17) и (2.18):

$$a_i = \left(\Sigma V_m \frac{\Sigma A_{Tpi}}{\Sigma A_{Tpm}} \cdot \frac{6D}{l_i} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (2.17)$$

$$h_i = (a_i)^2 / 4D. \quad (2.18)$$

Глубина изнашивания Δh_i и объемный износ ΔV_i на каждой ступени нагрузки равны разности значений h_i и $h_{(i-1)}$ и V_i и V_{i-1} в соответствии с формулами (2.19), (2.20):

$$\Delta h_i = h_i - h_{(i-1)}, \quad (2.19)$$

$$\Delta V_i = \Sigma V_i - \Sigma V_{(i-1)}. \quad (2.20)$$

Отсюда значения P_n , I_h и I_v при испытаниях по схеме 2 определяются по формулам (2.21), (2.22) и (2.23).

$$P_n = \frac{F_{Ni}}{S_{\kappa(i-1)}}, \quad (2.21)$$

$$I_h = \frac{\Delta h_i}{L}, \quad (2.22)$$

$$I_v = \frac{\Delta V_i}{A_{TPi}}, \quad (2.23)$$

Для испытаний использовались образцы размерами (В, Д, Ш) 20×10×10 мм в количестве 5 штук на каждый вид материала.

При проведении триботехнических испытаний антифрикционных полимерных материалов (АПМ) по схеме 2 в условиях сухого трения, параметры временной экспозиции (длительность работы на каждой ступени нагрузки и общая продолжительность испытаний) оптимизируются с учетом теплового режима трибоконтакта. Данная оптимизация направлена на предотвращение термического перегрева и, как следствие, деградации материалов.

Предложенная методика обеспечивает сбор достаточного объема экспериментальных данных для определения трибологических характеристик в рамках экспресс-тестирования. Длительность каждого отдельного испытания регламентирована и составляет 10 минут. Для каждого варианта условий испытаний выполняется от 3 до 5 повторений, количество которых определяется разбросом экспериментальных данных. Значения трибологических параметров (коэффициент трения, объемный износ, линейная и энергетическая интенсивности изнашивания) рассчитываются как среднеарифметические величины по всем повторениям для каждого варианта. При этом, статистическая

значимость полученных результатов оценивается на основе относительных среднеквадратических ошибок, которые не должны превышать 10% для коэффициентов трения и 15% для значений объемного износа, линейной и энергетической интенсивностей изнашивания. Таким образом, обеспечивается достоверность полученных трибологических характеристик.

Основные характеристики условий проведения испытаний по принятым схемам и получаемые при этих испытаниях зависимости триботехнических показателей от нагрузок F_{Ni} и контактных начальных давлений P_n приведены в таблице 2.3:

Таблица 2.3 – Характеристики условий проведения испытаний по принятым схемам

Схема испытаний	Условия проведения испытаний по схемам	Состояние и условия работы трибоконтакта	Зависимости параметров, получаемые при испытаниях по схеме
Схема 1	Последовательное ступенчатое нагружение образца с определением износа канавки после каждой ступени	Приработка трибоконтакта при ступенчатом нагружении возрастающей нагрузкой	$\Sigma A_{тр}, \Sigma V, f_c, P_k$ от F_{Ni}
Схема 2	Последовательное ступенчатое нагружение трибоконтакта, полученного по схеме 1 без промежуточных остановок с определением суммарных износов в конце испытания	Приработанный трибоконтакт, изнашивание в пределах рабочих давлений	I_h, I_v, f_c, T_k от P_n
Общие условия испытания			
Материал ролика		Сталь 20Х13	
Шероховатость ролика, Ra		Не более 0,08	
Линейная скорость скольжения, м/с		1,0	
Путь трения, км		11,0±0,5	
Направление вращения		Поперек слоев	
Температура среды, °С		20,0	
Вид смазки		Вода	
Нагрузка на образец		200 – 1800 Н	
Материал ролика		Сталь 20Х13	

2.6 Методика исследования прочностных свойств ПКМ

Определения физико-механических характеристик образцов гибридных антифрикционных ПКМ проводились на разрывной машине Shimadzu AG-50kNX (рисунок 2.14) в соответствии со следующими нормативными документами в условиях, установленных этими документами [75]:

- Разрушающее напряжение при сжатии по ГОСТ 23803-79;
- Изгибающее напряжение при разрушении по ГОСТ 4648-2014;.
- Разрушающее напряжение при межслойном сдвиге ГОСТ 23804-79;
- Определение плотности проводилось по ГОСТ 15139-69.



Рисунок 2.14 – Внешний вид испытательной машины Shimadzu AG-50kNX

Размеры образцов по каждому виду испытаний устанавливаются соответствующим стандартом или методикой испытаний. Количество образцов для испытаний составило не менее 5 штук для корректной статистической обработки результатов испытаний.

Условия проведения испытаний устанавливаются указанными стандартами и методиками испытаний.

Температура и влажность в помещениях во время поведения испытаний соответствовала требованиям ГОСТ 23801.

Используемые при испытаниях оборудование и средства измерения, соответствуют требованиям ГОСТ, упомянутым выше, и имеют действующие свидетельства о государственной поверке.

Результаты испытаний обрабатывались по следующим показателям:

- соблюдение методики испытаний,
- состояние образцов до начала испытаний и их соответствие технической документации, наличие отступлений, обоснование их допустимости,
- вид и характер разрушения деталей,
- достаточность проведенных испытаний.

Результаты по каждому виду испытаний оформлялись в виде протоколов и отчета, содержащего оценку проведенных испытаний.

2.7 Методики исследования физических свойств ПКМ

Измерение удельного объемного и поверхностного сопротивления на постоянном токе при комнатной температуре

Определение удельного объемного и поверхностного электрического сопротивления проводилось согласно стандарту ГОСТ Р 50499-93 "Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения удельного объемного и поверхностного сопротивления" с использованием трехэлектродной схемы. Измерения осуществлялись в температурном диапазоне от 20 до 200°C при величине испытательного напряжения 100 В [76].

В качестве образцов применялись плоские пластины стеклопластика размерами 100 × 100 мм. Электрические контакты формировались посредством нанесения электродов из алюминиевой фольги толщиной 8 мкм с использованием вазелиновой адгезионной прослойки. Для обеспечения оптимального контакта электроды (вырезанные из фольги) предварительно покрывались тонким слоем технического вазелина перед притиранием к поверхности образца. Геометрические параметры электродной системы соответствовали следующим

значениям: диаметр измерительного электрода ($50 \pm 0,2$) мм; диаметр высоковольтного электрода 75 мм; ширина охранного электрода 6 мм; величина зазора между измерительным и охранным электродами ($2 \pm 0,2$) мм. Перед проведением измерений электрического сопротивления образцы выдерживались при каждой фиксированной температуре в течение 10 минут для достижения термического равновесия. Количество образцов соответствовало требованиям, установленным в используемом стандарте.

Применялся метод вольтметра-амперметра, основанный на измерении величины электрического тока, протекающего через образец при приложении к нему постоянного электрического напряжения. При измерении удельного объемного сопротивления постоянное напряжение от источника напряжения (ИН) подавалось на высоковольтный электрод (ВЭ) (рисунок 2.15). Ток проходил через диэлектрический объем образца на измерительный электрод (ИЭ) или по поверхности образца на охранный электрод (ОЭ), который, в свою очередь, заземлялся, исключая влияние поверхностных токов на показания, снимаемые с измерительного электрода. Ток с измерительного электрода регистрировался измерителем тока (ИПТ) и затем заземлялся.

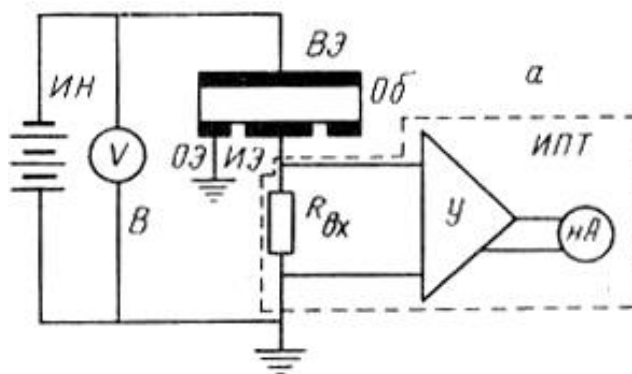


Рисунок 2.15 – Схема установки для определения ρ_v по трехэлектродной схеме:

ИН - источник постоянного напряжения, В-вольтметр; ИПТ- измеритель постоянного тока;
 $R_{вх}$ – входное сопротивление ИПТ; У – усилитель; ИА – индикатор; Об – образец с электродами (ИЭ измерительный, ВЭ – высоковольтный, ОЭ – охранный).

Удельное объемное сопротивление рассчитывалось по формуле:

$$\rho_v = \frac{US}{IL} \quad (2.24)$$

где (U – напряжение; I – ток; L – толщина образца; S – эффективная площадь электродной системы, равная:

$$S = \left[(D_1 + D_2) / 2 \right]^2 (\pi/4) \quad (2.25)$$

D_1 – диаметр измерительного электрода; D_2 – внутренний диаметр охранного кольца.

При измерении удельного поверхностного сопротивления напряжение подается на охранный электрод ОЭ, а электрод ВЭ заземляется. Ток, проходящий через толщу образца на ВЭ, отводится в землю, а ток, идущий по поверхности между кольцевым электродом ОК и измерительным электродом ИЭ по поверхности образца, измеряется (рисунок 2.16).

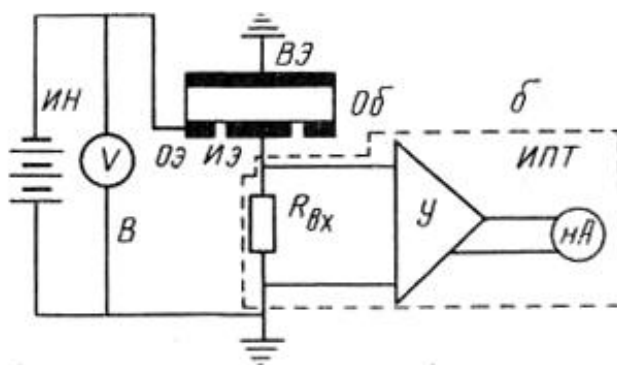


Рисунок 2.16 – Схема установки для определения ρ_s по трехэлектродной схеме.

Удельное поверхностное сопротивление рассчитывалось по формуле:

$$\rho_s = \frac{2\pi}{\ln\left(D_2/D_1\right)} \frac{U}{I} \quad (2.26)$$

В качестве измерителя электрического сопротивления использовался прибор «High Resistance Meter Agilent 4339В» с лабораторным термостатом (2.17). Прибор измеряет удельное электрическое сопротивление в диапазоне измерений от $1 \cdot 10^3$ до $1,6 \cdot 10^{16}$ Ом, при этом погрешность измерения составляет $\pm 0,6\%$



Рисунок 2.17 – Внешний вид прибора Agilent 4339B с лабораторным термостатом

Исследование водостойкости образцов ПКМ

Водостойкость определяется как способность полимерных материалов сохранять функциональные свойства при длительном воздействии водной среды. Процесс водопоглощения приводит к изменению массы ПКМ [77]. Оценка водостойкости осуществляется посредством определения степени набухания, количественной оценки водопоглощения, расчета диффузионных параметров, либо путем анализа изменений механических и иных характеристик материала под воздействием воды.

Традиционно, водостойкость ПКМ характеризуется величиной водопоглощения – количеством воды, абсорбированным материалом в течение 24 часов при температуре 18 – 22°C. Водопоглощение, как правило, выражается в процентах от исходной массы образца.

При продолжительной экспозиции материала в водной среде водопоглощение достигает состояния насыщения. Величина равновесного водопоглощения является ключевым параметром, определяющим устойчивость материалов к воздействию воды при длительной эксплуатации изделий. Равновесное водопоглощение является функцией температуры воды и гидростатического давления.

Водостойкость ПКМ определяется рядом факторов, включая природу полимерной матрицы, структуру материала, состав наполнителей, степень

отверждения, технологические аспекты переработки, геометрию изделия и его пористость.

Определение водопоглощения и изменения линейных размеров в результате водопоглощения опытных образцов гибридных ПКМ

Для исследования водопоглощения образцы ПКМ помещались в емкость с дистиллированной водой и выдерживались в течение заданного периода времени при контролируемой температуре. Параметры экспозиции (длительность выдержки, температура) были определены в соответствии с ГОСТ 12020-2018. В качестве испытательной среды использовалась дистиллированная вода при температуре 23°C. Оценка сорбционного поведения материала проводилась путем гравиметрического анализа – определения изменения массы образцов до и после выдержки в водной среде.

Для проведения испытаний образцы были вырезаны из плит на высокоточном отрезном станке Brilliant, геометрические размеры образцов (L, H, S мм) составляли 50 x 50 x 5 мм.

Перед первым измерением массы сухих образцов проводилось кондиционирование при температуре 30°C в течение 1 часа для удаления остаточной влаги. Затем образцы были погружены в пресную воду. Измерения массы проводились периодически, через 24 и 168 часов экспозиции в воде.

Из полученных значений величина водопоглощения получается следующим образом:

$$W = \left(\frac{m_1 - m_0}{m_0} \right) \cdot 100\%, \quad (2.27)$$

где m_0 – масса образца до испытания, г; m_1 – масса образца после испытания, г; W – водопоглощение образца, %.

Измерения массы образцов проводились на электронных весах CAS CAUW 220D. Внешний весов показан на рисунке 2.18.

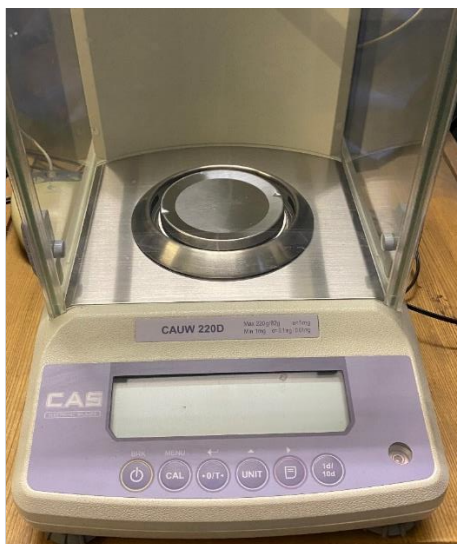


Рисунок 2.18 – Электронные весы CAS CAUW 220D

Изменение массы образцов может говорить об изменении линейных размеров в результате набухания. Изменение линейных размеров в результате водопоглощения и коэффициент набухания определяется по ГОСТ 12020-2018. Используются образцы для определения водопоглощения.

Габаритные размеры образцов измерялись микрометром МК50-1 и/или штангенциркулем ШЦК-І-300-0,02 по ГОСТ 6507-90. На образцах наносятся 4 метки для определения толщины и по 2 метки на каждую грань, для определения длины/ширины.

Интервал измерений – 24 и 168 ч.

Расчет изменения линейных размеров в результате водопоглощения в процентах производится по формуле:

$$Q = \left(\frac{x_1 - x_0}{x_0} \right) * 100\%, \quad (2.28)$$

Коэффициент набухания рассчитывается аналогично, используя значения объемов образцов.

2.8. Исследования жизнеспособности препрега гибридного антифрикционного ПКМ

Для исследования жизнеспособности препрега (время в течение которого препрег на основе термореактивной матрицы можно использовать для

изготовления ПКМ) гибридного антифрикционного ПКМ применялись методы определения растворимой части связующего и метод определения содержания летучих веществ.

Определение растворимой части связующего.

Сущность метода заключается в подготовке образцов пресс-материала размерами 100 x 100 мм, взвешенных с точностью до 0,01 г. Далее образцы помещаются в емкость с ацетоном и выдерживаются при температуре $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ в течение 15 минут. Затем образцы вынимаются и сушатся в камере при температуре $(85 \pm 5)^\circ\text{C}$ в течение 10 минут. Далее высушенные образцы помещаются в эксикатор для охлаждения и взвешиваются до достижения постоянного веса с той же погрешностью. Для взвешивания применяются лабораторные аналитические весы SE224-C с точностью до 0,01 г. (рис 2.19).



Рисунок 2.19 – Аналитические весы SE224-C

Содержание растворимой части связующего C_p в процентах вычисляют по формуле (2.29). Результат вычисления округляется до первого знака после запятой:

$$C_p = \frac{a-b}{a \cdot 0,4} 100 \quad (2.29)$$

где: a – масса образца пресс-материала, г; b – масса остатка после растворения и высушивания, г.

Определение содержания летучих веществ.

Сущность метода заключается в подготовке образцов пресс-материала размерами 100 x 100 мм (или крупноизмельченного пресс-материала), которые помещаются в чистый, предварительно взвешенный бюкс. Взвешивание производится повторно, затем образцы выдерживаются в термошкафу при температуре $(85 \pm 5)^\circ\text{C}$ в течение 15 минут. После чего образцы охлаждают в эксикаторе и взвешивают повторно от 2 до 3 раз с погрешностью не более $\pm 0,01$ г. Содержание летучих ($C_{\text{л}}$) в процентах рассчитывают по формуле (2.30), а результат вычисления округляется до первого знака после запятой.

$$C_{\text{л}} = \frac{a-b}{a} 100, \quad (2.30)$$

где: a – масса образца пресс-материала, г; b – масса остатка после растворения высушивания, г.

Выводы по главе 2

1. Обоснован выбор марки и производителя армирующих волокон. Для изготовления гибридных армирующих тканей использованы отечественные нити: высокопрочные стеклянные волокна ВМПС8, обеспечивающие высокие прочностные и адгезионные свойства; органические волокна из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) марок ПЭ-1, ПЭ-2 и «С», а также арамидные нити СВМ-Н, полиоксадиазольная нить «Арселон», полиамидные нити и фторопластовая крученая нить Ф-4. Выбор обусловлен их диэлектрическими свойствами (таб. 2.4), низким коэффициентом трения, доступностью и наличием серийного производства в РФ.

Таблица 2.4 – Характеристики выбранных армирующих нитей для исследования

Материал нити	Марка нити	Линейная плотность, текс	Разрывная нагрузка, Н/текс	Удельное эл. сопротивление, Ом*м
Стекланная нить	ВМПС8	112	58	1×10^{12}
Арамидная нить (из ароматического полиамида)	СВМ-Н	58	1,8	7×10^{13}
	Пряжа СВМ	29	1,8	7×10^{13}
СВМПЭ (из сверх-высокомолекулярного полиэтилена)	ПЭ-1	48	2,8	1×10^{14}
	ПЭ-2	27	3,8	1×10^{14}
	С	180	4,2	1×10^{14}
Крученая нить из фторопласта	Ф-4	125	0,24	1×10^{17}
Полиамид	Нить полиамидная	47	0,76	1×10^{14}
Полиоксадиазольная нить	Арселон	58	0,32	1×10^{10}

2. Обосновано применение в работе саржевого вида плетения гибридных армирующих тканей, которое обеспечивает эластичность и повышенную плотность ткани. Выбрано 12 типов тканей с варьированием соотношения стеклянных, а также СВМ волокон по основе и органических волокон - по утку.

3. Выбраны полимерные матрицы ЭТ-2 и ЭТ-4 на базе хлорсодержащего эпоксидного олигомера ЭХД (марка «ХТ-711») с аминным отвердителем, в том числе отвердителем Этал-200Т, который позволяет осуществлять отверждение при температуре не выше 120 °С, исключая плавление СВМПЭ-волокон.

4. Приведены методики, применяемые для исследований структуры, физических, триботехнических и прочностных характеристик гибридных антифрикционных ПКМ. Для изучения структуры ПКМ выбран метод рентгеноспектрального микроанализа на растровом электронном микроскопе Tescan Vega с энергодисперсионным детектором. Для определения триботехнических характеристик (коэффициента трения, линейной интенсивности изнашивания) выбраны испытания на машине трения ИИ 5018 в условиях водяной смазки. Прочностные свойства (сжатие, изгиб, межслойный

сдвиг) предложено определять на универсальной разрывной машине Shimadzu AG-50kNX стандартными методами.

5. Выбранные методики позволяют комплексно оценить влияние состава и структуры гибридных антифрикционных ПКМ на их физико-механические и триботехнические свойства, а также прогнозировать их поведение в различных условиях эксплуатации, что является необходимым этапом для разработки материалов с заданными свойствами. Описанные методики будут использованы в последующих главах для анализа экспериментальных данных и выявления закономерностей, связывающих состав, структуру и свойства разработанных ПКМ.

ГЛАВА 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СОСТАВА АРМИРУЮЩЕЙ ТКАНИ НА ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГИБРИДНЫХ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПКМ

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 тяжело нагруженных узлах трения взамен антифрикционного углепластика УГЭТ, должны удовлетворять целому ряду требований (таблица 3.1): иметь высокую прочность, ударостойкость, износостойкость при трении, размерную стабильность при длительной эксплуатации в воде и при этом являться диэлектриком.

Таблица 3.1 – Характеристики углепластика УГЭТ из ТУ 5.966-11704-99

Характеристика	Показатель
Допустимая скорость скольжения, м/с	от 0,01 до 0,5
Допустимое контактное давление, МПа	≤ 60
Коэффициент трения	0,12
Интенсивность изнашивания, мкм/км	5
Разрушающее напряжение при сжатии, не менее МПа	250
Изгибающее напряжение при разрушении, не менее МПа	250
Разрушающее напряжение при межслойном сдвиге, не менее МПа	30
Водопоглощение за 24 ч, %	0,04
Изменение размеров в воде за 24 ч, %	0

Для исследования триботехнических характеристик и физико-механических свойств образцов гибридных антифрикционных ПКМ были проведены: триботехнические испытания по определению коэффициента трения и интенсивности изнашивания, механические испытания по определению разрушающего напряжения при сжатии, изгибе и межслойном сдвиге, испытания электроизоляционных свойств, исследование водопоглощения.

В соответствии с технологическими режимами, разработанными в 3 главе, были изготовлены образцы гибридных антифрикционных ПКМ в виде плит методом горячего прессования для проведения лабораторных испытаний. Для формирования плит листы препрега укладывали последовательно друг на друга, при этом направление волокон основы и утка в каждом слое ткани совпадали.

Лабораторные испытания гибридных антифрикционных ПКМ проводились в два этапа. На первом этапе испытаний происходило исследование зависимости триботехнических характеристик и физико-механических свойств материалов от состава и соотношения разных типов волокон в гибридной армирующей ткани (4 глава). Был выбран рациональный состав гибридной армирующей ткани для дальнейшего исследования и модификации.

На втором этапе лабораторных испытаний изучалось влияние активации поверхности органических волокон, входящих в состав гибридной армирующей ткани, и модификации эпоксидного связующего путем внедрения пластификатора на свойства выбранного гибридного антифрикционного ПКМ (5 глава).

Состав и плотность образцов гибридных антифрикционных ПКМ приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Состав и плотность образцов из гибридных антифрикционных ПКМ для первого этапа исследования.

№	Состав гибридной армирующей ткани		Соотношение Нить основы / нить утка	Плотность, кг/м ³
	Нити основы	Нити утка		
1	ВМПС8	СВМПЭ ПЭ-1	80/20%	1707±40
2		СВМПЭ ПЭ-1	60/40%	1515±37
3		СВМПЭ С	80/20%	1598±27
4		СВМПЭ ПЭ-2	80/20%	1687±32
5		Ф-4 нить	80/20%	1776±34
6		СВМ-Н	80/20%	1712±19
7		СВМ-Н	60/40%	1627±26
8		Арселон	80/20%	1747±41
9		Арселон	60/40%	1653±56
10	Пряжа СВМ	СВМПЭ ПЭ-1	60/40%	1166±28
11		Арселон	60/40%	1374±24
12		Полиамид	60/40%	1214±14

Плотность гибридных антифрикционных ПКМ больше, чем у углепластика УГЭТ из-за тяжёлых стеклянных волокон, но меньше чем у стеклопластика, из-за применения органических волокон в составе армирующей ткани. Как видно из таблицы 3.2 снижение количества стеклянных волокон с 80% до 60% в составе гибридной армирующей ткани в среднем на 10% снижает показатель плотности ПКМ.

3.1 Исследование триботехнических характеристик опытных образцов гибридных антифрикционных ПКМ

Для исследования зависимости коэффициента трения и величины линейного износа от приложенной нагрузки на образцы гибридных антифрикционных ПКМ, проведены триботехнические лабораторные испытания, условия которых совпадали с условием испытаний антифрикционного ПКМ марки УГЭТ. Условия испытаний приведены в главе 2.

В ходе проведения испытаний была принята компоновка узла трения, включающая закрепленный на подъемной каретке в специальном держателе образец в виде пластины прямоугольного сечения размерами 10x10x20 мм и контртело в виде вращающегося стального ролика диаметром $\varnothing = 50$ мм. Ролик частично погружается на 30 мм в ванну с водой. На рисунке 3.1 показана схема контакта исследуемого образца и ролика с отображёнными градиентами распределения максимальной рабочей нагрузки равной 1800Н.

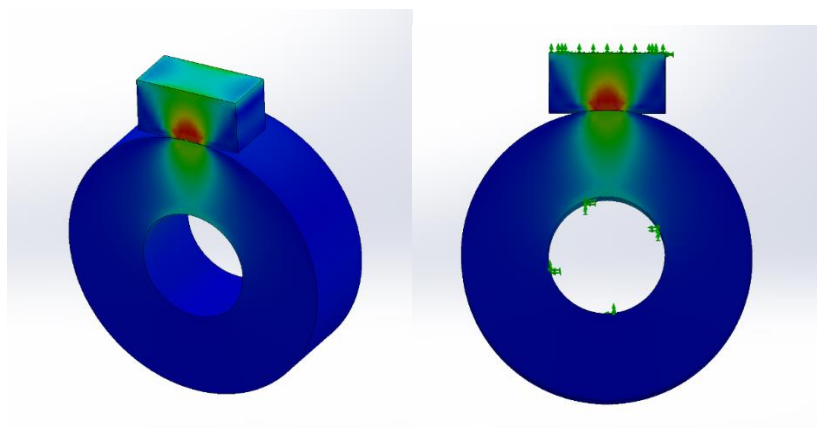


Рисунок 3.1– Схема распространения нагрузки между образцом ПКМ и роликом в ходе триботехнического испытания

На рисунке 3.2 приведены фотографии канавок износа гибридных антифрикционных ПКМ после испытаний, полученные с помощью измерительного комплекса на базе стереоскопического микроскопа МБС-10

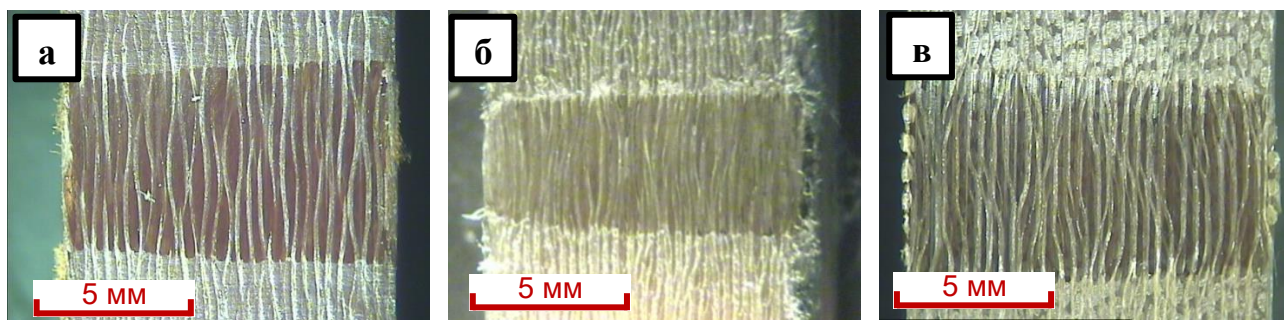


Рисунок 3.2 – Фотографии канавок износа гибридных ПКМ: а) ПКМ на основе ткани Арселон/Стекло́нные волокна; б) ПКМ на основе ткани СВМПЭ/Стекло́нные волокна; в) ПКМ на основе ткани СВМ/Стекло́нные волокна

Как известно, механизм трения антифрикционных ПКМ условно можно разделить на 2 этапа: трение антифрикционного ПКМ по металлу, вследствие чего происходит изнашивание полимерной матрицы и армирующих материалов, и

трение гибридного антифрикционного ПКМ по слою продуктов износа, состоящего из частиц органических волокон, обладающих низким коэффициентом трения. Данный слой равномерно распределяется по поверхности металлического контртела и снижает коэффициент трения [80, 81].

Результаты первого этапа лабораторных испытаний в виде диаграммы зависимости коэффициента трения и величины линейного износа от удельного давления приведены на рисунках 3.3 и 3.5.

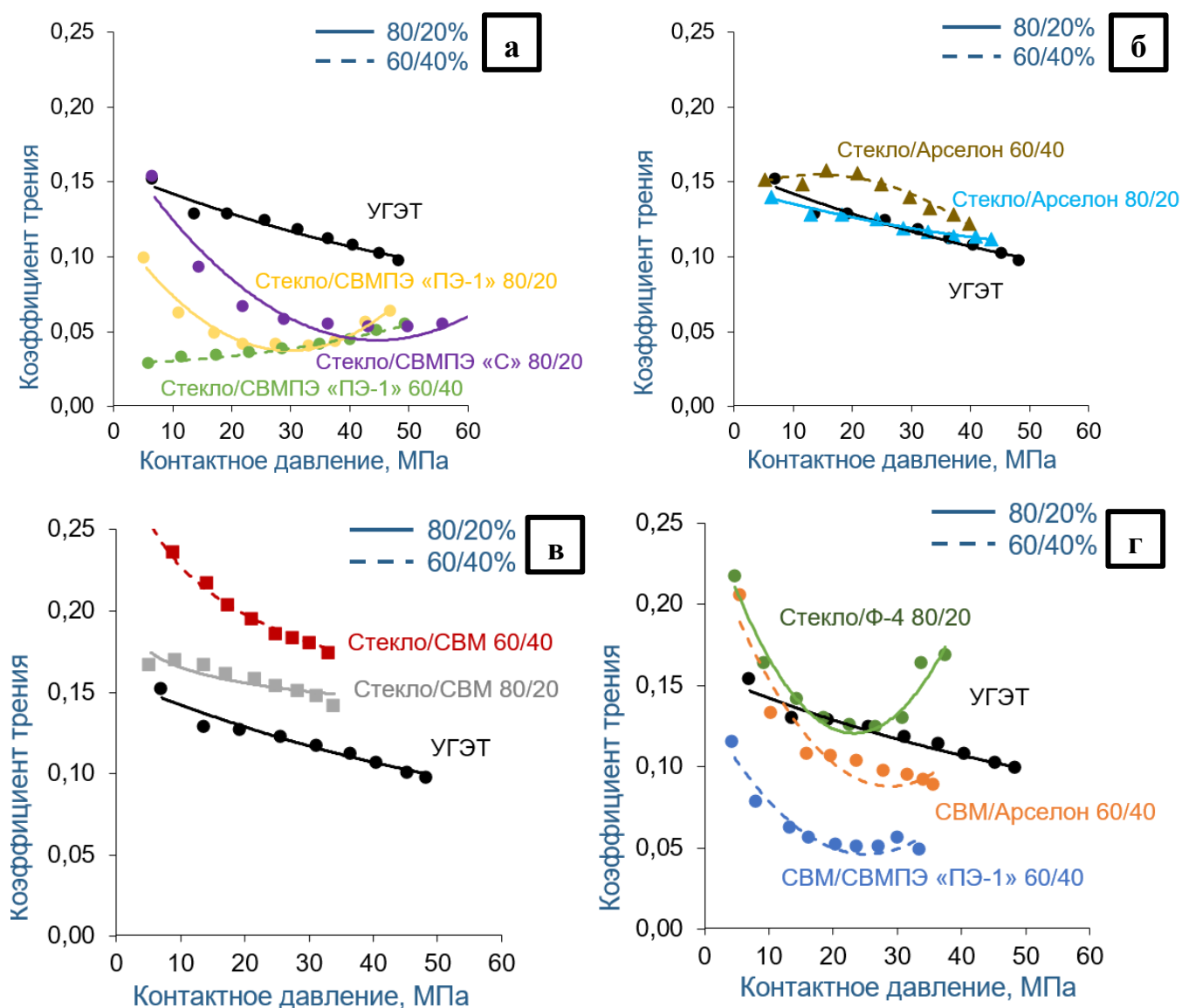


Рисунок 3.3 – Диаграммы зависимостей коэффициента трения гибридных антифрикционных ПКМ от контактного давления с различным составом армирующей ткани: а) стекло/СВМПЭ; б) стекло/Арселон; в) стекло/арамидная нить; г) ткань на основе пряжи СВМ.

Как можно наблюдать из графиков (рис. 3.3а), наименьшим коэффициентом трения по ролику из стали 20Х13 в условиях водяной смазки обладают гибридные антифрикционные ПКМ, в состав которых входят волокна СВМПЭ (образец №1: ВМПС8/СВМПЭ ПЭ-1(80/20), образец №2 ВМПС8/СВМПЭ ПЭ-1(60/40), образец № 3 ВМПС8/СВМПЭ С (80/20), образец №10 СВМ/СВМПЭ ПЭ-1 (60/40).

Данные образцы имеют более низкий коэффициент трения, чем у антифрикционного ПКМ марки УГЭТ. При нагрузке свыше 20 МПа коэффициент трения образцов, в состав которых входят волокна СВМПЭ, находится в диапазоне от 0,07 до 0,03. Коэффициенты трения остальных образцов превышают значения 0,09, а коэффициент трения образцов на основе стеклянных и арамидных волокон СВМ доходит до 0,20 (рис 3.3 в). Отмечается, что в процессе испытания данного образца произошёл абразивный износ стального ролика [82] На рисунке 3.4 представлены фотографии поверхности стальных роликов после испытаний.

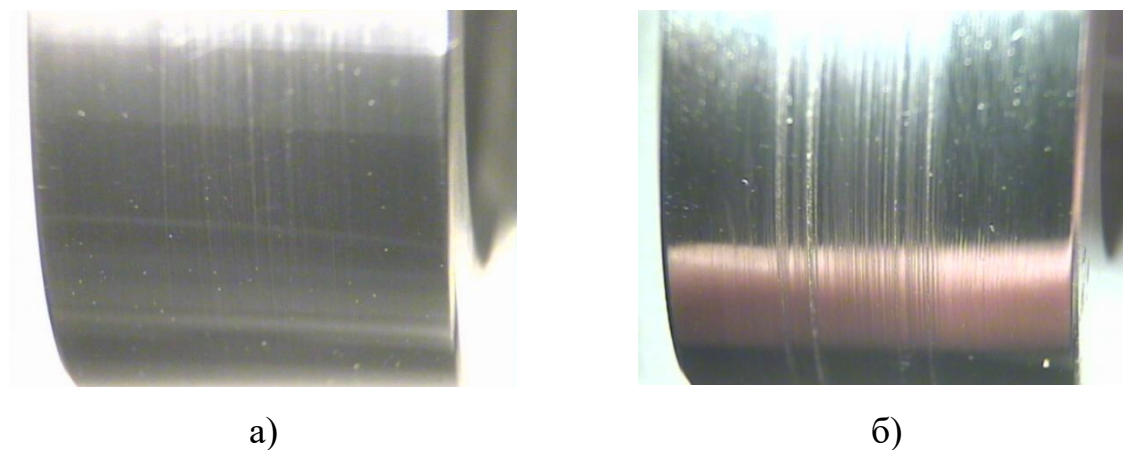


Рисунок 3.4 – Фотографии поверхности стальных роликов после испытаний: а) Ролик из стали 20Х13 после испытаний образца гибридного антифрикционного ПКМ, на основе стеклянных и СВМПЭ волокон; б) Ролик из стали 20Х13 после испытаний образца гибридного антифрикционного ПКМ, состоящего из стеклянных и арамидных волокон СВМ

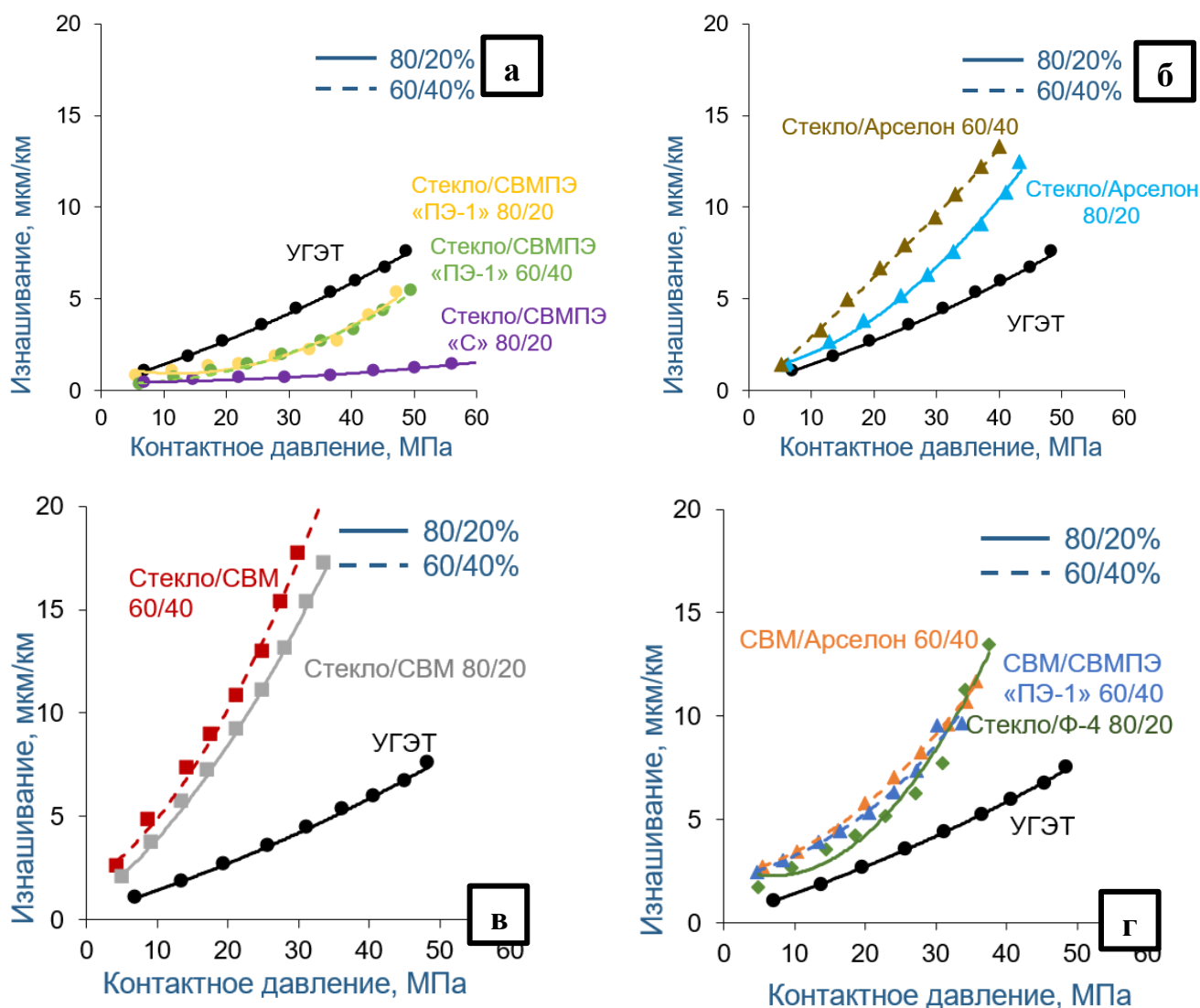


Рисунок 3.5 – Диаграммы зависимости интенсивности изнашивания образцов гибридных антифрикционных ПКМ от давления с различным составом армирующей ткани:
а) стекло/СВМПЭ; б) стекло/Арселон; в) стекло/арамидная нить; г) ткань на основе пряжи СВМ

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 №3 с волокнами СВМПЭ марки «С».

3.2 Исследование поверхности трения гибридного антифрикционного ПКМ

Исследование структуры и химического состава поверхности трения образцов гибридных антифрикционных ПКМ на основе стеклянных и волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена проводилось с помощью метода растровой электронной микроскопии (РЭМ). Для наглядности на рисунке 3.6 представлена фотография гибридной армирующей ткани, по основе которой располагаются стеклянные волокна, которые при излучении имеют белый цвет, а по утку расположены волокна из СВМПЭ, которые при излучении принимают темный цвет.

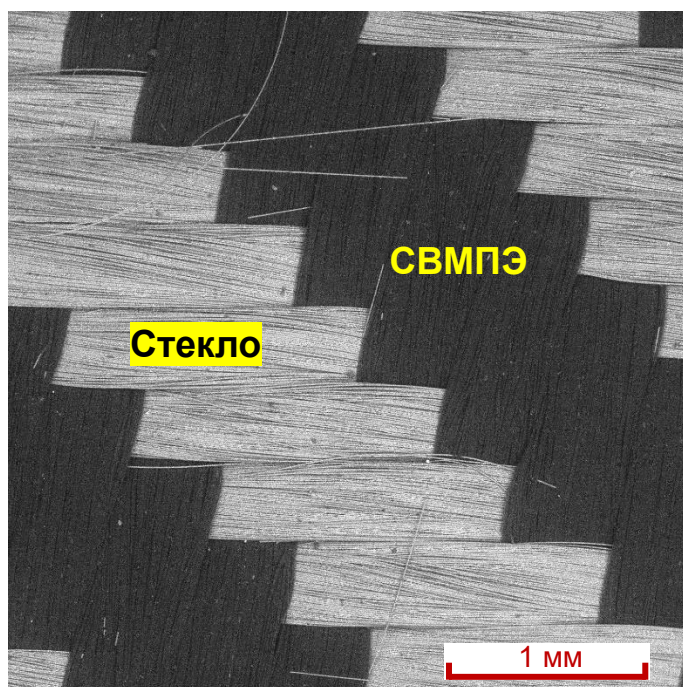


Рисунок 3.6 – Фотография поверхности армирующей ткани из стеклянных и СВМПЭ волокон

В ходе лабораторных триботехнических испытаний гибридного антифрикционного ПКМ на основе стекла и СВМПЭ волокон, были получены образцы с разным направлением армирующих органических и неорганических волокон в зоне трения. Образцы №1-3 были армированы СВМПЭ марки «ПЭ-1» 48 текс, образец № 4, армированный волокном СВМПЭ марки «С» 180 текс, был добавлен для сравнения и изучения контакта разных марок волокон СВМПЭ и полимерной матрицы. Образцы для исследования структуры поверхности трения

были получены после фрикционного контакта с роликом из жаропрочной нержавеющей стали 20Х13 без смазки, с нагрузкой 1800 Н, путь трения составил 3 км.

На образец №1 нагрузка вращающегося ролика была направлена вдоль слоев армирования, поэтому на канавке трения просматривается характерный рисунок плетения гибридной ткани (рис 3.7), белым цветом подсвечиваются стеклянные волокна, черным – волокна из СВМПЭ, серым – полимерная матрица.

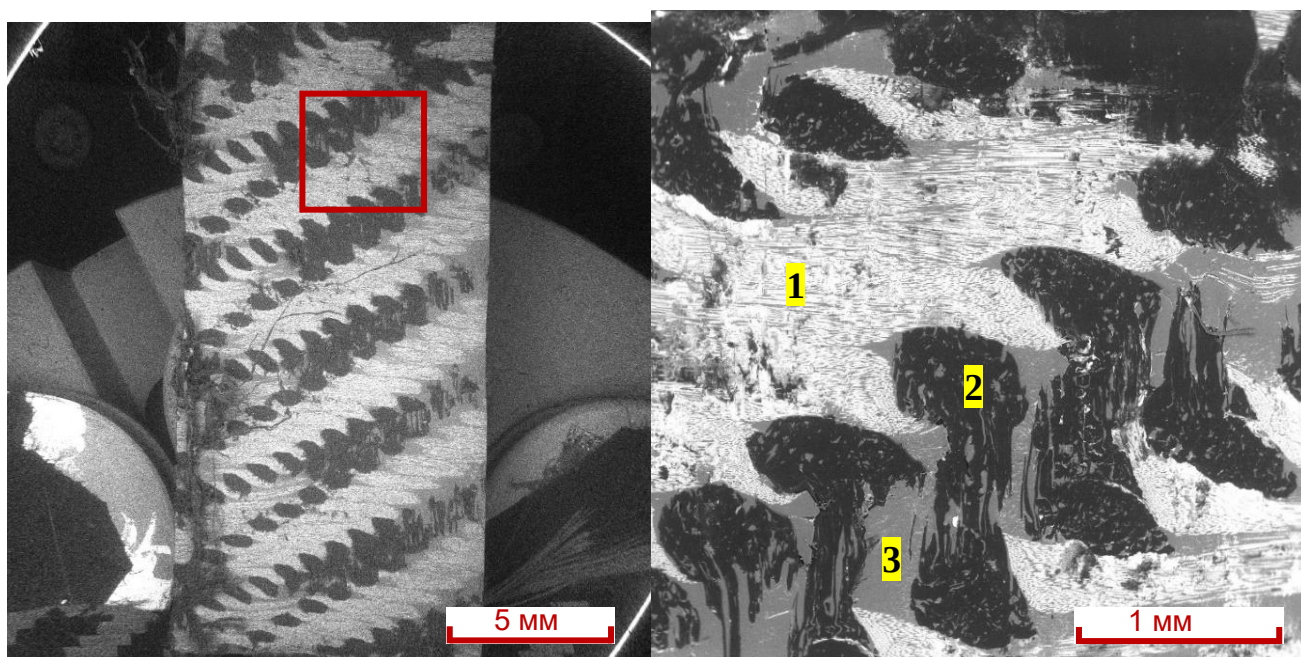


Рисунок 3.7 – Электронные фотографии поверхности образца №1(стекло/СВМПЭ)
Направление армирования – вдоль поверхности трения (1 – стеклянные волокна, 2–
волокна из СВМПЭ, 3 – полимерная матрица)

При приближении электронного изображения области трения (рис 4.8), более отчетливо становится виден характерный ровный скос филаментов стеклянного волокна, который говорит о том, что стеклянные волокна постепенно изнашиваются и вымываются из зоны трения. При рассмотрении волокон из СВМПЭ нельзя различить отдельные филаменты, вероятно, вследствие нагрузки и температуры в зоне трения филаменты СВМПЭ спекаются в монолитную область с редкими включениями эпоксидного связующего.

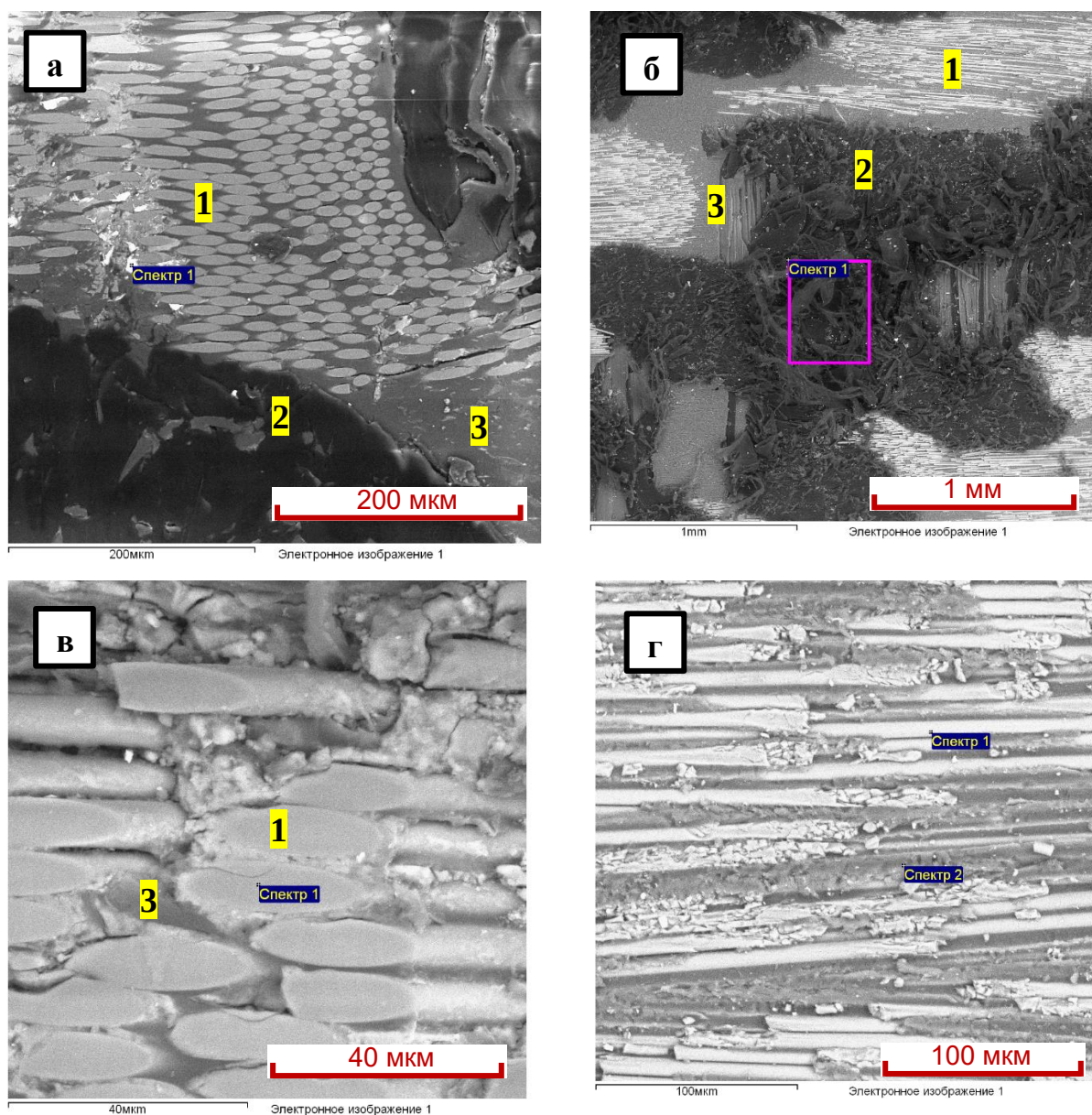
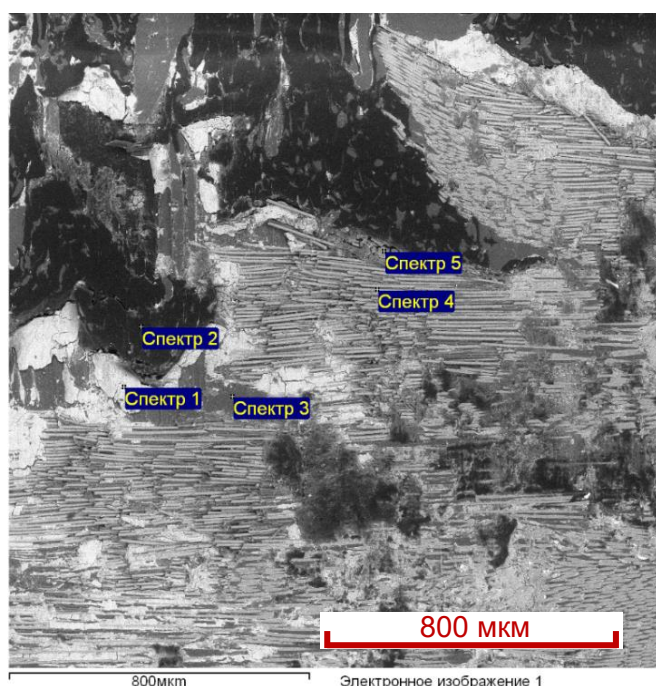


Рисунок 3.8 – Фотографии поверхности трения образца №1 (стекло/СВМПЭ):
 а) внешний вид волокон из СВМПЭ после трения; б) внешний вид волокон из СВМПЭ после механической обработки образца; в) внешний вид стеклянных волокон после трения;
 г) внешний вид стеклянных волокон после механической обработки
 (1 – стеклянные волокна, 2– волокна из СВМПЭ, 3 – полимерная матрица)

При рассмотрении поверхности трения образца гибридного антифрикционного ПКМ на основе стеклянных и СВМПЭ волокон можно отметить другой характер разрушений армирующих волокон. При механической обработке выступающие на поверхность края филаментов стеклянных волокон под действием сил резания разрушаются на множество мельчайших осколков, которые частично остаются зафиксированными в полимерной матрице (рис.3.9).

При рассмотрении зоны поверхности с СВМПЭ волокнами, можно сделать вывод, что более твердые и хрупкие стеклянные волокна и эпоксидная полимерная матрица хрупко разрушаются в процессе механической обработки, а вязкие, пластичные отдельные филаменты СВМПЭ высвобождаются из полимерной матрицы на поверхность ПКМ, после чего под действием температуры и давления инструмента в зоне резания вытягиваются и принимают вид плоских неровных лент.

При дальнейшем рассмотрении области трения были замечены области переноса металла, которые возникают вследствие его проникновения в поверхностный слой гибридного антифрикционного ПКМ. На фотографии, показанной на рисунке 3.9, видна полость на поверхности образца №1, образованная в ходе разрушения полимерной матрицы вокруг СВМПЭ волокна.



Спектр	C	O	Mg	Al	Si	Cl	Cr	Fe	Итог
Спектр 1	28	46	1	1	4	1	3	15	100
Спектр 2	91	9	0	0	0	0	0	0	100
Спектр 3	69	20	1	0	1	7	0	1	100
Спектр 4	39	39	2	4	9	4	1	23	100
Спектр 5	35	42	1	3	9	2	2	8	100

Рисунок 3.9 – Электронная фотография поверхности трения образца №1 (стекло/СВМПЭ) и химический состав областей поверхности в процентном соотношении.

Данная полость заполняется продуктами износа, химический анализ этих включений показал, что их химический состав коррелирует с составом контртела, т.е. стали марки стали 20Х13 в которой содержится железо и хром. На электронной фотографии металлические продукты износа имеют белый цвет.

Спектр 2 показывает химический состав СВМПЭ волокон, спектр 3 – полимерной матрицы, спектры 4 и 5 показывают состав области, состоящей из стеклянных волокон. В спектрах 4 и 5 видно присутствие продуктов износа стали в данной области.

На образец №2 (стекло/СВМПЭ) нагрузка вращающегося ролика была направлена поперек слоев армирования, при этом СВМПЭ волокна располагались вдоль поверхности трения, а стеклянные волокна перпендикулярно (рис.3.10).

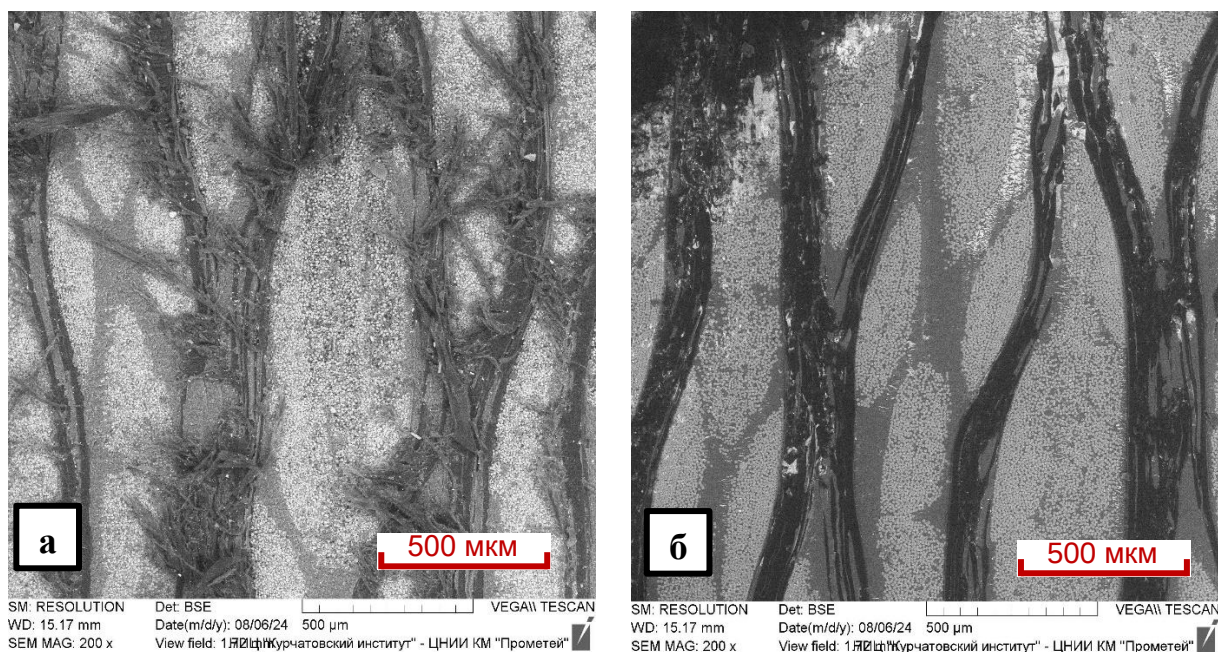
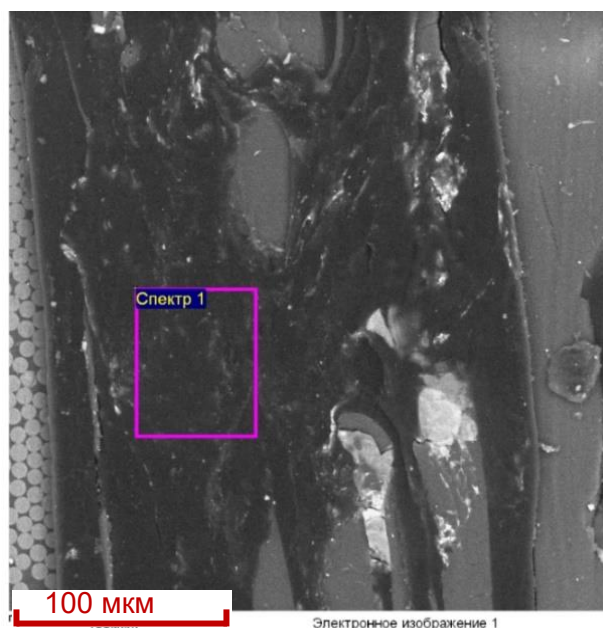


Рисунок 3.10 – Поверхность образца №2 (стекло/СВМПЭ):
а) после механической обработки; б) после трения.

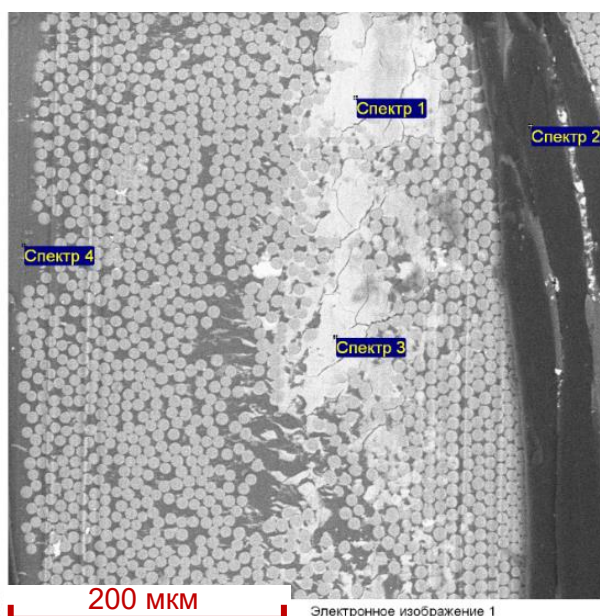
Как и в случае с поверхностью образца №1, на поверхности образца №2 после механической обработки наблюдаются лентообразные, незакрепленные в полимерной матрице части СВМПЭ волокна, которые после трения спекаются в одну сплошную зону СВМПЭ с редкими включениями полимерной матрицы, что наглядно показано на рисунке 3.11 где область спеченных филаментов СВМПЭ показана черным цветом, а полимерная матрица серым.



Спектр1	%
C	88.93
O	7.93
Mg	0.17
Al	0.37
Si	0.82
Cl	0.90
Cr	0.07
Fe	0.81
Итого, %	100.00

Рисунок 3.11 – Сплошная область спеченных филаментов СВМПЭ.

При детальном рассмотрении области трения можно заметить продукты износа, при этом заметна тенденция, что наибольшая зона налипания продуктов износа располагается в области, где на поверхность трения выходят филаменты стеклянных волокон. На рисунке 3.12 представлена фотография одной из таких областей и приведен анализ химического состава разных точек.



Спектр	C	O	Mg	Al	Si	Cl	Cr	Fe	Итого
Спектр 1	33.60	43.26	1.20	2.94	4.41	3.29	1.76	9.54	100.00
Спектр 2	80.05	15.34	0.76	0.31	1.91	1.04	0.01	0.61	100.00
Спектр 3	37.51	38.79	1.38	3.39	4.43	3.76	1.95	8.79	100.00
Спектр 4	62.26	22.64	1.04	1.20	2.40	9.68	0.11	0.68	100.00

Рисунок 3.12 – Электронная фотография поверхности трения образца и ее химический состав.

Спектры 1 и 3 соответствуют области налипания продуктов износа, которые содержат в себе железо и хром, оставшиеся от износа стального ролика, оксид кремния и оксид алюминия, которые входят в состав стеклянных волокон и больше трех процентов хлора, который содержится в эпоксидной полимерной матрице. Спектр 2 показывает химический состав СВМПЭ волокна в области трения, а спектр 4 – состав полимерной матрицы. В область исследования химического состава могут попадать мельчайшие частички износа, что приводит к небольшим искажениям в показателях химического состава.

На образец №3 нагрузка вращающегося ролика была направлена поперек слоев армирования, при этом СВМПЭ волокна располагались перпендикулярно поверхности трения, а стеклянные волокна вдоль поверхности. На рисунке 3.13 представлены электронные фотографии поверхности образца №3.

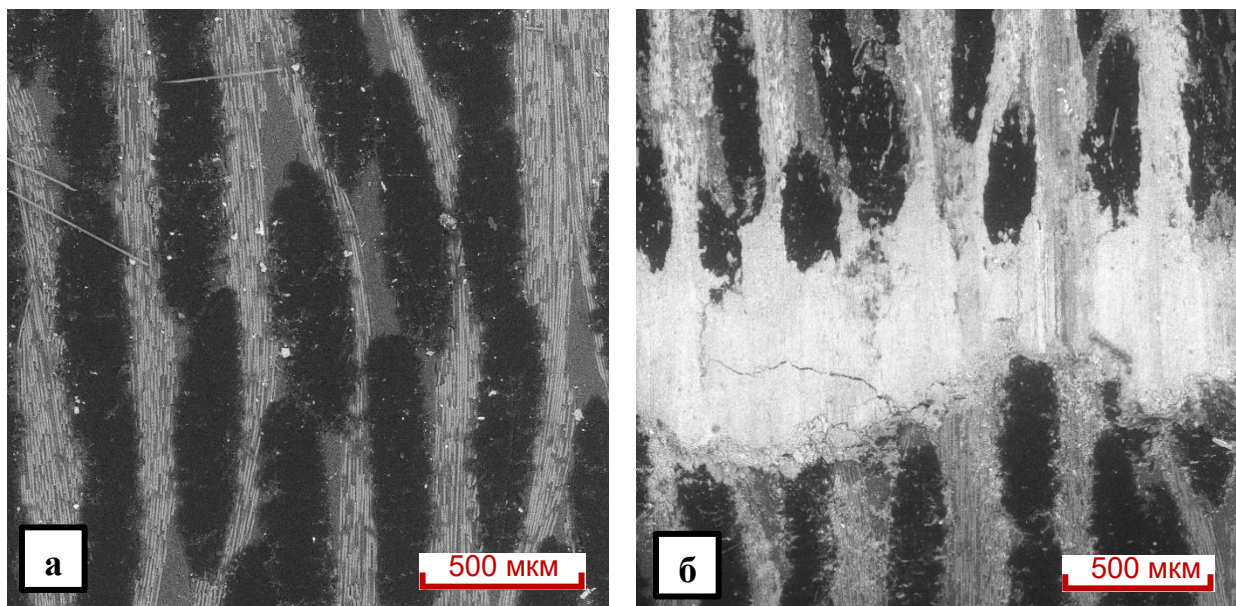
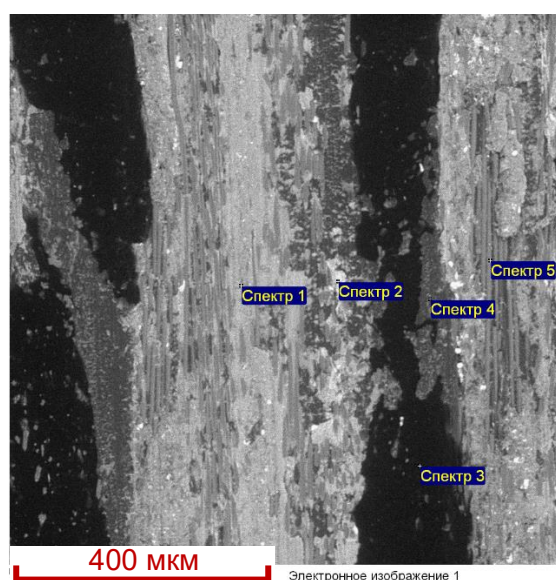


Рисунок 3.13 – Поверхность образца №3: а) после механической обработки;

Можно заметить, что при механической обработке поперек волокон СВМПЭ поверхность образца имеет самое высокое качество микрогеометрии. Вязкие филаменты СВМПЭ не деформируются при механической обработке, как на предыдущих образцах ПКМ, а срезаются вместе с полимерной матрицей. Однако, несмотря на качество обработанной поверхности, при трении образец №3 показал наибольший коэффициент трения среди образцов. На фотографии

поверхности трения заметна большая зона вытесненных из зоны трения продуктов износа, которая тянется вдоль всей канавки износа. Данное явление позволяет сделать вывод, что армирование, при котором стальное контртело контактирует со стеклянными волокнами, расположенными вдоль поверхности трения, является неудачным с точки зрения триботехнических характеристик материала.

Исследование поверхности трения образца с возможностью определения химического состава области показало преобладание металлических продуктов износа в сравнении с другими образцами. Большая часть железа и хрома находится полостях между выступающих стеклянных волокон. На рисунке 3.14 показана электронная фотография поверхности трения и ее химический состав.



Спектр	C	O	Mg	Al	Si	Cl	Cr	Fe	Итог
Спектр 1	30.99	36.25	2.09	2.19	5.71	1.79	3.82	17.17	100.00
Спектр 2	26.76	34.14	0.96	1.15	2.00	2.58	4.28	28.13	100.00
Спектр 3	82.37	13.51	0.22	0.17	1.01	0.57	0.70	1.45	100.00
Спектр 4	62.79	21.63	0.58	0.52	1.05	8.47	1.22	3.74	100.00
Спектр 5	34.86	41.42	3.82	4.86	9.64	1.43	0.52	3.45	100.00

Рисунок 3.14 Электронная фотография поверхности трения образца и ее химический состав.

Образец №4 (стекло/СВМПЭ) был армирован таким же способом укладки и направления волокон, как образец №3(стекло/СВМПЭ). Принципиальная разница образца №4 (стекло/СВМПЭ) заключается в другом виде армирующих волокон СВМПЭ, которые отличаются показателем линейной плотности филамента. На рисунке 3.15 для сравнения показаны фотографии СВМПЭ волокон расположенных перпендикулярно поверхности трения образцов №3 и №4.

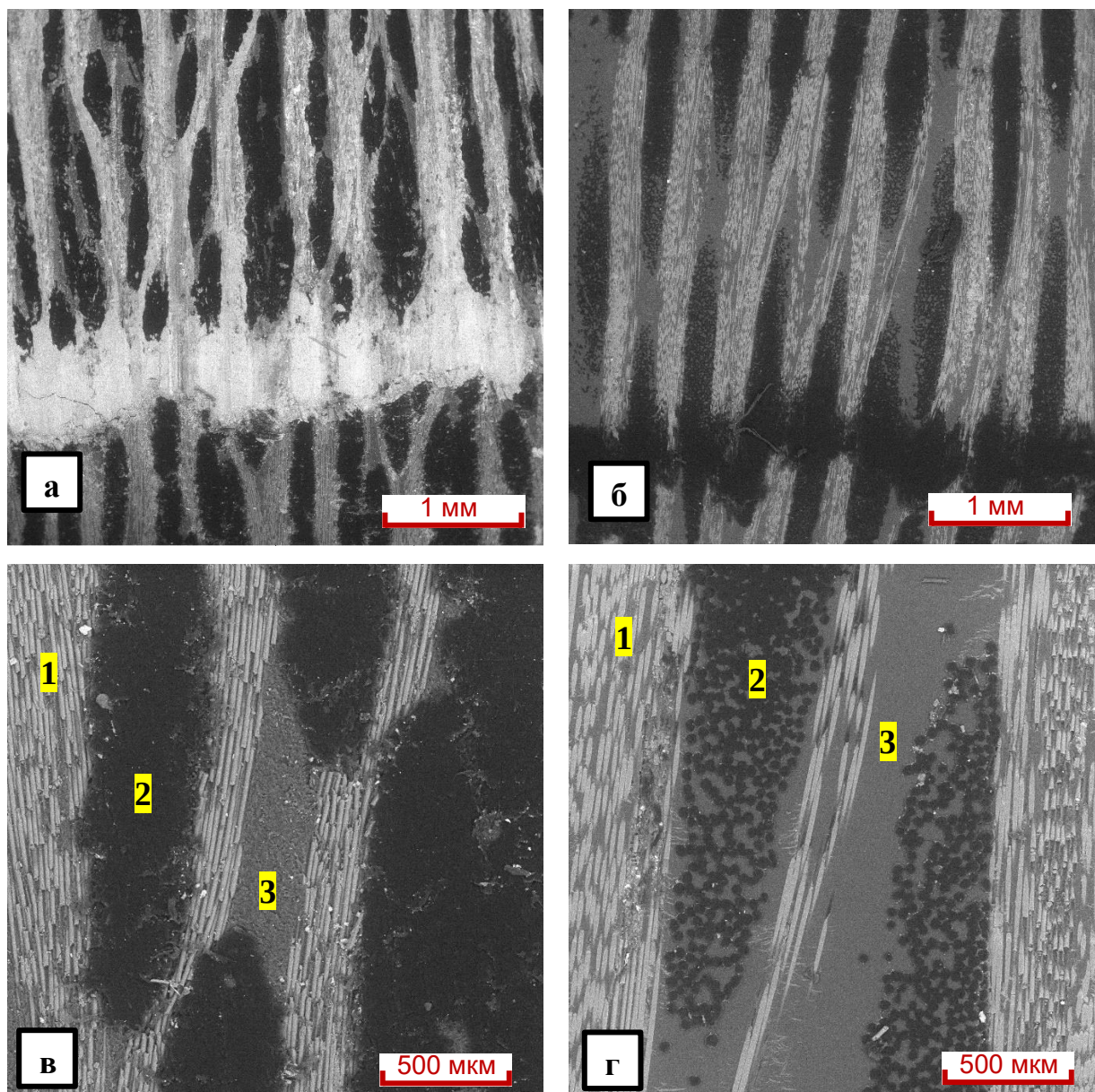


Рисунок 3.15 – Поверхность трения: а) образец №3 при увеличении 90х;
 б) образец №4 при увеличении 90х; в) образец №3 при увеличении 400х;
 г) образец №4 при увеличении 400х
 (1 – стеклянные волокна, 2– волокна из СВМПЭ, 3 – полимерная матрица)

Граница поверхности трения у обоих образцов характерно отделена от поверхности вне зоны трения продуктами износа. При этом наблюдается существенная разница в структурных составах данных продуктах износа. У образца №3, как уже было сказано ранее, они включают в себя железо и хром – продукты износа стального контртела из стали 20Х13, которые в результате излучения подсвечивают эту зону белым цветом. А у образца №4 данная область

состоит, в основном, из продуктов износа СВМПЭ волокон, которые придают зоне продуктов износа характерный темный цвет при излучении микроскопа.

При рассмотрении фотографий поверхности трения образца №4 можно заметить, что визуально содержание связующего у него почти в два раза больше, чем у образца №3. Если в случае стеклянных волокон разница в проникании полимерной матрицы в волокно практически незаметна, то при рассмотрении СВМПЭ волокон образца №4 можно заметить, что филаменты волокна окружены эпоксидным связующим, в то время как СВМПЭ волокно образца №3 почти не содержит связующего, что привело к слипанию филаментов в мононить.

В ходе исследования был сделан вывод, что стеклянные волокна, как 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.

Как известно, при трении полимера по металлу происходит перенос полимера на поверхность металла. Образуется слой продуктов трибоконтакта [81]. При исследовании продуктов трибоконтакта, установлено, что у образца №4 (стекло/СВМПЭ) в основном они состоят из СВМПЭ, а значит СВМПЭ равномерно распределяется по металлу, заполняя микронеровности поверхности, частично предотвращая прямой контакт стеклянных волокон с поверхностью металлического контртела, тем самым снижая коэффициент трения .

3.3 Исследование зависимости прочностных свойств гибридных антифрикционных ПКМ от состава армирующей ткани

Органические волокна, как уже было отмечено в литературном обзоре, имеют более низкую адгезию к полимерной матрице, более низкую прочность и жёсткость по сравнению с неорганическими волокнами, что приводит к 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 прочностных свойств от состава гибридной армирующей ткани и соотношения разных типов волокон в ее составе проводились разрушающие испытания и определялись следующие характеристики: разрушающее напряжение при сжатии, изгибающее напряжение при разрушении, разрушающее напряжение при межслойном сдвиге.

Для проведения механических испытаний гибридного антифрикционного ПКМ методом горячего прессования были изготовлены заготовки в виде плит. Из пластин были нарезаны образцы для испытаний в соответствии с ГОСТ по каждому виду испытаний. Описание методов испытаний и испытательного оборудования, а также размеры и количество образцов для определения механических свойств подробно рассмотрены в Главе 2. Результаты механических испытаний образцов ПКМ, армированных разными гибридными тканями приведены в таблице 3.3 и на рисунке 3.16.

Таблица 3.3 Результаты механических испытаний гибридных антифрикционных ПКМ.

№	Состав гибридной армирующей ткани			Макс. Напряжение при сжатии, МПа	Макс. 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

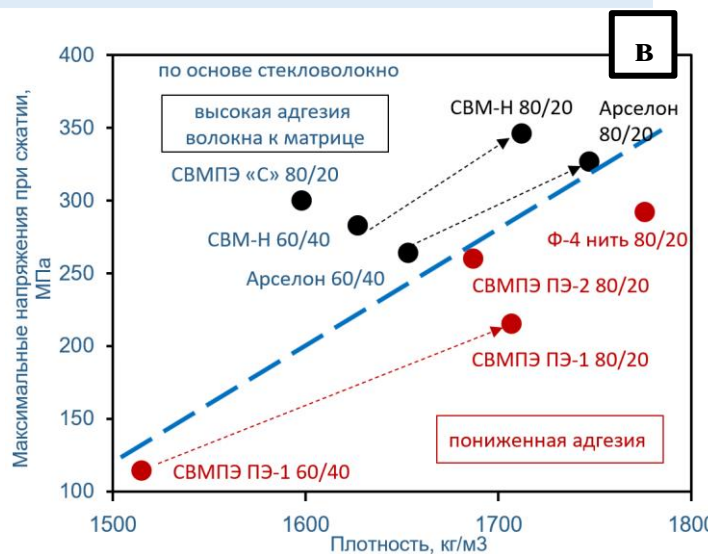
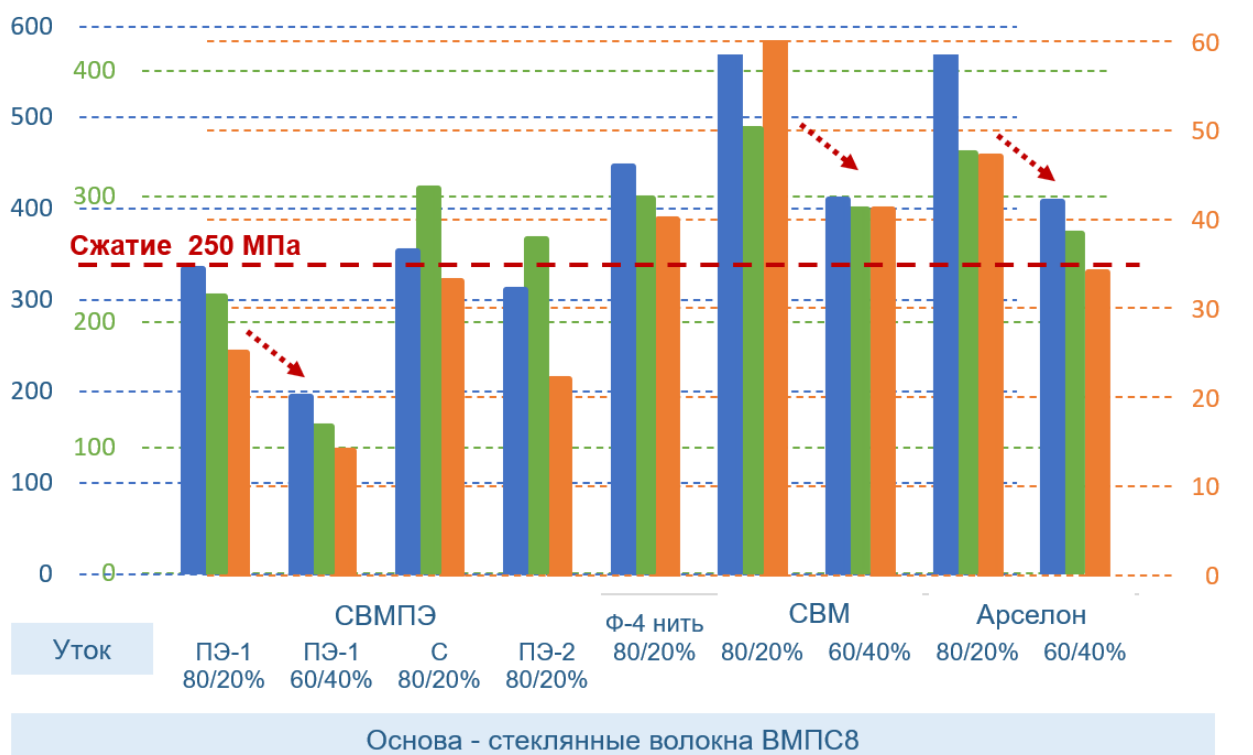


Рисунок 3.16 – Диаграмма зависимости механических свойств гибридных антифрикционных ПКМ от состава и соотношения гибридной армирующей ткани :

а) гибридные антифрикционные ПКМ на основе стеклянных волокон; б) гибридные антифрикционные ПКМ на основе пряжи СВМ; в) зависимость максимального напряжения при сжатии от плотности гибридных антифрикционных ПКМ на основе стеклянных волокон.

Из требований к УГЭТ было установлено ограничение по показателю разрушающего напряжения при сжатии для разрабатываемых гибридных антифрикционных ПКМ в 250 МПа.

Как и предполагалось, наибольшей прочностью обладают гибридные антифрикционные ПКМ, в состав которых входят стеклянные волокна (ВМПС8). При этом наблюдается общеизвестная тенденция увеличения значения прочности ПКМ при увеличении относительного содержания стеклянных волокон. Включение в состав ПКМ органических волокон из СВМПЭ значительно снижает прочность: так у образца №2 ВМПС8/СВМПЭ ПЭ-1 (60/40%) прочность на сжатие составляет всего 114 МПа, что не удовлетворяет требованиям.

Поскольку образцы №10-11 не содержали своем составе стеклянных волокон, то это привело к значительному снижению прочности, например, предел прочности при сжатии образца №11 относительном содержанием 40% нитей Арселон (113 МПа) в 2 раза ниже прочности образца № 9 с таким же содержанием нитей Арселон (264 МПа).

Более высокие прочностные характеристики образца №3 (стекло/СВМПЭ) с волокнами СВМПЭ С по сравнению с образцом №1(стекло/СВМПЭ) с волокнами СВМПЭ П-1 объясняется более лучшим заполнением эпоксидным связующим структуры гибридной армирующей (рис.3.15).

Важный показатель адгезии гибридной армирующей ткани к полимерной матрице, является значение максимального напряжения при межслойном сдвиге. У образцов № 2, 4, 10, 11, 12 (табл. 3.3) значение прочности при межслойном сдвиге меньше 25 МПа, что делает невозможным применение данных гибридных антифрикционных ПКМ для использования в тяжелонагруженных узлах трения. На рисунке 3.17 приведены фотографии образцов гибридных антифрикционных ПКМ после прочностных испытаний.



Рисунок 3.17 – Внешний вид образцов после физико-механических испытаний.

Для исследуемых образцов гибридных антифрикционных ПКМ характерен хрупкий вид разрушения, что можно наблюдать по деформационным кривым, изображенным на диаграммах напряжения - деформации (рис. 3.18).

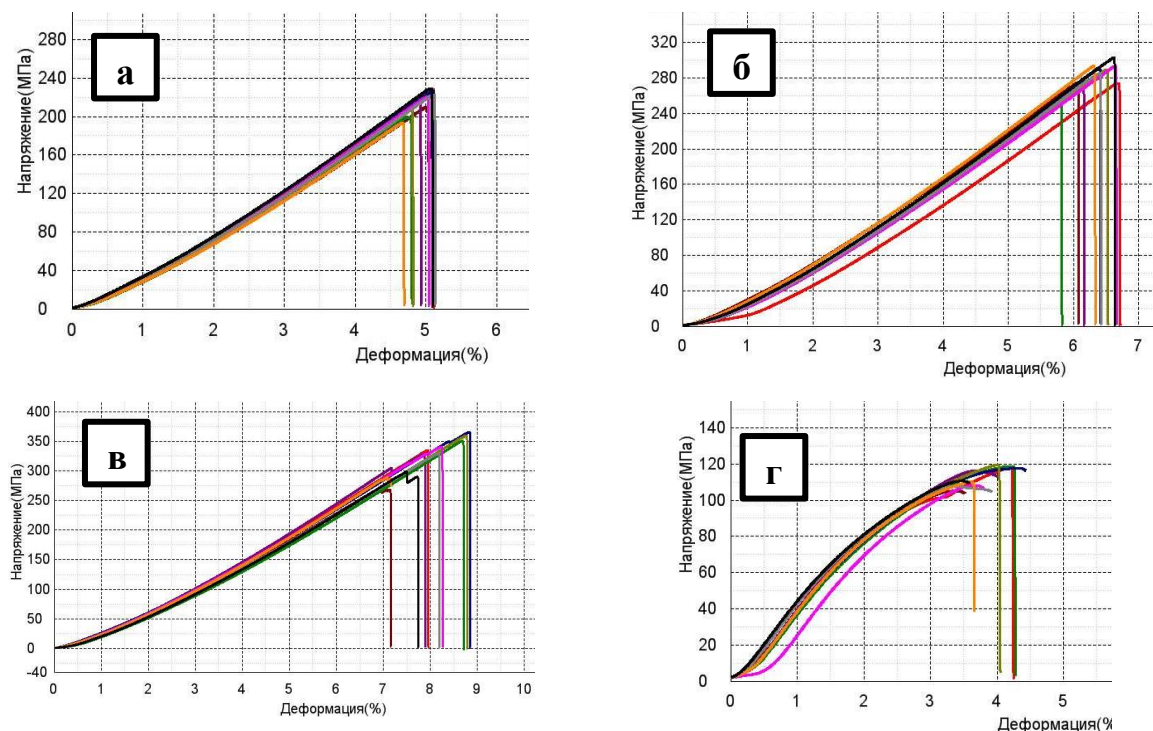


Рисунок 3.18 – Диаграммы напряжения - деформации образцов гибридных антифрикционных ПКМ при сжатии: а) образец №1 ВМПС8/СВМПЭ ПЭ-1 (80/20%); б) образец №6 ВМПС8/СВМ-Н (60/40%); в) образец №8 ВМПС8/Арселон (80/20%); г) образец №11 СВМ/Арселон (60/40%).

Из результатов разрушающих испытаний можно сделать вывод, что прочностные свойства гибридных ПКМ, в состав которых входят стеклянные волокна, не уступают прочностным свойствам углепластика УГЭТ и находятся в диапазоне показателя прочности при сжатии 250 МПа – 350 МПа. Также из результатов можно сделать вывод, что снижение содержания стеклянных армирующих волокон приводит к снижению прочности гибридных ПКМ в среднем на 30%.

3.4 Исследование электроизоляционных свойств

Так как углеродные волокна обладают электронной проводимостью, то в процессе контактного взаимодействия в морской воде углепластик не препятствует коррозии металлических деталей узла трения. Кроме проводящих свойств, углепластики имеют положительно заряженный потенциал (+0,4 В), в то время как большинство металлов, используемых для изготовления валов, имеют отрицательный потенциал (-0,1 В). Разность потенциалов контактируемых в морской воде материалов приводит к переносу электронов между этими материалами. В таких условиях металл является анодом и постепенно разрушается, а углепластик является катодом, на поверхности которого происходят восстановительные процессы. Таким образом контактное воздействие углепластика и металлического контртела приводит к коррозии, что в свою очередь может привести к износу узла трения и снижению его ресурса.

В связи с этим необходимо определить электроизоляционные свойства разработанных гибридных антифрикционных ПКМ по методике, описанной во 2 главе, для сравнения с антифрикционным ПКМ марки УГЭТ, удельное объемное электрическое сопротивление которого равняется $1,5 \cdot 10^2$ Ом·м. Результаты измерений удельного объемного электрического сопротивления приведены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Результаты испытаний по определению удельного объемного электрического сопротивления

№	Состав гибридной армирующей ткани образца ПКМ	Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м
1	ВМПС8/СВМПЭ ПЭ-1(80/20%)	$7,5 \times 10^{13}$
2	СВМ и Арселон (60/40%)	$0,5 \times 10^{13}$
3	СВМ и СВМПЭ (60/40%)	$0,4 \times 10^{13}$
4	ПКМ марки УГЭТ	$1,5 \times 10^2$

По результатам испытаний можно сделать вывод, что образцы гибридных антифрикционных ПКМ являются диэлектриками, значение удельного объемного электрического сопротивления гибридных антифрикционных ПКМ на 10 порядков превосходят аналогичное значение антифрикционного ПКМ марки УГЭТ.

3.5 Исследование влияния водопоглощения на размерную стабильность образцов ПКМ

Для исследования водопоглощения по методике, описанной во 2 главе, 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 выдержки в воде и после. Процесс испытаний изображен на рисунке 3.19. В таблице 3.5 и на рисунке 3.20 приведены результаты 24 - часовых испытаний образцов ПКМ.

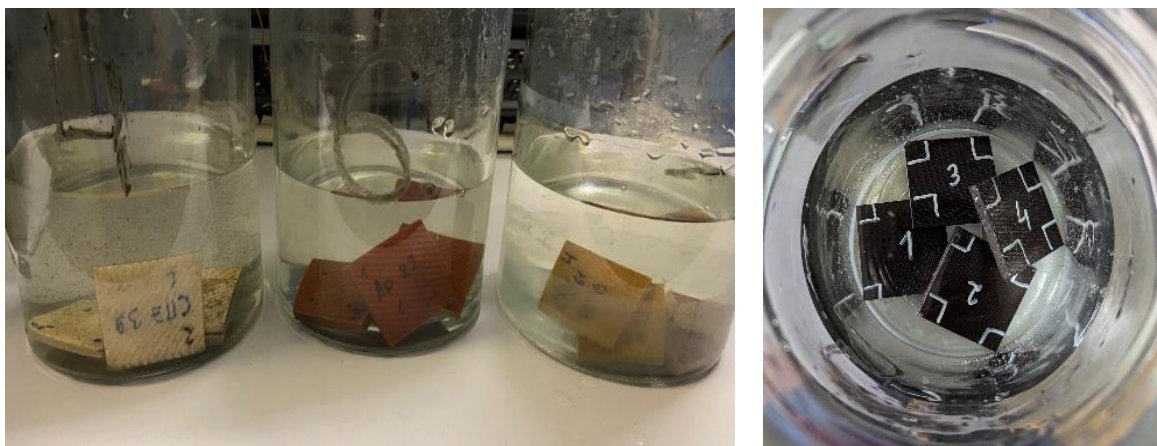


Рисунок 3.19 – Фотографии образцов, погруженных в воду, для исследования водопоглощения.

Таблица 3.5 – Результаты испытаний по определению водопоглощения и изменения линейных размеров (набухания)

№	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

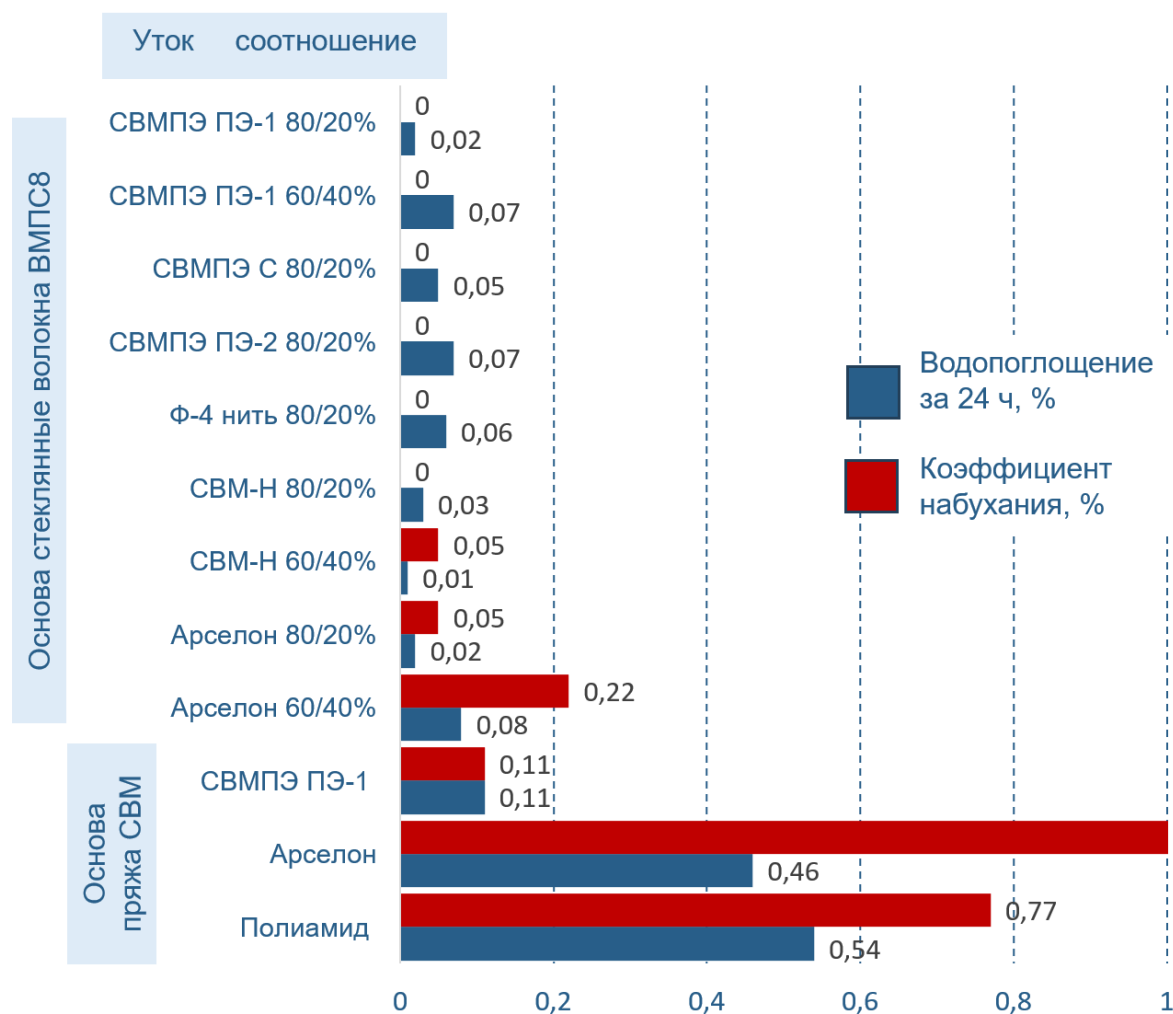


Рисунок 3.19 – результаты исследования водопоглощения и изменения линейных размеров образцов гибридных антифрикционных ПКМ

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) показали значительно более высокое водопоглощение (0,457–0,667%) и набухание (0,55–1,36%).

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.

3.6 Исследование влияния гибридного антифрикционного ПКМ на коррозию металлического контртела

Для проведения испытания были изготовлены два ролика из нержавеющей жаропрочной стали 20Х13. В ходе проведения эксперимента один ролик помещался на пластину из антифрикционного ПКМ марки УГЭТ, а второй ролик на пластину из гибридного антифрикционного ПКМ (образец №1 ВМПС 8/СВМПЭ ПЭ-1), после чего обе гальванические пары по отдельности помещались в емкость с синтетической морской водой с полным погружением на 90 дней при 20° С. На рисунке 3.21 приведена фотография процесса проведения эксперимента на 30-й день.

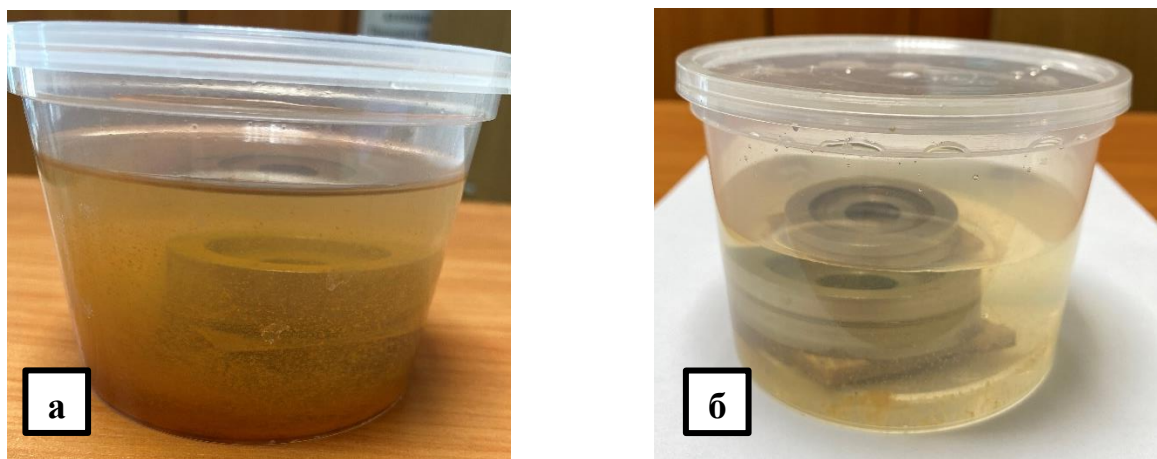


Рисунок 3.21 – Фотография процесса проведения эксперимента на 30 день:

- а) Коррозия ролика из стали 20Х13 в паре с УГЭТ, б) Отсутствие коррозии ролика из стали 20Х13 в паре с образцом №1 (образец №1 ВМПС 8/СВМПЭ ПЭ-1)

Так как углепластик обладает электродным потенциалом в морской воде равным +0,43В, а сталь 20Х13 +0,03В (в пассивном состоянии и -0,32В в активном состоянии) [85], то при контакте этих материалов из-за разницы потенциалов

процесс коррозии стали 20Х13 значительно ускоряется, в данном случае углепластик выступает в роли катода, а стальной ролик – в роли анода.

В результате исследований, описанных в п. 4.4, было установлено, что гибридные антифрикционные ПКМ обладают электроизоляционными свойствами, что должно полностью исключать влияние ПЭСТ на развитие 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 оксидными отложениями. В то время как состояние поверхности ролика, находящегося в среде с пластиной из гибридного антифрикционного ПКМ, визуально не изменилась. Данные результаты подтверждают, что диэлектрические свойства ПКМ на основе стеклянных и СВМПЭ волокон не способствуют развитию коррозии. На рисунке 3.22 представлены фотографии пар образец ПКМ-ролик до и после 90-дневного пребывания в синтетической морской воде.

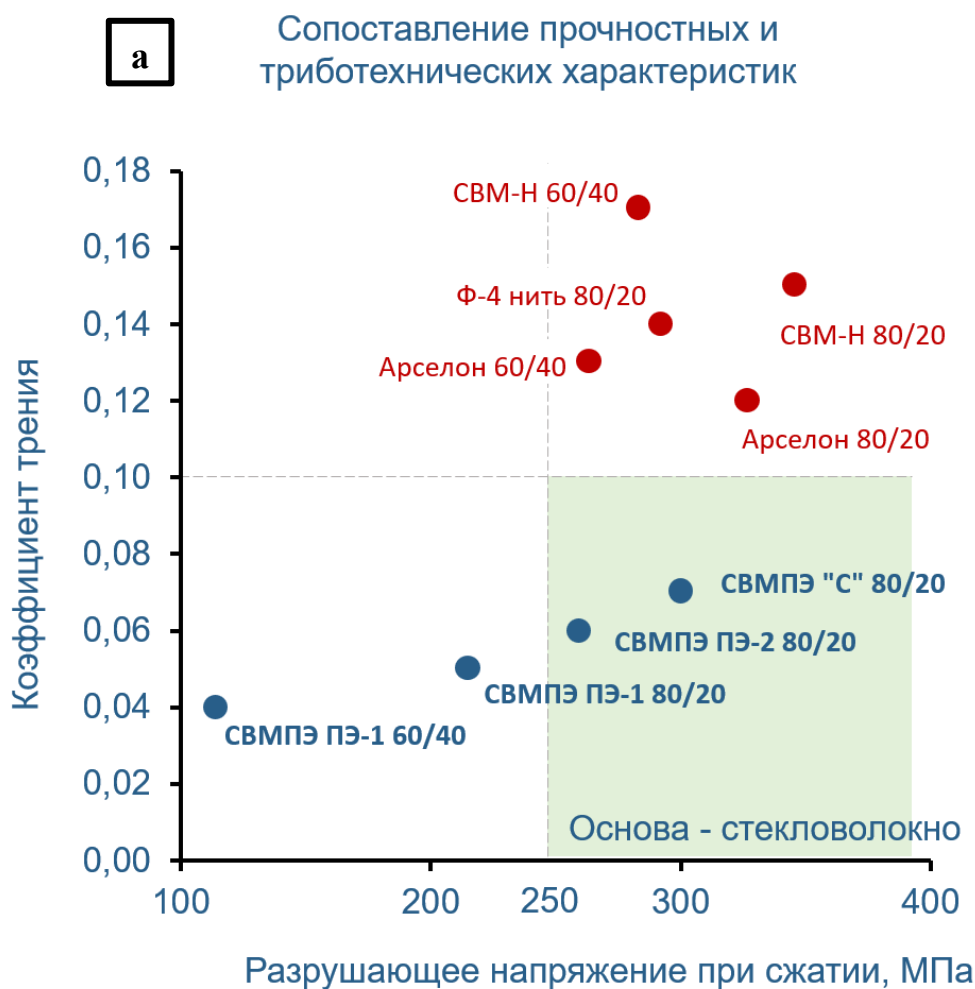


Рисунок 3.22 – Фотографии гальванической пары образец ПКМ – ролик из 20Х13:
 а) ПЭСТ и ролик до выдержки в воде; б) ПЭСТ и ролик после 90 дней выдержки в воде;
 в) УГЭТ и ролик до выдержки в воде; г) УГЭТ и ролик после 90 дней выдержки в воде

В результате исследования был сделан вывод, что разработанный гибридный антифрикционный ПКМ на основе армирующей ткани из стеклянных и СВМПЭ волокон (ПКМ марки ПЭСТ) не способствует развитию коррозии стали 20Х13 в синтетической морской воде.

3.7 Основные принципы выбора состава армирующей ткани гибридных антифрикционных ПКМ

По результатам комплекса лабораторных исследований установлено, что ПКМ на основе стеклянных и СВМПЭ волокон обладает наилучшими триботехническими характеристиками и достаточной прочностью. На рисунке 3.23 приведены основные сравнительные характеристики разработанных гибридных антифрикционных ПКМ.



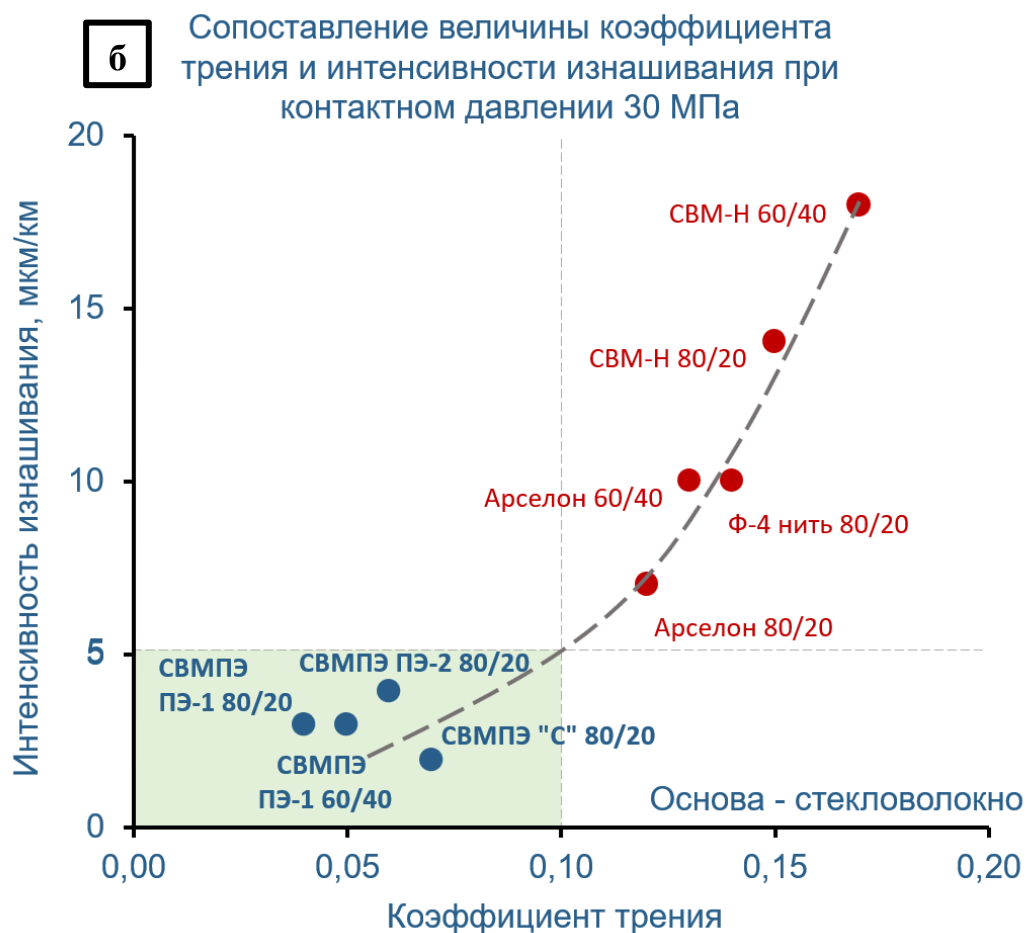


Рисунок 3.23 – Характеристики гибридных антифрикционных ПКМ:

- а) сопоставление прочностных и триботехнических характеристик;
 б) Сопоставление величины коэффициента трения и интенсивности изнашивания при контактном давлении 30 МПа

Проведя анализ результатов, были установлены следующие критерии выбора состава гибридной армирующей ткани:

- для обеспечения триботехнических характеристик гибридного антифрикционного ПКМ, сравнимых с антифрикционным углепластиком УГЭТ, необходимо использование не менее 20% СВМПЭ волокон в утке ткани;
- для обеспечения высоких механических свойств необходимо применение не менее 80% стеклянных волокон в основе гибридной армирующей ткани (ПКМ с содержанием 60% стеклянных волокон и 40% СВМПЭ волокон обладает недостаточной прочностью (111 МПа));
- применение СВМПЭ волокон марки «С», которые обладают высокой линейной плотностью (180 текс) значительно увеличивает толщину ткани,

полученная ткань не обладает формостабильностью (рис 3.24), дальнейшее изготовление из нее препрегов для формования заготовок подшипников скольжения затруднено рыхлостью и ползучестью;

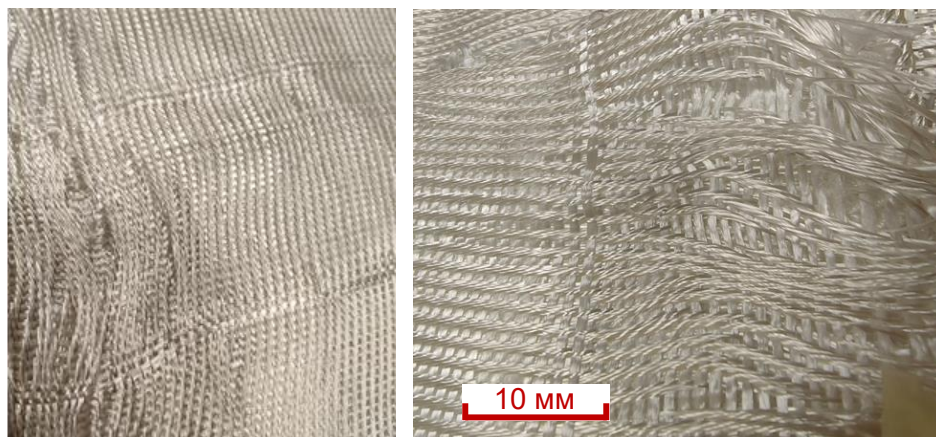


Рисунок 3.24 – Внешний вид гибридной армирующей ткани из СВМПЭ волокон марки «С» (180 текс) в утке.

- применение СВМПЭ марки ПЭ-2 (27 текс) обладает меньшей линейной плотностью чем ПЭ-1, что приводит к меньшему содержанию СВМПЭ в области трения и увеличивает коэффициент трения;

- 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). Для предотвращения набухания и как следствие заклинивания узла трения, рекомендуется исключать данные волокна из состава ПКМ;

- применение органических волокон марки СВМ значительно увеличивает значение коэффициента трения и снижает стойкость гибридного антифрикционного ПКМ к изнашиванию при трении;

- ткани на основе пряжи СВМ и органическими волокнами по утку не способны обеспечить требуемый уровень физико-механических характеристик.

Таким образом, 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) при прочности 215 МПа.

Марка нового гибридного антифрикционного ПКМ получила наименование ПЭСТ.

Выводы по главе 3

В третьей главе представлены результаты комплексного экспериментального исследования триботехнических характеристик и физико-механических свойств разработанных гибридных антифрикционных ПКМ на основе гибридных армирующих тканей.

1. Установлено, что образцы гибридных антифрикционных ПКМ, содержащие волокна СВМПЭ в сочетании со стеклянными волокнами (образцы № 1, 2, 3, 4 по табл. 4.1), а также образец на основе ткани СВМ/СВМПЭ (образец № 10) обладают коэффициентом трения ниже, чем у антифрикционного ПКМ 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, что не позволяет применять данный материал в узлах трения.

2. Методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) и рентгеноспектрального микроанализа выявлено, 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.

При исследовании продуктов трибоконтакта, установлено, что в основном они состоят из СВМПЭ, а значит СВМПЭ равномерно распределяется по металлу, заполняя микронеровности поверхности, частично предотвращая прямой контакт стеклянных волокон с поверхностью металлического контртела, тем самым снижая коэффициент трения.

3. Показано, что наилучшие триботехнические свойства достигаются при ориентации волокон СВМПЭ параллельно поверхности трения. При перпендикулярной ориентации коэффициент трения возрастает, наблюдается интенсивное налипание металлических продуктов износа в зонах выхода стеклянных волокон. Ориентация волокон существенно влияет также на качество механической обработки: перпендикулярное расположение СВМПЭ обеспечивает наиболее гладкую поверхность после резания.

4. Установлено, что максимальные значения прочности при сжатии (346 МПа), межслойном сдвиге (61,0 МПа) и изгибе (604 МПа) получены для образца на основе стеклянных волокон и арамидных нитей СВМ. Образцы на основе стекла и СВМПЭ имеют более низкие показатели прочность при сжатии 215–300 МПа. Для всех составов снижение доли стеклянных волокон с 80% до 60% приводит к двукратному падению прочности. Образцы без стеклянных волокон (СВМ/органические волокна) обладают низкой прочностью от 72 МПа до 154 МПа и не пригодны для тяжело нагруженных узлов трения.

5. Измерения удельного объёмного электрического сопротивления показали, что исследуемые гибридные антифрикционные ПКМ являются диэлектриками: значения составляют от $0,28 \cdot 10^{13}$ до $7,0 \cdot 10^{13}$ Ом·м, что на 10–11 порядков превышает показатель антифрикционного ПКМ марки УГЭТ ($1,5 \cdot 10^2$ Ом·м). Это гарантирует отсутствие гальванических токов и предотвращает коррозию металлических контртел в морской воде.

6. Наименьшее водопоглощение (0,010–0,079% за 24 часа) и коэффициент набухания (0–0,22%) зафиксированы у образцов на основе стеклянных волокон с добавлением СВМ, СВМПЭ или Арселона. Образцы на основе только органических волокон (СВМ/полиамид, СВМ/Арселон, СВМ/фторопласт) показали значительно более высокое водопоглощение (0,457–0,667%) и набухание (0,55–1,36%).

7. В ходе 90-суточных испытаний на контактную коррозию в синтетической морской воде подтверждено, что гибридный антифрикционный ПКМ на основе стеклянных и СВМПЭ волокон не вызывает коррозии роликов из

стали марки 20Х13, в отличие от антифрикционного ПКМ марки УГЭТ, который инициирует интенсивную коррозию из-за разности потенциалов (УГЭТ +0,43В, сталь –0,30В). Благодаря диэлектрическим свойствам разработанный материал исключает процесс коррозии.

8. Разработаны основные принципы выбора состава гибридных армирующих тканей, учитывающие минимальное содержание стеклянных волокон не менее 80%.

9. Разработан состав материала ПЭСТ на базе эпоксидной матрицы ЭТ-2 и гибридной армирующей ткани из стеклянных волокон (ВМПС8) и СВМПЭ волокон марки ПЭ-1 с соотношением 80/20%. Разработаны ТУ 28.15.39-268-07516250-2022.

Глава 4 ПОВЫШЕНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПКМ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНОЙ АРМИРУЮЩЕЙ ТКАНИ

По завершению первого этапа исследований, исходя из результатов лабораторных испытаний из разработанных гибридных антифрикционных ПКМ, был выбран рациональный состав и соотношение гибридного антифрикционного ПКМ на основе ткани из стеклянных (ВМПС8) и СВМПЭ (ПЭ-1) волокон с соотношением 80/20% (гибридный антифрикционный ПКМ марки ПЭСТ).

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

Однако, из требований к УГЭТ было установлено ограничение по прочности разрабатываемого ПКМ в 250 МПа, а значит необходима дальнейшая работа по увеличению прочности гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ без снижения триботехнических характеристик.

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.

4.1 Уточнение состава армирующей ткани в гибридном антифрикционном ПКМ марки ПЭСТ

Основываясь на литературных данных и результатах проведенных прочностных испытаний, была в 1 главе рассчитана зависимость прочности 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 4.1) 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 (2 глава, рис. 2.7), 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%).

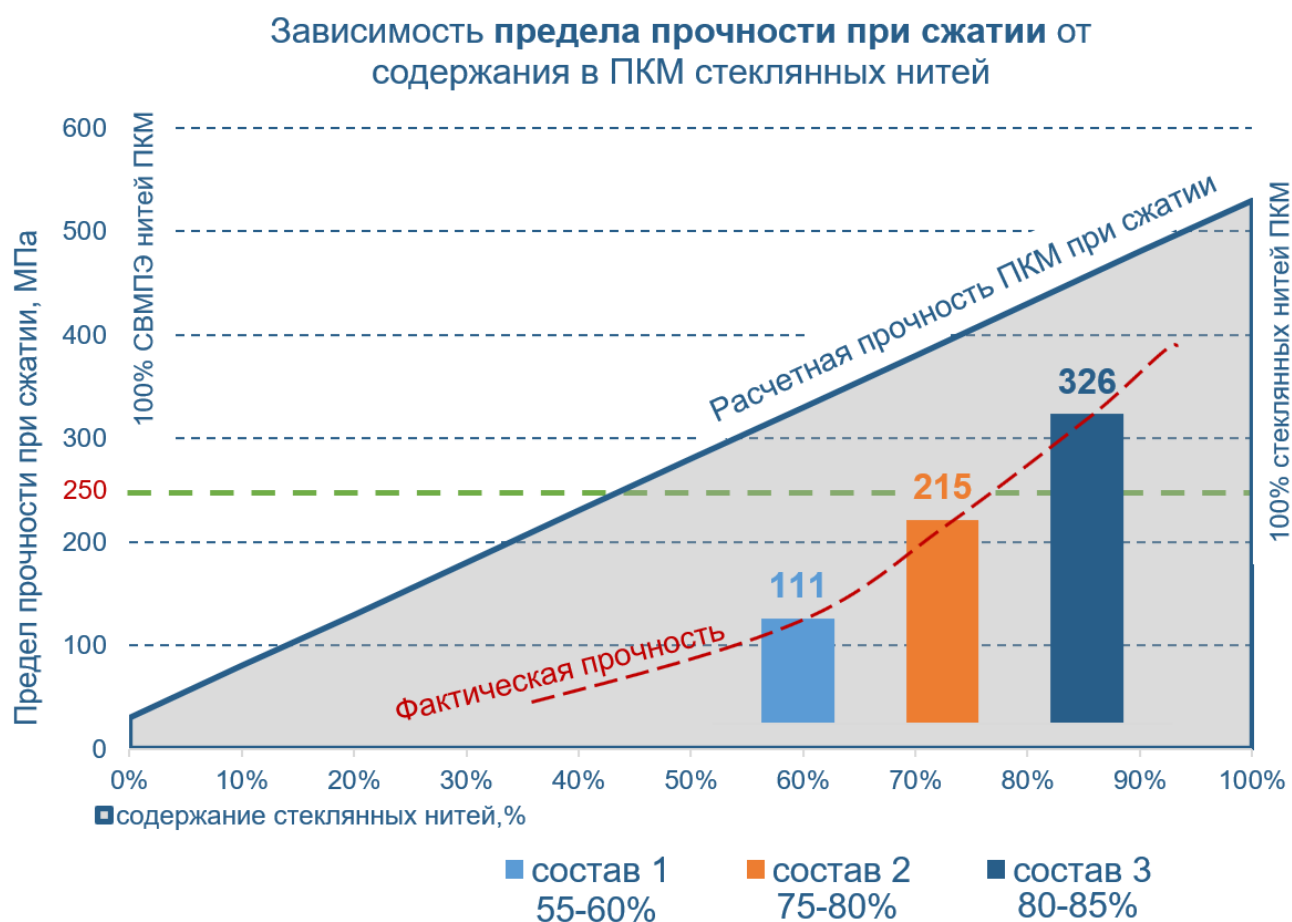


Рисунок 4.1 Сравнение прогнозируемых результатов предела прочности при сжатии и полученных при испытаниях.

На рисунке 4.2 приведены графики триботехнических характеристик гибридного материала марки ПЭСТ на основе трех гибридных армирующих тканей с разным содержанием стеклянных и СВМПЭ волокон.

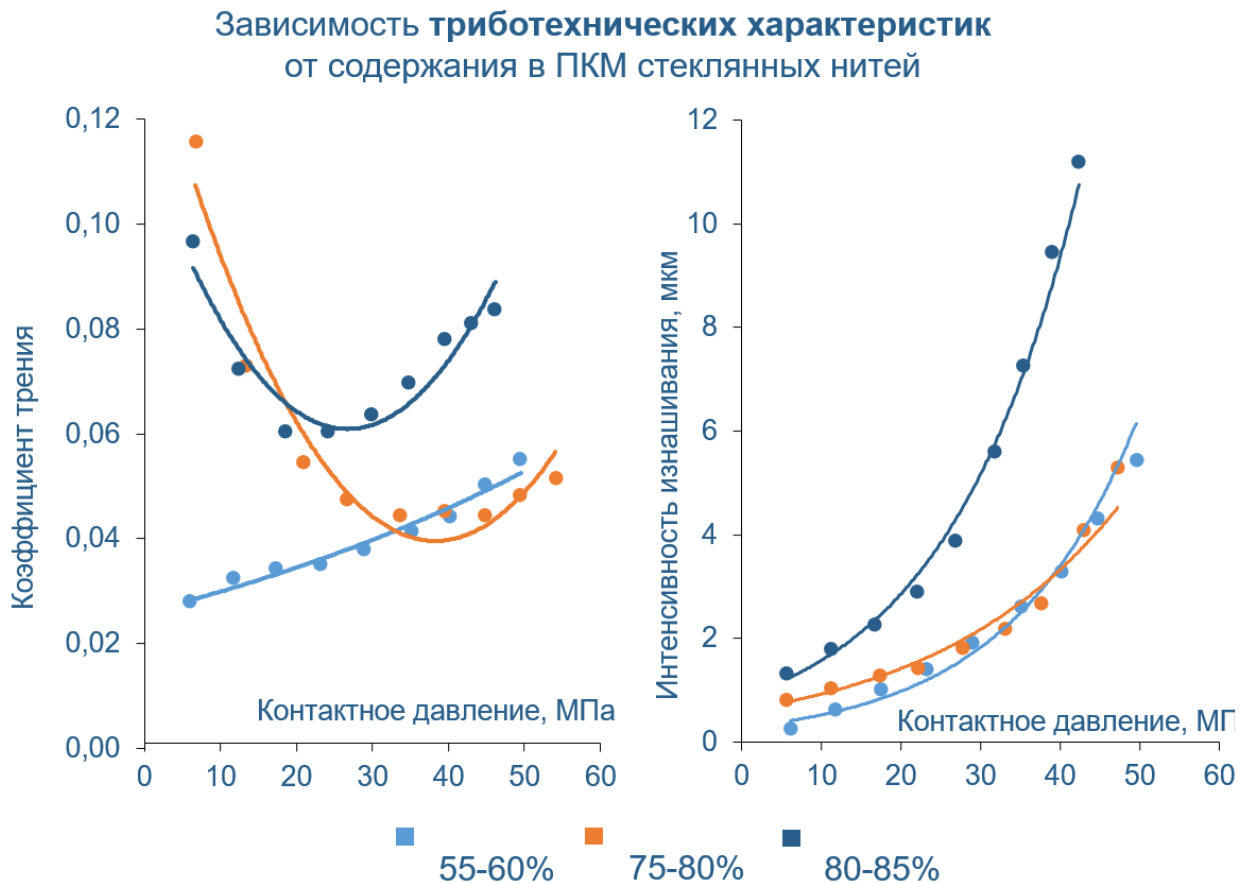


Рисунок 4.2 – Графики зависимости коэффициента трения и интенсивности изнашивания от давления гибридного материала марки ПЭСТ на основе трех гибридных армирующих тканей с разным содержанием стеклянных и СВМПЭ волокон.

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.

Установлено, что у образца с большим содержанием стеклянных волокон (80-85%) значительно снизились триботехнические характеристики, 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 был выбран

наиболее сбалансированный состав 2, который сочетает прочность, низкий коэффициент трения и высокую стойкость к изнашиванию.

4.2 Изготовление гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ на основе модифицированной эпоксидной матрицы ЭТ-4

Изначально для изготовления гибридных антифрикционных ПКМ была выбрана эпоксидная матрица ЭТ-2 с температурой отверждения 150°C. Как было установлено из термограммы дифференциально сканирующей калориметрии (рис. 4.3), уже при 130 °C происходит процесс плавления волокна СВМПЭ марки ПЭ-1 [82].

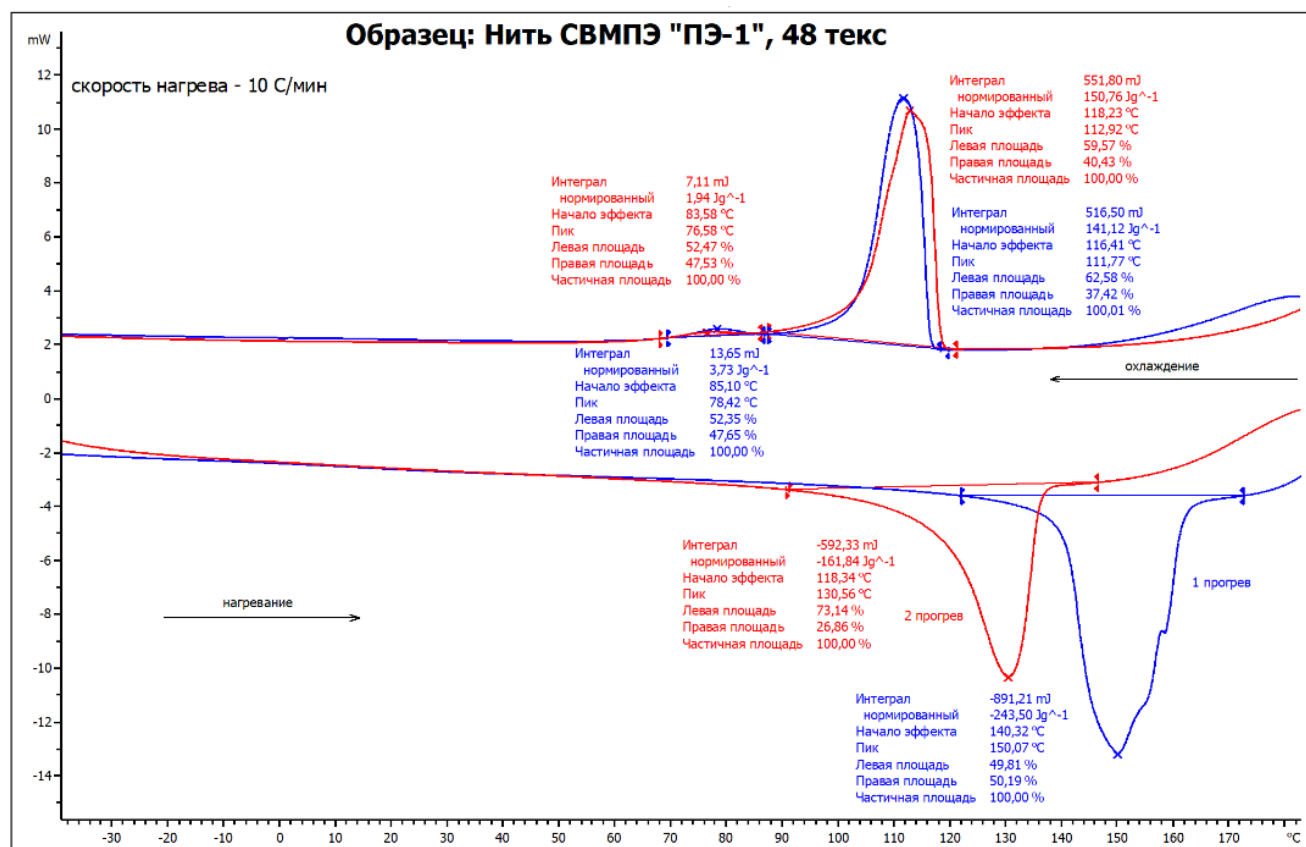


Рисунок 4.3 – Диаграмма фазовых переходов волокна СВМПЭ марки ПЭ-1 полученная в результате исследования методом дифференциально сканирующей калориметрии

В качестве новой эпоксидной матрицы была выбрана ЭТ-4 с возможностью отверждения до 120°C [82]. ЭТ-4 – связующее, пластифицированное активным разбавителем и низкомолекулярным полиамидо-полиаминным отвердителем. На рисунке 4.4 представлены графики зависимости температуры отверждения от времени ЭТ-2 и ЭТ-4.

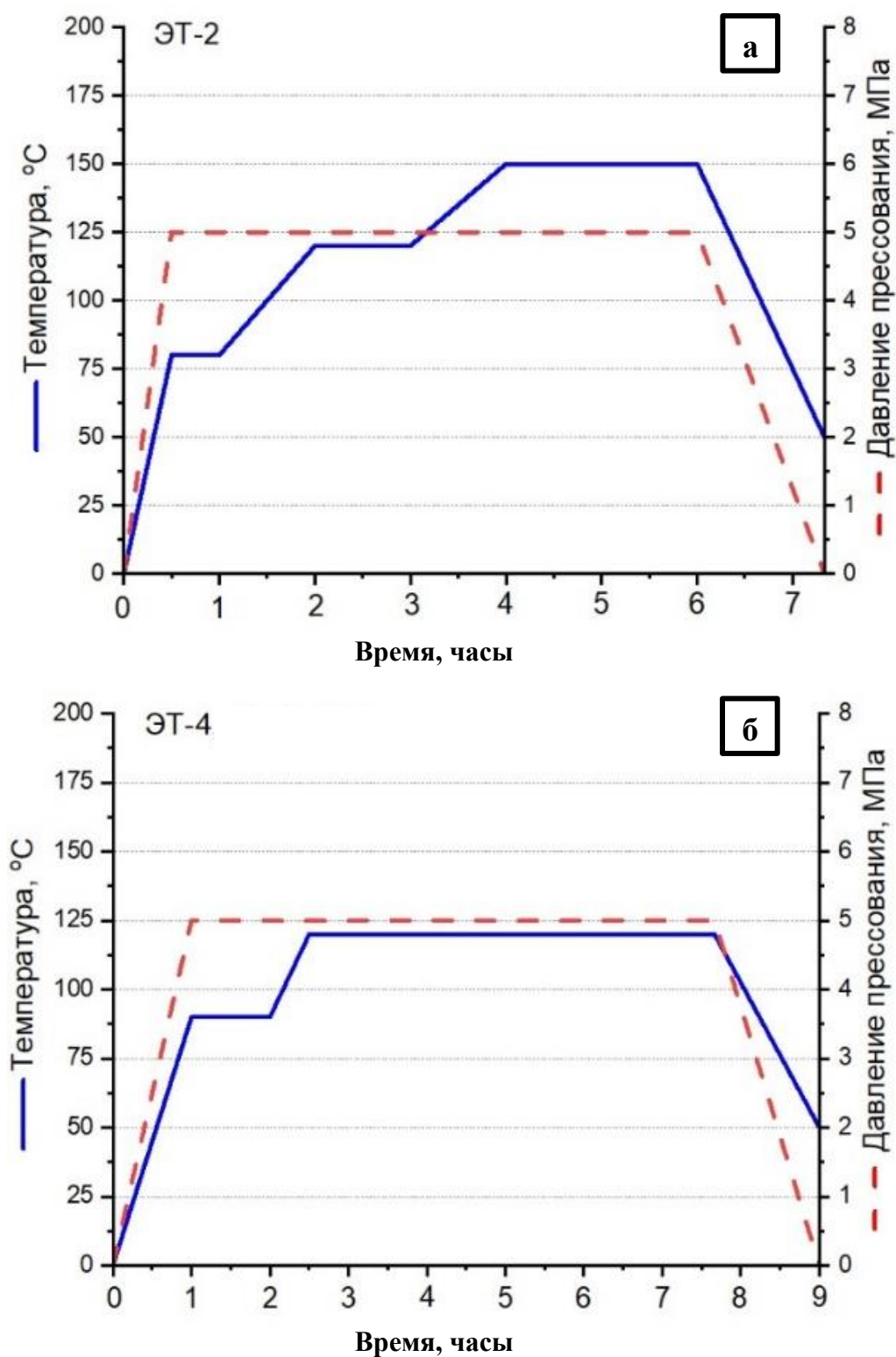


Рисунок 4.4 – Графики зависимости температуры отверждения от времени:
а) отверждение ЭТ-2; б) отверждение ЭТ-4

Роль модификаторов – повышение эксплуатационных свойств гибридных антифрикционных ПКМ в части физико-механических и триботехнических свойств. За счет увеличения длины связей снижается взаимодействие полярных

групп, что приводит к сегментальной подвижности цепных молекул. В результате этого сшитый полимер и композит на его основе приобретает повышенную пластичность, устойчивость к ударам, вибрациям и длительным нагрузкам, и как следствие, при трении увеличивается эффективная площадь контакта с контртелом, в результате чего снижается интенсивность изнашивания материала. Характеристики полимерных матриц без армирующего наполнителя приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Сравнительные характеристики эпоксидных матриц ЭТ-2 и ЭТ-4

Характеристики	Марка эпоксидного связующего	
	ЭТ-2	ЭТ-4
Предел прочности при сжатии, МПа	184	200
Коэффициент трения	0,10	0,07
Интенсивность изнашивания, мкм/км	17	19

Пластификация матрицы ЭТ-4 увеличивает показатель максимальной деформации при сжатии в два раза, при этом прочность увеличивается на 10%, а коэффициент трения снижается на 30%. Гибридный антифрикционный ПКМ марки ПЭСТ на основе модифицированной полимерной матрицы ЭТ-4 получил название ПЭСТ-4.

4.3 Изготовление гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ на основе СВМПЭ волокон, прошедших процесс активации поверхности

Как уже было сказано, материал марки 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 повышение прочностных характеристик материала

за счет применения гибридной армирующей ткани, прошедшей процесс активации поверхности СВМПЭ волокон.

Для активации СВМПЭ волокон был выбран известный способ воздействия барьерного разряда. На рисунке 4.5 представлены электронные микрофотографии исходного филамента волокна СВМПЭ и активированного в условиях низкочастотного разряда [87].

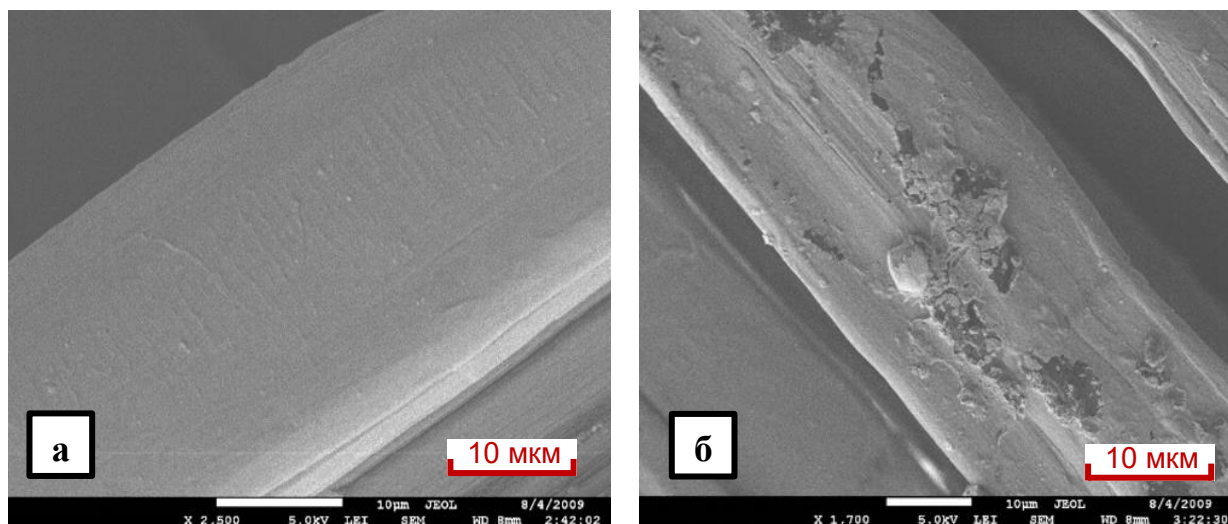


Рисунок 4.5 – Электронные микрофотографии: а) филамент волокна СВМПЭ до обработки; б) филамент волокна СВМПЭ после активации поверхности в условиях НЧ – разряда [88]

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 [87,88]. Данные обстоятельства являются главной причиной слабого межфазного взаимодействия.

Обработка СВМПЭ волокон в плазме низкочастотного разряда приводит к образованию на их поверхности кислородсодержащих полярных групп, которые обеспечивают повышение межфазного взаимодействия (адгезии) со связующим.

Гибридный антифрикционный ПКМ марки ПЭСТ на основе модифицированной полимерной матрицы ЭТ-4 и гибридной армирующей ткани,

которая прошла процесс активации волокон СВМПЭ получил название ПЭСТ-4 актив.

4.4 Исследование влияния модификации полимерного связующего и обработки поверхности волокон СВМПЭ на прочностные и триботехнические характеристики гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ

Лабораторные исследования проводились по уже описанным в главах 2 и 4 методикам испытаний.

Для изготовления образцов ПКМ применялась полимерная матрица ЭТ-4, а также гибридная армирующая ткань, прошедшая активацию СВМПЭ волокон. Изготовление контрольных плит из ПКМ осуществлялось методом горячего прессования в закрытой пресс-форме.

Для исследования физико-механических свойств образцов гибридных антифрикционных ПКМ были проведены испытания по определению разрушающего напряжения при сжатии, межслойном сдвиге и изгибающего напряжения при разрушении. Результаты лабораторных испытаний образцов гибридных антифрикционных ПКМ представлены в таблице 4.2 и на рисунке 4.6.

Таблица 4.2 - 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

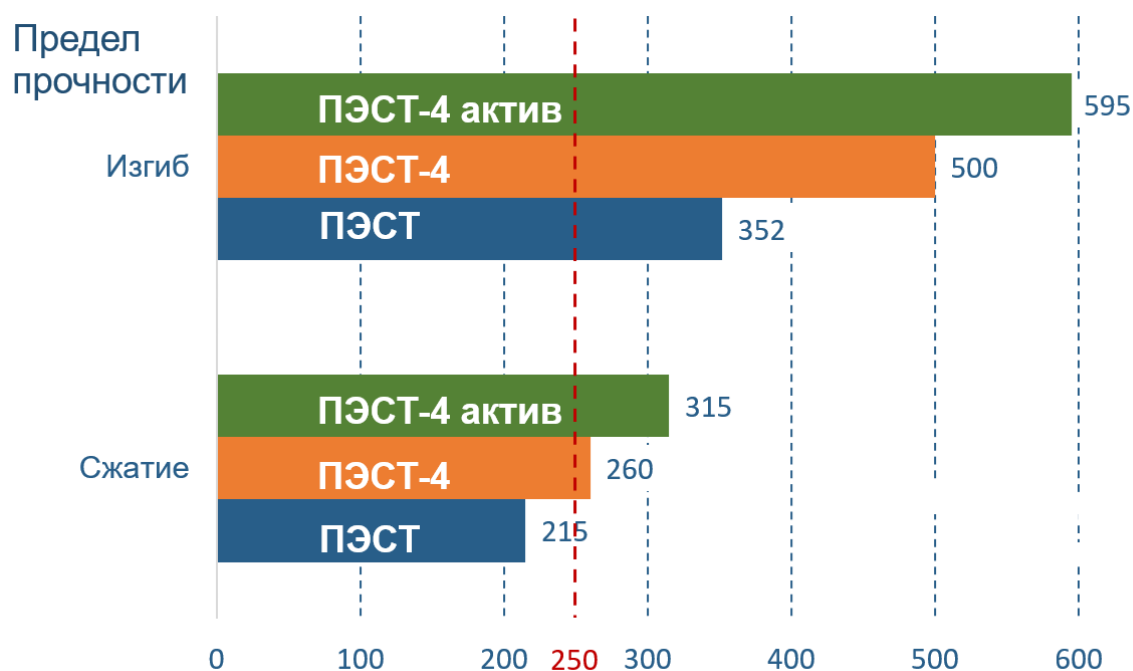


Рисунок 4.6 Результаты механических испытаний ПКМ марок ПЭСТ, ПЭСТ-4 и ПЭСТ-4 актив

Из результатов механических испытаний модифицированных ПЭСТ-4 и ПЭСТ-4 актив 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 выросла на 46%, при изгибе на 68% и при межслойном сдвиге на 36%.

Триботехнические испытания образцов ПЭСТ-4 и ПЭСТ-4 актив 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. Результаты триботехнических испытаний изображены в виде диаграмм на рисунке 4.7, фотографии области трения образцов приведены на рисунке 4.8.

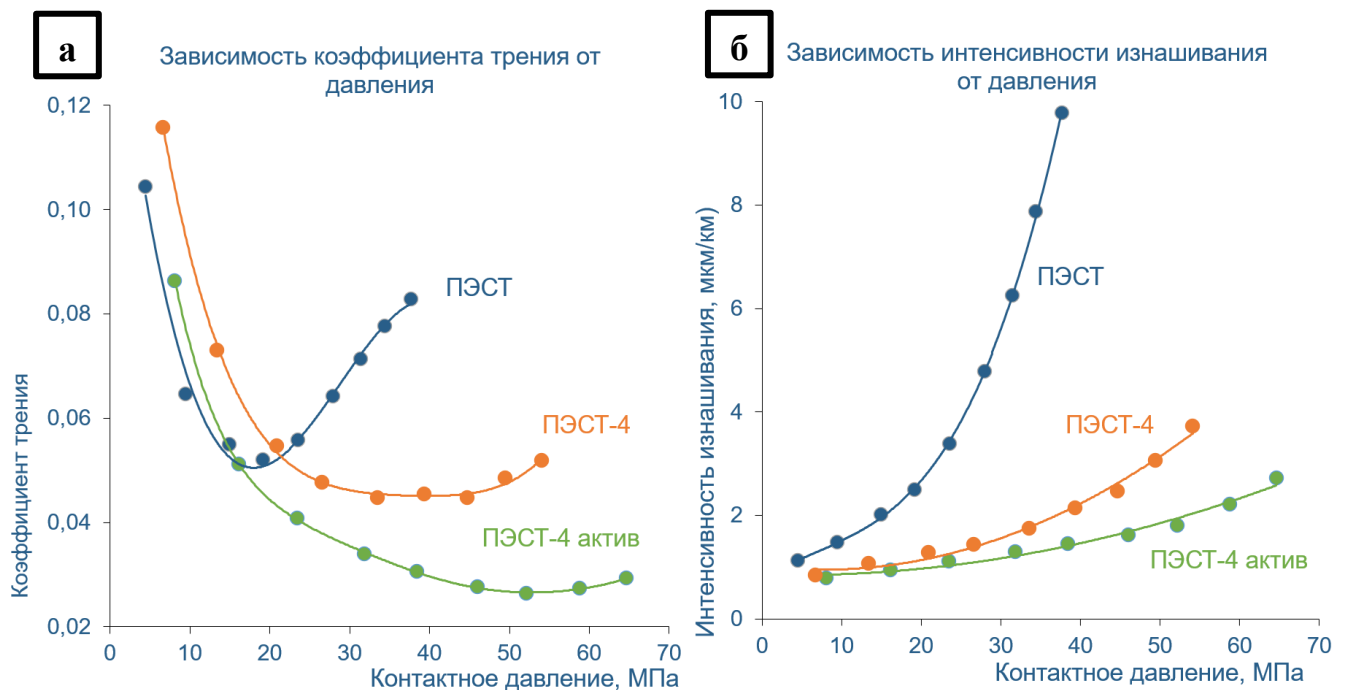


Рисунок 4.7 – Диаграммы триботехнических характеристик:
а) график зависимости коэффициента трения от давления; б) график зависимости интенсивности изнашивания от давления.

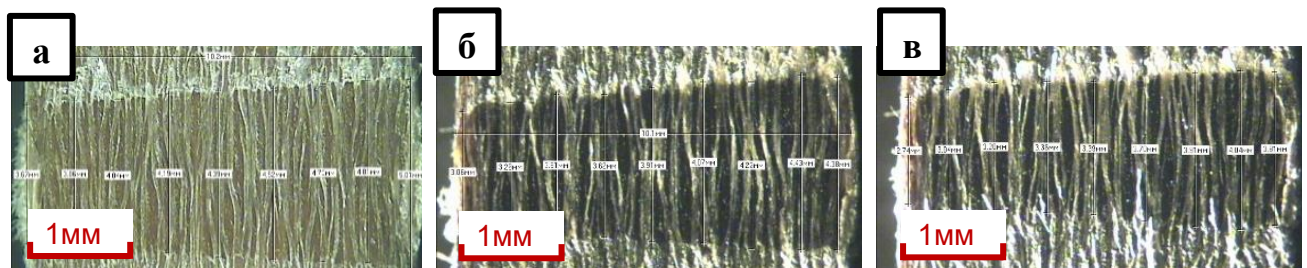


Рисунок 4.8 – Фотографии области трения образцов:
а) ПЭСТ канавка износа составила 4,27 мм; б) ПЭСТ-4 канавка износа составила 3,89 мм;
в) ПЭСТ-4 актив канавка износа составила 3,02 мм

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.

Выводы по главе 4

В четвертой главе представлены результаты оптимизации состава и технологических параметров изготовления гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ (на основе стеклянных волокон и волокон СВМПЭ), направленные на повышение его прочностных, триботехнических и эксплуатационных свойств.

1. На основе сравнения трёх вариантов гибридных тканей с различным соотношением стеклянных и СВМПЭ волокон установлено, что состав с содержанием стеклянных волокон 80% и СВМПЭ 20% (состав № 2) обеспечивает наилучший баланс свойств: прочность при сжатии не менее 250 МПа, низкий коэффициент трения (0,07 против 0,12 у УГЭТ при 30 МПа) и высокую износостойкость (интенсивность изнашивания 6 мкм/км против 12 мкм/км у УГЭТ). Увеличение доли СВМПЭ до 40% приводит к катастрофическому падению прочности при сжатии до 111 МПа (ниже, чем у ненаполненной матрицы), а увеличение содержания стеклянных волокон свыше 80% ухудшает триботехнические характеристики.

2. Применение обработки волокон СВМПЭ в низкочастотном плазменном разряде приводит к образованию на их поверхности кислородсодержащих полярных групп, что повышает поверхностную энергию с 30 ± 3 мДж/м² до значений, превышающих поверхностную энергию эпоксидной матрицы (40 ± 4 мДж/м²). Это обеспечивает улучшение смачивания и адгезии между СВМПЭ и связующим. В результате у образцов ПЭСТ-4 актив прочность при сжатии возрастает на 46–53% по сравнению с исходным ПЭСТ.

3. Замена исходной матрицы ЭТ 2 на матрицу ЭТ 4 с отверждением при 120 °С позволила избежать термической деструкции органических волокон. Матрица ЭТ-4, пластифицированная активным разбавителем и низкомолекулярным полиамидо-полиаминным отвердителем, показала наилучшие триботехнические свойства: коэффициент трения 0,07 (на 30% ниже, чем у ЭТ 2) при сохранении высокой прочности при сжатии (200 МПа).

4. Установлено, что наилучшие результаты достигнуты для материала ПЭСТ-4 актив (матрица ЭТ 4 + активированная плазмой гибридная ткань):

прочность при сжатии 315 МПа (на 46% выше исходного ПЭСТ), прочность при изгибе 595 МПа (на 69% выше), прочность при межслойном сдвиге 34,1 МПа (на 34% выше). Триботехнические испытания показали, что применение ЭТ-4 снижает коэффициент трения на 40% по сравнению с исходным ПЭСТ и в 5 раз уменьшает интенсивность изнашивания при контактном давлении 30 МПа.

В таблице 4.3 Приведены сравнительные характеристики гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4 и антифрикционного ПКМ марки УГЭТ, который на данный момент используется в узлах трения с высокими нагрузками (до 60 МПа)

Таблица 4.3 Сравнительные характеристики материалов ПЭСТ-4 и УГЭТ.

Наименование характеристики	ПЭСТ-4 *	УГЭТ **
Плотность, г/см ³	1620	1430
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа	250	250
Изгибающее напряжение при разрушении, МПа	450	250
Разрушающее напряжение при межслойном сдвиге, МПа	28	30
Коэффициент трения при смазке водой по стали 20Х13 и конт. давл. 30 МПа	0,07	0,12
Интенсивность изнашивания при смазке водой и конт. давл. 30 МПа I _h (мкм/км)	6	12
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м	$7,0 \times 10^{13}$	$1,5 \times 10^2$
Водопоглощение в прес. воде за 24 часа, %	0,06	0,04
Водопоглощение в прес. воде за 168 часов, %	0,10	0,60
* среднее значение из ТУ 28.15.39-268-07516250-2022		
** среднее значение из ТУ 5.966-11704-99		

ГЛАВА 5 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПКМ НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ ТКАНЕЙ

В пятой главе представлены результаты разработки технологии изготовления гибридных антифрикционных ПКМ на основе эпоксидной матрицы ЭТ-4 с возможностью отверждения при 120°C, основанной на технологии изготовления углепластика УГЭТ, включающей операции (Рис.5.1):

- Приготовление связующего
- Пропитка армирующей ткани
- Намотка (втулка) или укладка (плита) препрега
- Горячее прессование
- Механическая обработка



Рисунок 5.1 Принципиальная схема технологического процесса изготовления армированных антифрикционных ПКМ.

Технологический процесс изготовления углепластика УГЭТ включает процесс сушки препрега при температуре до 130°C и горячее прессование при 150°C. Данные температуры являются недопустимыми для применения в технологии изготовления гибридного антифрикционного ПКМ с содержанием СВМПЭ волокон. Таким образом, снижение температуры пропитки и прессования повлекло за собой изменения технологических параметров данных процессов [89,90,91,92].

В ходе разработки технологии изготовления гибридных антифрикционных ПКМ экспериментальным путем были определены технологические параметры

пропитки, горячего прессования и особенности механической обработки, которые позволили получить качественные ПКМ с содержанием органических волокон из СВМПЭ:

- Скорость пропитки от 0,5 до 1 м/мин
- Температура в сушильной камере до 100°C
- Содержание связующего (42 – 46) % при плотности лака 1,075 кг/м³
- Температура прессования до 120°C
- Давление прессования 1-5 МПа
- Время отверждения от 5 до 9 часов

5.1 Оптимизация технологии пропитки

Изготовление препрега проводилось на территории НИЦ «Курчатовский институт – ЦНИИ КМ «Прометей». Пропитка армирующих материалов эпоксидным связующим ЭТ-4 происходила растворным методом на вертикальной пропиточно-сушильной машине УПСТ-1000, принципиальная схема которой приведена на рисунке 5.2. С целью оптимизации процесса изготовления гибридных антифрикционных ПКМ экспериментальным путем отработаны режимы пропитки с ограниченными температурными режимами для предотвращения деструкции органических волокон. Основной задачей при оптимизации технологии пропитки гибридной армирующей ткани стало недопущение деструкции волокон из СВМПЭ, которые начинают менять свои линейные размеры и свойства при 120° С. Для сравнения, при пропитке стеклянной или углеродной ткани температура сушильной камеры доходит до 130° С. Снижение температур в сушильных камерах влечет за собой снижение скорости испарения растворителя с поверхности ткани, и как следствие брак препрега.

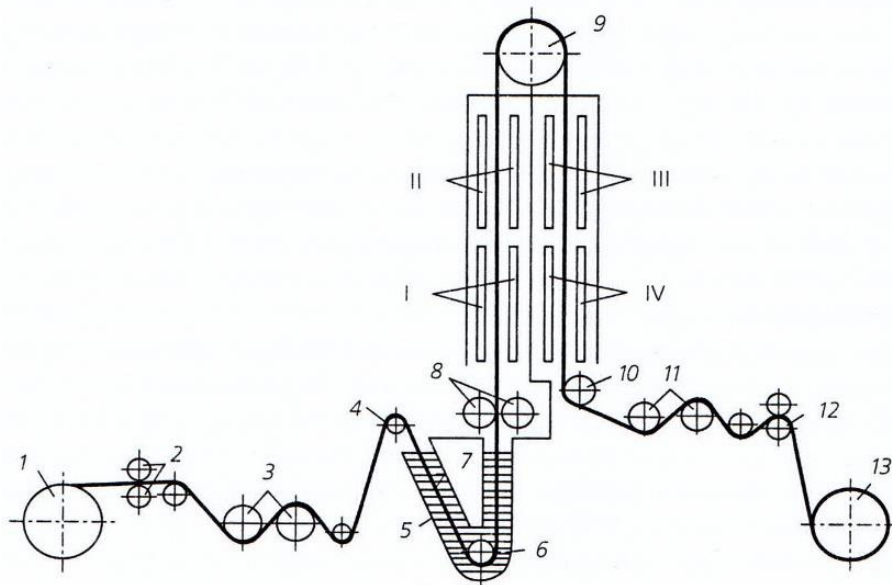


Рисунок 5.2– Схема вертикальной пропиточной машины.

1 – рулон ткани; 2, 4, 6, 9, 10, 12 – направляющие валики; 3 – обогреваемые валики; 5 – пропиточная ванна; 7 – подогреватель; 8 – отжимные валки; 11 – охлаждающие валики; 13 – рулон полуфабриката

Механизм пропиточной машины позволяет регулировать скорость протяжки ткани и температуру в сушильных камерах, что позволило настроить режим пропитки для получения качественного препрега из гибридной армирующей ткани.

Для начала пропитки рулон гибридной армирующей ткани 1 устанавливают на размоточном устройстве пропиточной машины, а пропиточную ванну 5 заполняют приготовленным заранее пропиточным лаком. Полотно ткани с рулона 1, установленного на валик с тормозным устройством, проходит направляющие валики 2 с резиновой обкладкой и отдельным приводом, обогреваемые валики 3, направляющие валики 4 и погружается в ванну 5 с раствором смолы, нагретым подогревателем 7.

Для предотвращения испарения растворителя и повышения вязкости лака в ванне насосом создается непрерывная циркуляция раствора. На выходе из ванны пропитанная ткань проходит через зазор между валками 8 для отжима избытка смолы.

Пропитанная ткань после отжима поступает в сушильную часть машины. По значению температуры горячего циркулирующего воздуха, нагнетаемого через перфорированные трубы, сушильное отделение подразделяется на четыре зоны (I – IV). В зоне I из ткани удаляется часть растворителя по всей толщине слоя смолы. В зоне II из перегретой ткани испаряется значительное количество растворителя и побочные продукты поликонденсации. После огибания обогреваемого направляющего валика 9, покрытого фторопластом-4, ткань поступает в зону III с наиболее высокой температурой и затем в зону IV с более низкой температурой. Общий путь ткани в сушильных камерах достигает 20м (по 5м в каждой зоне).

Высушенный препрег, огибая охлаждаемый водой валик 10, проходит охлаждающие валики 11, разглаживающие валики с резиновой обкладкой 12 и вместе с полиэтиленовой пленкой (или без нее) сматывается в рулон 13.

При процессе сушки связующее частично (10 – 20 %) переходит в резитольное состояние. Содержание связующего и растворителя в препреге после сушки составляет 45 – 55% и 0,2 – 8% соответственно.

Опытным путем была выбрана температура сушильных камер, которая не влияла на конечные свойства армирующих волокон из СВМПЭ, а также подобрана скорость подачи гибридной ткани, которая обеспечивала оптимальное содержание растворителя в препреге:

- Скорость подачи ткани (частота): 0,5 - 1 м/мин;
- Температура камеры подсушки ткани: без подсушки;
- Температура сушки в зоне I: 95 °С;
- Температура сушки в зоне II: 100 °С;
- Температура сушки в зоне III: 100 °С;
- Температура сушки в зоне IV: 100 °С.

Определение растворимой части связующего и содержания летучих веществ. проводилось по методике, описанной в главе 2. В таблице 5.1 представлены результаты изменений содержания связующего.

Таблица 5.1 – Результаты измерений содержания связующего

Препрег после пропитки			
№ образца	масса связ. + арм., г	масса арм., г	содержание связующего, %
1	6,714	3,705	44,8
2	6,771	3,760	44,5
3	6,954	3,755	46,0
4	6,692	3,653	45,4
5	6,656	3,601	45,9
Препрег после 24-х часов при комнатной температуре			
1	6,565	3,712	43,5
2	5,317	4,797	9,8
3	6,913	3,981	42,4
4	6,687	3,866	42,2
5	7,707	4,744	38,4

Как можно наблюдать из таблицы – после выдержки образцов в течение 24 часов при комнатной температуре все образцы за исключением одного, имеют, в среднем, потерю связующего от 2% до 3 %. В образце № 2 уже начался процесс полимеризации. Вид образцов представлен на рисунке 5.3.

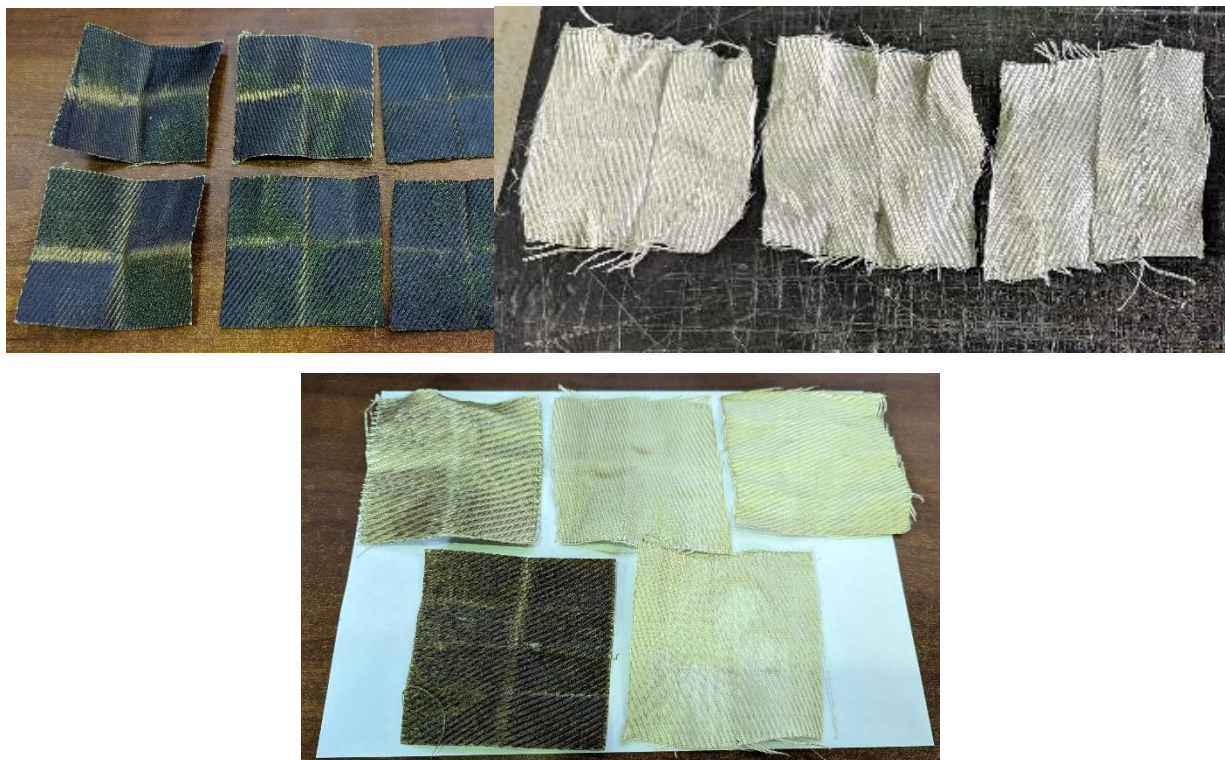


Рисунок 5.3 – Образцы препрегов во время определения растворимой части

В таблице 5.2 представлены результаты измерений содержания летучих веществ.

Таблица 5.2 – Результаты измерений содержания летучих веществ.

Препрег после пропитки			
№ образца	масса связ. + арм., г	масса арм., г	содержание летучих веществ, %
1	6,896	6,864	0,46
2	6,920	6,890	0,43
3	6,823	6,795	0,41
4	6,933	6,912	0,30
Препрег после 24-х часов при комнатной температуре			
1	7,460	7,445	0,20
2	8,940	8,921	0,21
3	8,675	8,675	0,00
4	6,534	6,534	0,00
5	6,704	6,704	0,00

Анализируя результаты определения растворимой части связующего, можно сделать вывод, что на второй день хранения препрега при комнатной температуре содержание летучих снижается более, чем в 2 раза.

С учетом проведенных исследований рекомендуется хранить пропитанный препрег исключительно в холодильной камере. Относительное содержание связующего при этом составляет 42 – 46 % при плотности лака 1,1 кг/м³.

5.2 Оптимизация технологических параметров прессования

Для корректировки режима термообработки была исследована температурная кривая при полимеризации и термообработке эпоксидного связующего ЭТ-4, разработанного специально для отверждения при 120°C. [90]

В ходе исследования лабораторные образцы (рисунок 5.4) постепенно нагревались в камере от 75 °С до 120 °С. Регистрация температуры осуществлялась многоканальным устройством «ТЕРЕМ-3» и термопарами хромель-капель.

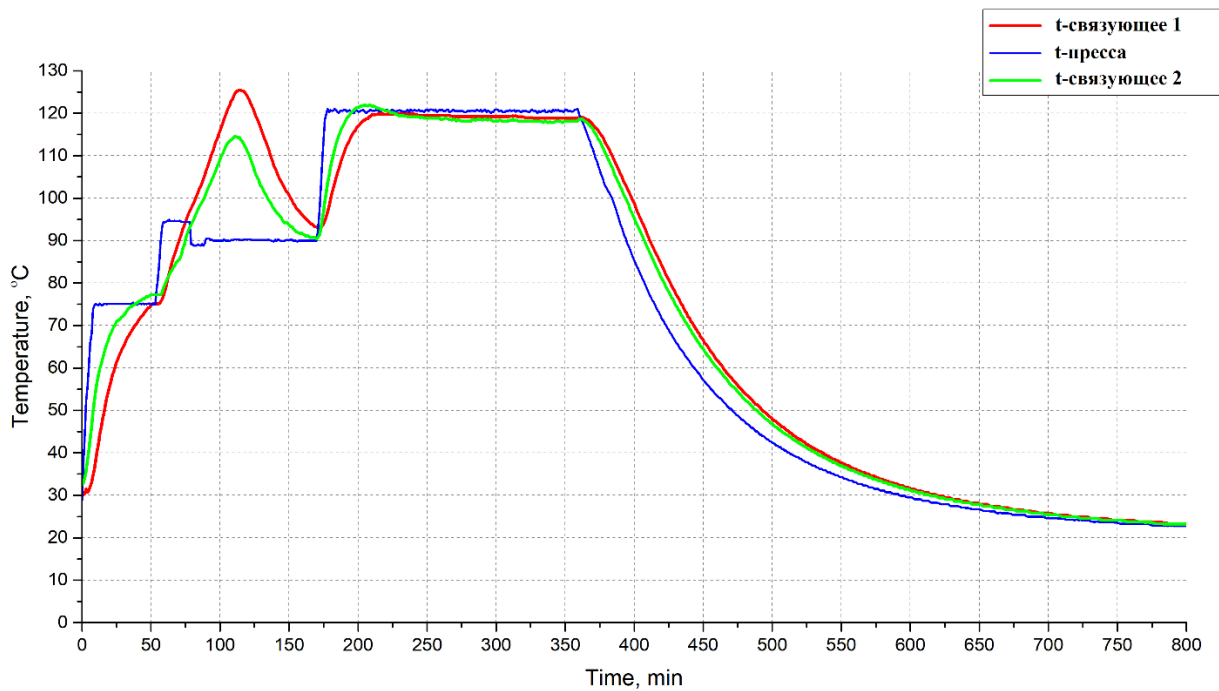


Рисунок 5.4 – График зависимости температура – время отверждаемых образцов эпоксидной матрицы ЭТ-4 двух составов

По диаграмме экзотермы был сделан вывод, что через 75 минут после начала нагрева начинается процесс полимеризации с экзотермическим эффектом, длительность которого в среднем 100 минут. Далее до следующей ступени подъема температуры и термической обработки при 120 °C экзотермического эффекта не наблюдается. Температура стеклования отвержденных образцов полимерной матрицы при этом составляла 160 ± 5 °C [67].

Таким образом, для исключения плавления волокон СВМПЭ из-за экзотермической реакции при отверждении связующего ЭТ-4 была принята ступенчатая схема нагрева образцов гибридных антифрикционных ПКМ.

Изготовление гибридных антифрикционных ПКМ методом горячего прессования проходило в НИЦ «Курчатовский институт – ЦНИИ КМ «Прометей» на гидравлических прессах РНМ-250. Общий вид пресса и процесса прессования представлены на рисунке 5.5.

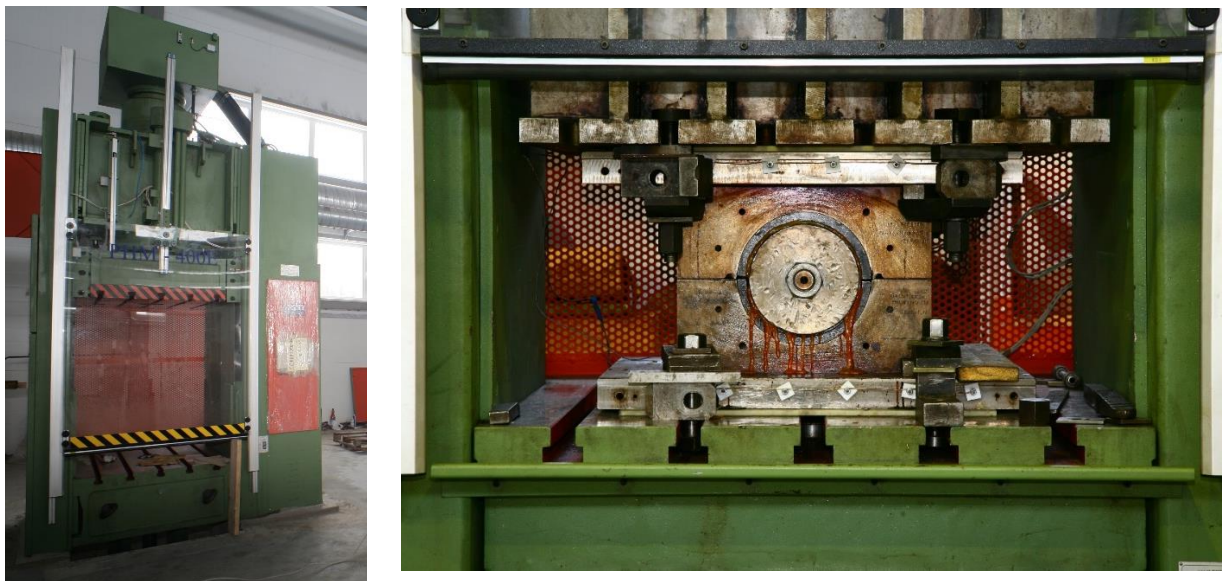


Рисунок 5.5 – а) Внешний вид пресса РНМ-250; б) процесс прессования.

Для получения заготовок в виде плит препрег укладывается в пресс-форму и помещается в пресс, где под воздействием температуры и давления происходит отверждение полимерной матрицы. От температуры прессования зависит время отверждения полимерной матрицы и физико-механические свойства ПКМ. Так как при превышении температуры прессования 130°C происходит плавление волокон СВМПЭ, был оптимизирован процесс прессования гибридных антифрикционных ПКМ с понижением температуры прессования и увеличением времени прессования без потери прочностных свойств.

5.3 Особенности механической обработки гибридного антифрикционного ПКМ на основе стеклянных и СВМПЭ волокон

Процесс получения подшипников скольжения из гибридного антифрикционного ПКМ прессованием не всегда может обеспечить заданные параметры качества поверхности, необходимые для готовых деталей трения. Следовательно, для достижения требуемых параметров необходимо провести дополнительные технологические операции, например, механическую обработку резанием. В ряде случаев к деталям пар трения, выполненным из ПКМ, предъявляются жесткие требования: допуски на размеры должны быть выполнены по 6 – 7 квалитетам, взаимное расположение поверхностей (соосность,

радиальное биение до 0,05 мм), микрогеометрия поверхности (шероховатость от 0,4 до 0,1 мкм по параметру R_a , волнистость до 1500 мкм по параметру W_{max}). [67]

Физико-химические и физико-механические свойства гибридного антифрикционного ПКМ на основе стеклянных и СВМПЭ волокон в значительной степени отличаются от металлов, традиционно обрабатываемых резанием, и затрудняют процесс механической обработки. Специфические особенности полимерной матрицы и ее низкая теплопроводность отрицательно влияют на условия работы режущего инструмента, а также на результат механической обработки, приводят к увеличению площади контакта и сил трения между задней поверхностью инструмента и обработанной поверхностью заготовки.

В основном, износ инструмента при обработке ПКМ марки ПЭСТ происходит по задней поверхности вследствие упругого восстановления материала после прохождения режущего клина (рисунок 5.6). Износ по передней поверхности инструмента незначителен и является следствием абразивного износа разрушаемого материала заготовки, а также трения стружки по передней поверхности и значительных температур в зоне резания [94].



Рисунок 5.6 – Упругое восстановление материала

Традиционные способы механической обработки, применимые для заготовок из металлов, сопровождающиеся снятием стружки как лезвийными, так и абразивными инструментами, не удовлетворяют заданным параметрам точности и качества поверхности. Это связано со специфическими свойствами

разработанных ПКМ, их отличием от традиционных металлических конструкционных и антифрикционных материалов.

В отличие от металлов ПКМ, армированный гибридной тканью, имеет слоистую структуру. Таким образом в процессе резания инструмент встречает на своем пути поочередно жёсткую, но при этом хрупкую полимерную матрицу, прочное стеклянное волокно и пластичное (вязкое) волокно СВМПЭ. Данный процесс вызывает колебательную ударную нагрузку на инструменте, что приводит к увеличенному износу инструмента и ухудшению качества обрабатываемой поверхности. Также стеклянные волокна, входящие в состав ПКМ, вызывают абразивный износ режущей кромки инструмента [94].

СВМПЭ волокна имеют низкую адгезию к полимерной матрице, что при механической обработке приводит к выходу волокон на обработанную поверхность. Таким образом поверхность имеет ворсистый вид, что показано на рисунке 5.7.



Рисунок 5.7 – Поверхность подшипника при обработке поперек слоев армирования

Так как СВМПЭ вязкий, его практически невозможно резать лезвийным инструментом. На производстве ЦНИИ КМ «Прометей» во время экспериментальной отработки технологических параметров резания был найден способ добиться качественной поверхности с низкой шероховатостью поверхности. Для обеспечения удовлетворительного качества поверхности была введена дополнительная операция по шлифованию на высоких оборотах.

В процессе шлифования температура в зоне контакта инструмента и обрабатываемой поверхности превышает температуру плавления СВМПЭ и волокна, которые выступают на обработанную лезвийным инструментом поверхность, плавятся и заполняют микрошероховатость материала. Излишки СВМПЭ снимаются с поверхности абразивным инструментом. На рисунке 5.8 показана фотография подшипника в виде шара после шлифовальной операции.

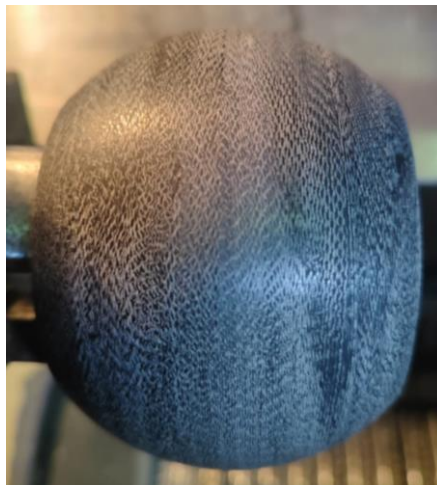


Рисунок 5.8 – Поверхность подшипника после шлифования.

Также было исследовано влияние СОЖ на качество обработанной поверхности. Сразу же после обработки, пока поверхность смочена СОЖ и волокна СВМПЭ приглажены к поверхности за счет поверхностного натяжения жидкости, создается впечатление, что поверхность чистая и лишена дефектов, но после высыхания поверхность также ворсится, что показано на рисунке 5.9.

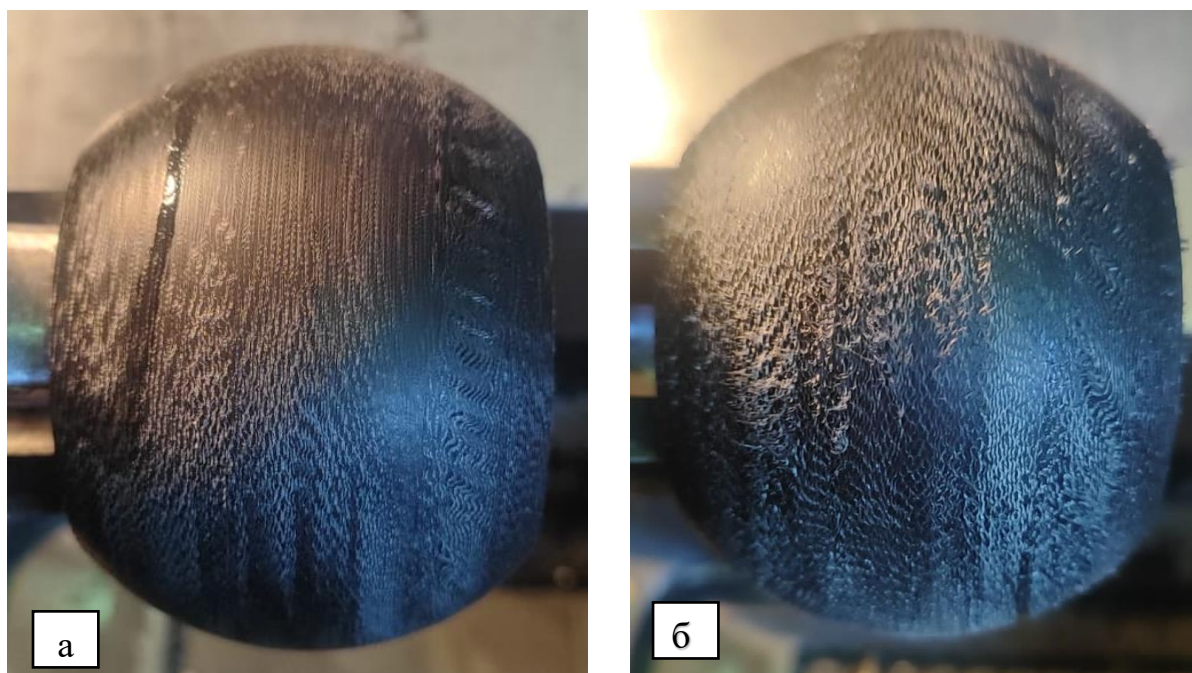


Рисунок 5.9 – Поверхность после лезвийной обработки с СОЖ:

а) после обработки; б) после высыхания СОЖ

При лезвийной обработке вдоль слоев армирования процессы, происходящие на поверхности обработки схожи с первым случаем, но также существует риск срыва армирующего слоя при обработке в случаях, когда глубина резания совпадает с толщиной препрега, а направление армирования направленно вдоль поверхности механической обработки. [94]

Выводы по главе 5.

В пятой главе представлены результаты разработки и оптимизации технологического процесса изготовления гибридных антифрикционных ПКМ на основе стеклянных и органических волокон СВМПЭ.

Разработана полная технологическая схема изготовления изделий из гибридного антифрикционного ПКМ, включающая:

- Приготовление связующего
- Пропитка армирующей ткани
- Намотка (втулка) или укладка (плита) препрега
- Горячее прессование

- Механическая обработка

1. Оптимизирована технология пропитки на вертикальной пропиточно сушильной машине УПСТ 1000. Установлено, что традиционные режимы сушки (температура до 130 °С) приводят к термической деструкции волокон СВМПЭ (температура плавления 130 °С, начало изменения свойств при 120 °С). Экспериментально подобраны щадящие режимы: 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.

2. Оптимизированы параметры горячего прессования. Для предотвращения плавления СВМПЭ применена полимерная матрица ЭТ-4, с возможностью отверждения при температуре 120 °С. По данным термометрического анализа, экзотермическая реакция полимеризации начинается через 75 минут и длится около 100 минут.

3. Выявлены особенности механической обработки гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ. Предложен эффективный финишный метод обработки – шлифование на высоких оборотах. Показано, что при шлифовании локальный разогрев зоны контакта превышает температуру перехода СВМПЭ в высокоэластичное состояние. Торчащие волокна оплавляются и вдавливаются в поверхность, а излишки удаляются абразивом, что позволяет достичь требуемую шероховатость и устранить ворсистость. Данный метод рекомендован для получения чистовых поверхностей подшипников скольжения. Состав, основные результаты исследований и описание процесса создания гибридных антифрикционных полимерных композиционных материалов приведены в патенте №2823387 [95].

ГЛАВА 6 СТЕНДОВЫЕ ИСПЫТАНИЯ И ВНЕДРЕНИЕ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ИЗ ГИБРИДНОГО АНТИФРИКЦИОННОГО ПКМ МАРКИ ПЭСТ-4

В шестой главе представлены результаты стендовых испытаний подшипников скольжения, изготовленных из разработанного гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4, в условиях, максимально приближённых к реальной эксплуатации рулевых устройств и механизмов морской техники. Также в главе показано внедрение гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4 в устройство имитации рулевых приводов перекладки ЦАКИ.441431.017. Данное устройство предназначено для испытаний серийных рулевых машин и отработки рулей перспективных конструкций.

Устройство для испытаний малогабаритных подшипников ЦАКИ.441192.001 представляет собой имитатор опоры вращения с изменяемыми параметрами скорости вращения и величины прилагаемой нагрузки.

Устройство обеспечивает контактное давление во время испытаний до 60 МПа, с возможностью кратковременной работы (продолжительность включения до 10 мин) с созданием контактного давления до 90 МПа при наличии смазки и скорости скольжения не более 0,1 м/с. Диапазон настраиваемых скоростей скольжения от 0,03 м/с до 5 м/с. Общий вид устройства для испытаний малогабаритных подшипников ЦАКИ.441192.001 приведен на рисунке 6.1.

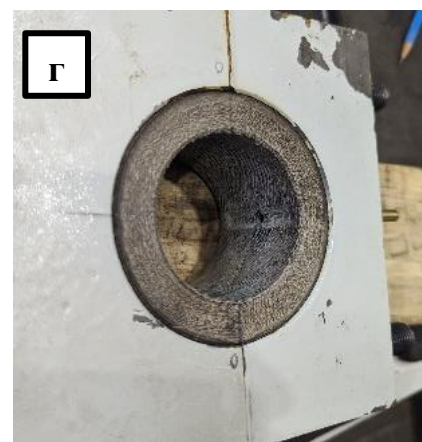
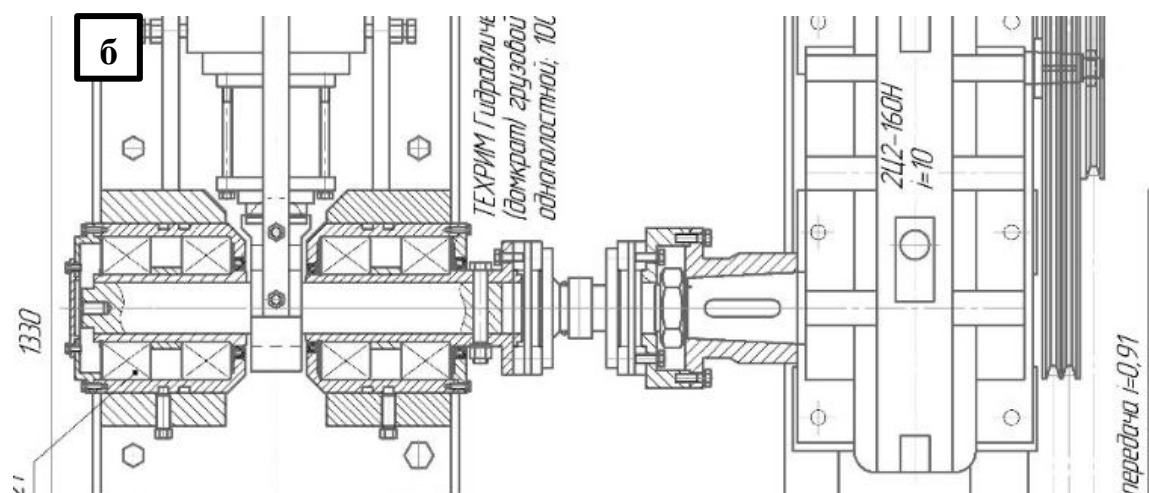


Рисунок 6.1 – Устройство для испытаний малогабаритных подшипников скольжения: а) общий вид станда; б) эскиз станда; в) вал для испытаний; г) хомут-держатель с подшипником

6.1 Изготовление опытных образцов подшипников скольжения

Для проведения стендовых испытаний образцов подшипников скольжения в ЗАО «ЦНИИ СМ» на опытном производстве НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» методом горячего прессования пресс-материалов была изготовлена опытная партия заготовок в виде втулок из гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4. На рисунке 6.2 показан эскиз и фотография опорного подшипника скольжения для стендовых испытаний.

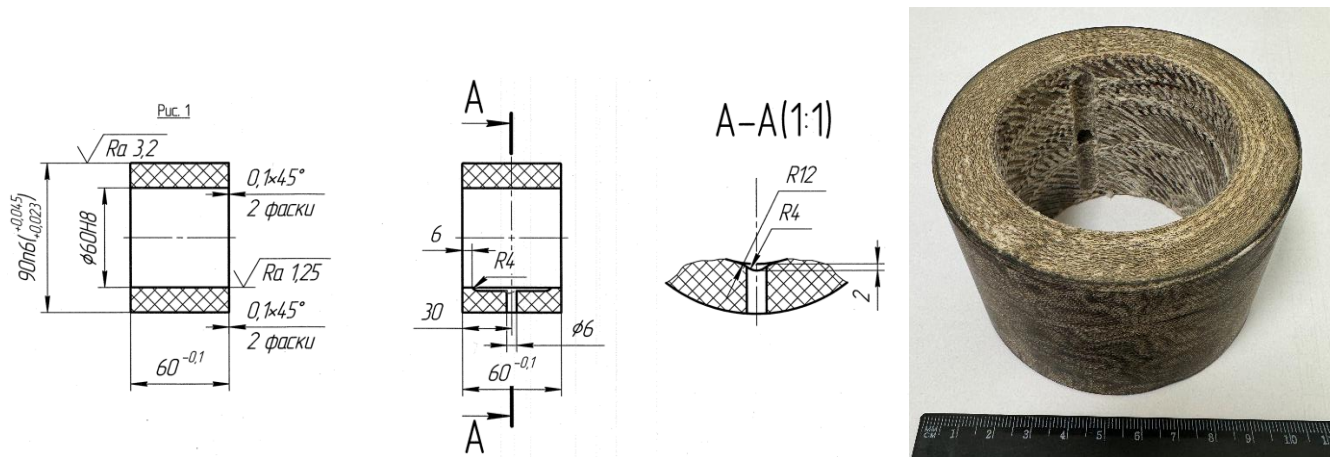


Рисунок 6.2 - Эскиз опорного подшипника скольжения из антифрикционного ПКМ

6.2 Результаты стендовых испытаний опорных малогабаритных подшипников скольжения из гибридного антифрикционного ПКМ

В ходе испытаний были испытаны опорные малогабаритные подшипники скольжения в виде втулки из гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4 на стендах имитаторах по программе и методике испытаний ЗАО «ЦНИИ СМ» ЦАКИ.441199.001 ПМ.

Условия испытаний:

- контактное давление 12 МПа, 60 МПа;
- скорость скольжения 0,5 м/с и 1 м/с;
- продолжительность испытаний 50 часов;
- материал вала сталь 45 ГОСТ 1050-2013 с хромовым покрытием по ОСТ5.9048-96.

На паре трения с хромированной сталью (твердость 60-69 HRC) при испытаниях на пути трения до 50 км при работе в различных сочетаниях нагрузок материал показывал стабильно хорошие результаты по показателям крутящего момента и установившейся температуры. Интенсивность изнашивания не превышала 3 мкм/км. На поверхностях контртел по результатам испытаний не выявлено заметных следов износа. Работа на хромированных образцах сопровождалась появлением эффекта «заполировки». На рисунке 6.3 приведены фотографии втулок из гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4 и вала с хромированным покрытием после испытаний.

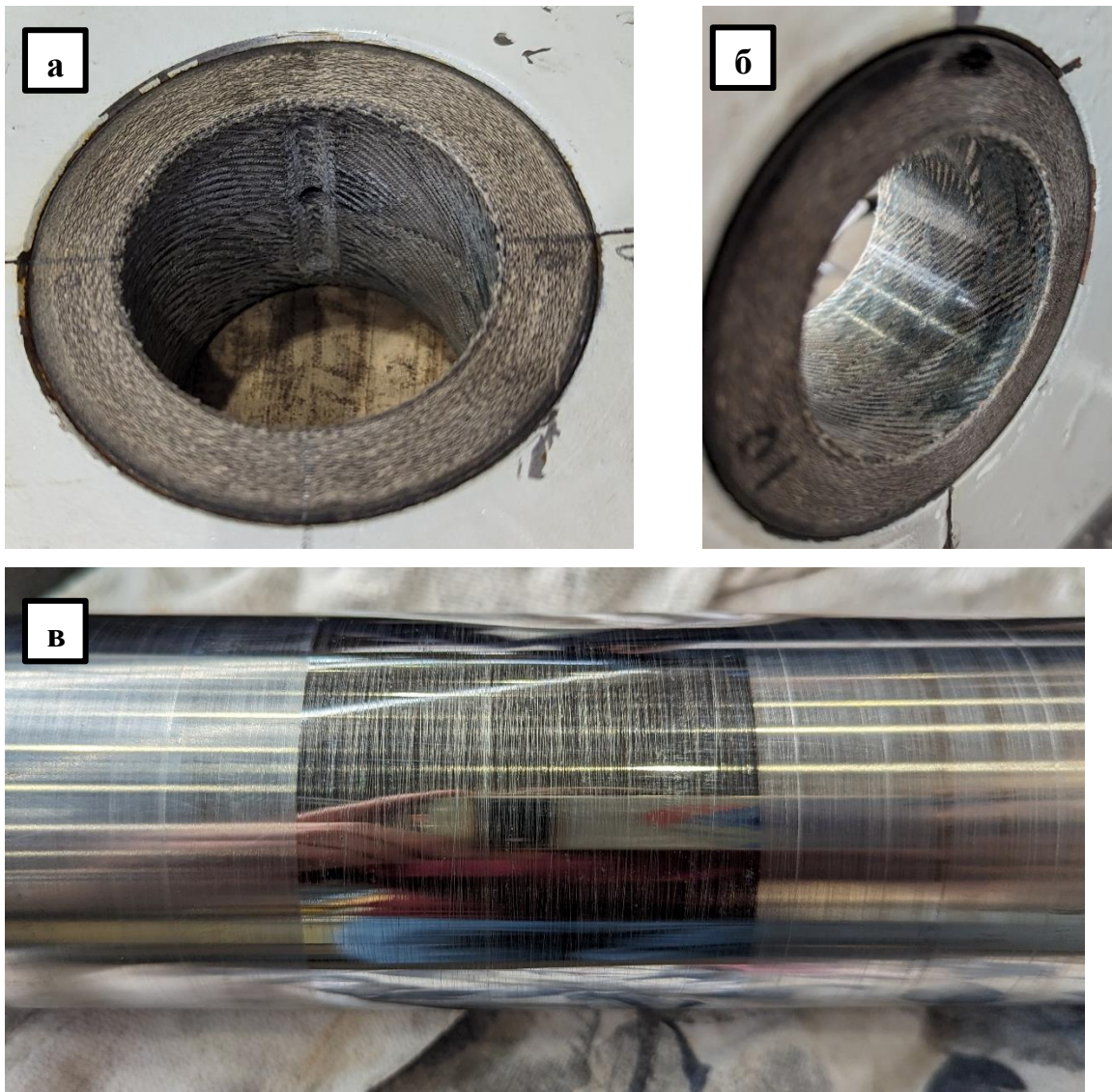


Рисунок 6.3 - Внешний вид пары трения после испытаний:
а) Втулка из материала ПЭСТ-4 до испытаний; б) Втулка из материала ПЭСТ-4 после испытаний; в) Хромированный вал после испытаний.

На паре трения Втулка из ПЭСТ- 4 и вал из стали с покрытием из бронзы БрАМц9-2 (твердость 156 НВ) при контактном давлении 60 МПа и скорости скольжения 0,1 м/с наблюдался высокий момент трения, что привело к перегреву втулки и задиру вала. На рисунке 6.4 приведены фотографии втулок из гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4 и вала с покрытием из бронзы после испытаний.

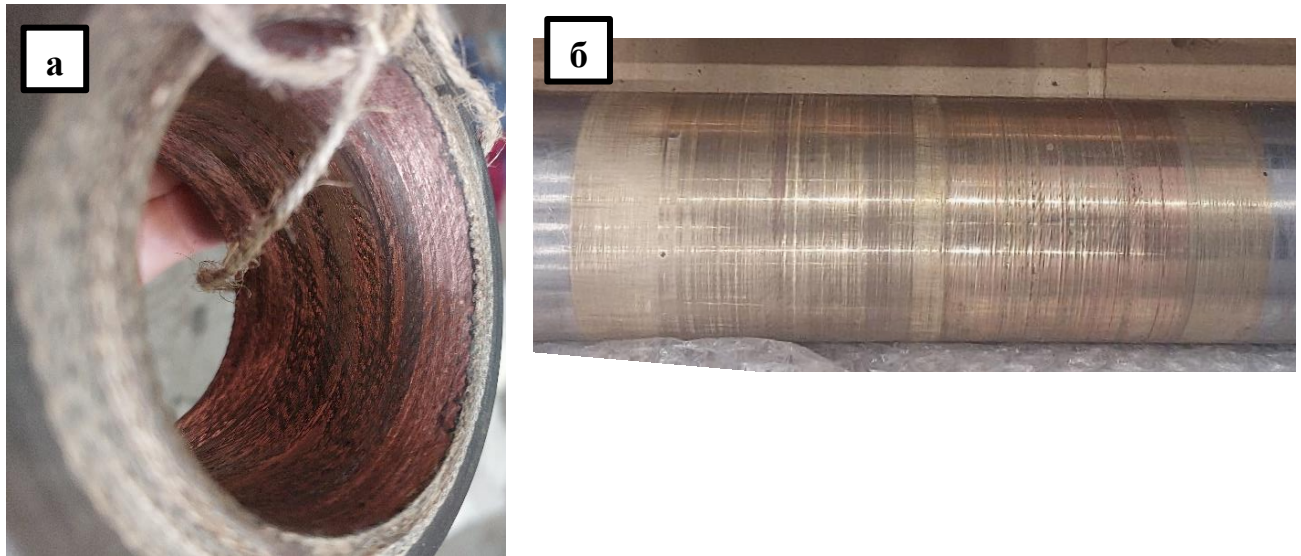


Рисунок 6.4 - Внешний вид пары трения после испытаний: а) Втулка из материала ПЭСТ-4 после испытаний; б) Вал из с бронзовым покрытием после испытаний.

По завершению стендовых испытаний был сделан вывод что, в качестве контртел необходимо выбирать материалы с показателем твердости больше 200 НВ.

6.3 Внедрение разработанного гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4

На основании положительных результатов стендовых испытаний гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4 в условиях, соответствующих реальным эксплуатационным режимам, было принято решение о внедрении ПЭСТ в устройство имитации рулевых приводов перекладки ЦАКИ.441431.017. Данное устройство предназначено для испытаний серийных рулевых машин и отработки рулей перспективных конструкций.

На опытном производстве НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей» по технологической документации ЗАО «ЦНИИ СМ» была изготовлена опытная партия подшипников скольжения из гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4.

Заготовки изделий из материала ПЭСТ-4 получены методом горячего прессования пресс-материалов. Давление прессования составляет 5 МПа. Температура отверждения заготовок с толщиной стенки до 10 мм - 90 °С – 1 час, 120 °С – 7 часов. Для толстостенных заготовок: 90 °С – 2 часа, 120 °С – 7 часов.

Список заготовок из материала ПЭСТ-4 для стендовых испытаний приведен в таблице 6.1, на рисунке 6.5 приведены фотографии процесса изготовления подшипников скольжения из гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4.

Таблица 6.1 – Перечень заготовок из ПКМ марки ПЭСТ-4, изготовленных для устройства ЦАКИ.441431.017

№	Подшипник	Эскизы подшипников рулевого устройства	Кол-во
1	Втулка с буртом Ø60мм		4 шт
2	Шар рулевого механизма		2 шт
3	Направляю щие накладки для рулевого механизма R 100мм		4 шт
4	Втулка с буртом Ø155мм		2 шт

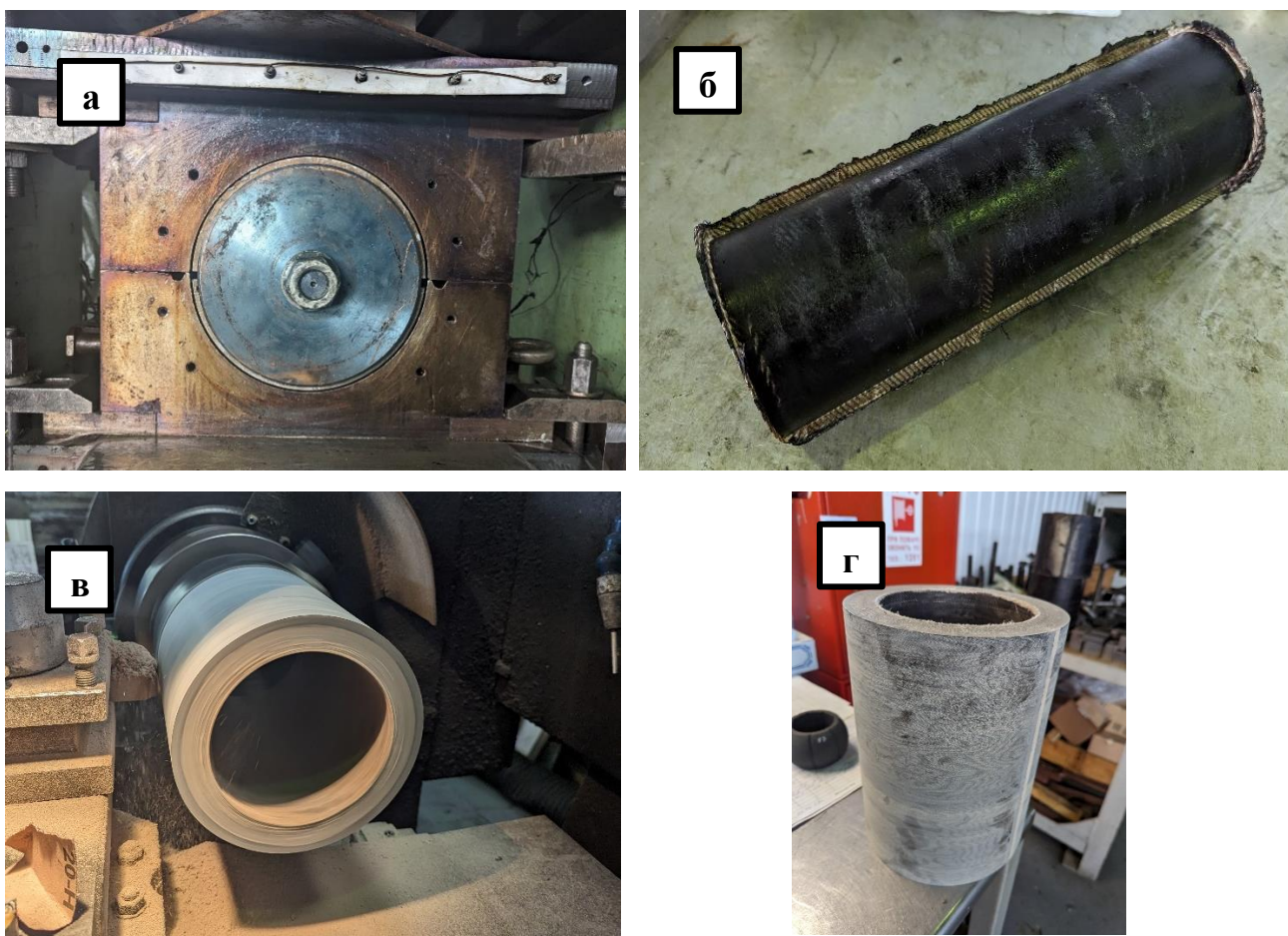


Рисунок 6.5 – Изготовление заготовок гибридного ПКМ марки ПЭСТ-4 методом горячего прессования: а) прессование втулки $D_{\text{внутр.}} 150/155$; б) распрессованная заготовка с облоем; в) механическая обработка втулки на токарном станке; г) заготовка для изготовления рулевых накладок после механической обработки

В итоге был изготовлен полный комплект подшипников скольжения, полностью соответствующий требованиям чертежей. На рисунке 6.6 приведены фотографии подшипников скольжения из гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4.



Рисунок 6.6 – подшипников скольжения из гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4

Характерный режим работы устройства – качание в пределах углов $\pm 35^\circ$. Удельное давление на опоры возрастает с увеличением угла перекладки пера. 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.

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

После 500 часов исправной 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 6.7 приведены фотографии подшипников скольжения после 500 часов испытаний.

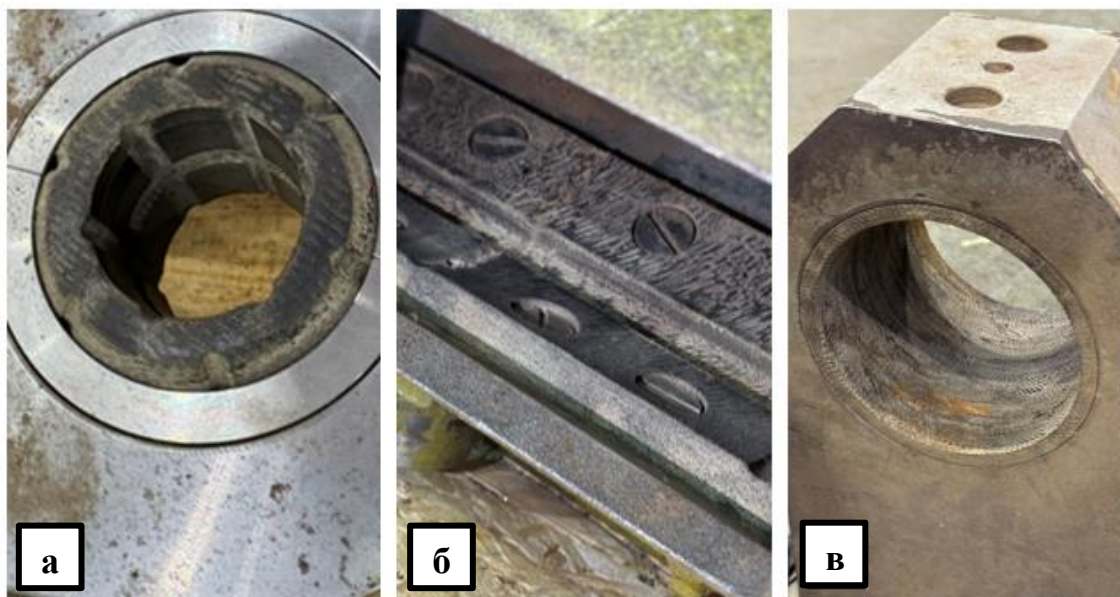


Рисунок 6.7 – Фотографии подшипников скольжения после стендовых испытаний:
а) Шар рулевого механизма; б) Накладка - направляющая; в) Втулка с буртом.

Таким образом, экспериментально доказана работоспособность и перспективность использования разработанного гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4 в реальных узлах трения судовой техники, что подтверждает научно-практическую ценность диссертационного исследования.

Выводы по главе 6

В шестой главе представлены результаты стендовых испытаний подшипников скольжения, изготовленных из разработанного гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4, в условиях, максимально приближённых к реальной эксплуатации рулевых устройств морской техники. По итогам проведённых испытаний сформулированы следующие основные выводы.

1. Изготовлена опытная партия подшипников скольжения. По утверждённой технологии горячего прессования (давление 5 МПа, ступенчатое отверждение: 90 °С – 1–2 часа, 120 °С – 7 часов) изготовлены заготовки втулок.

2. Испытания проводились на устройстве имитаторе ЦАКИ.441192.001 с контролируемыми параметрами: контактное давление до 60 МПа (кратковременно до 90 МПа), скорости скольжения 0,03–5 м/с с чередованием смазки водой и консистентной смазкой. Регистрировались износ, температура, момент трения, виброшумовые характеристики.

3. Подтверждены высокие эксплуатационные свойства ПЭСТ-4. При испытаниях на паре с хромированным стальным валом (сталь 45 с хромовым покрытием) при контактном давлении 12 МПа и скорости скольжения 0,5–1,0 м/с в течение 50 часов (путь трения до 50 км) установлено:

- интенсивность изнашивания не превышает 0,003 мм/км;
- на поверхности контртела отсутствуют заметные следы износа, наблюдается эффект «заполировки» (формирование гладкой поверхности);
- задиры и растрескивания образцов не зафиксированы.

4. Практическая значимость. Результаты стендовых испытаний подтвердили пригодность гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4 для серийного изготовления подшипников скольжения тяжело нагруженных узлов рулевых машин и других судовых устройств, работающих в морской воде с водяной смазкой. Материал сочетает высокую износостойкость, низкий коэффициент трения, электроизоляционные свойства и устойчивость к коррозии.

Также, шестая глава посвящена результатам внедрения разработанного гибридного антифрикционного ПКМ марки ПЭСТ-4 в конструкцию устройства имитации рулевых приводов перекладки ЦАКИ.441431.017.

1. Изготовлен комплект подшипников скольжения, полностью соответствующий требованиям чертежей ЗАО «ЦНИИ СМ». Механическая обработка заготовок выполнена с финишным высокоскоростным шлифованием, что позволило устранить ворсистость поверхности, характерную для лезвийной обработки материалов с волокнами СВМПЭ.

2. 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).

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, 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° С

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 ($I_h = 1,3$ мкм/км, $f_c = 0,04$) ниже в сравнении с углепластиком марки УГЭТ ($I_h = 4,9$ мкм/км, $f_c = 0,07$)

- 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 тяжелонагруженных узлах трения. При контактном 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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Рубин М.Б., Бахарева В.Е. Подшипники в судовой технике. / Справочник, Л.: Судостроение, 1987 г.- 344с.
2. Богун В.С., Бахарева В.Е., Анисимов А.В. Подшипники скольжения из антифрикционных углепластиков для центробежных насосов энергетических установок. - Вопросы материаловедения, № 1(61), 2010. – С. 60 – 66
3. Материалы для судостроения и морской техники. Справочник. Под ред. И.В.Горынина. – СПб: НПО «Профессионал», 2009. - Т.2 – С.381-433.
4. Кулик В.П., Хомов С.Н. Выбор материала для пар трения торцевых уплотнений гребных валов// Вопросы материаловедения. – 2002.- №4(32), с.34-39.
5. Крыжановский В.К., Кербер М.Л., Бурлов В.В., Паниматченко А.Д. Производство изделий из полимерных материалов. СПб., Профессия, 2004г. с. 64.
6. Помогайло А.Д., Розенберг А.С., Уфлянд И.Е. Наночастицы металлов в полимерах. – М.: Химия, 2000. – 672 с.
7. Машков Ю.К. Трибология конструкционных материалов. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2008. – 304 с.
8. Берлин А.А., Вольфсон С.А., Ошмян В.Г., Ениколопов Н.С. Принципы создания композиционных полимерных материалов. – М.: Химия, 1990 г., 240 с.
9. Бахарева В.Е., Николаев Г.И. Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы, Справочник Под ред. И.В.Горынина. – СПб: НПО «Профессионал», 2014 – с.916.
10. Кузьмина А.М., Шевелев В.В. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, применение. – М.: ИНФРА-М, 2015. – 412 с.
11. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. - СПб: Научные основы и технологии. – 2009. – 380с.
12. Kanaga Karuppiiah K.S., Bruck A.L., Sundararajan S., Wang J., Li X. Friction and wear behavior of ultra-high molecular weight polyethylene as a function of polymer crystallinity // Acta Biomaterialia, 2008, vol. 4(5), pp. 1401–1410. DOI: 10.1016/j.actbio.2008.02.022

13. Lee K., Kim Y. Friction and wear characteristics of UHMWPE against Co-Cr alloy under the wide range of contact pressures in lumbar total disc replacement // *Int. J. Precision Engineering and Manufacturing*, 2011, vol. 12, pp. 1111–1118. DOI: 10.1007/s12541-011-0148.
14. Анисимов А.В., Бахарева В.Е., Блышко И.В., Гинзбург Б.М., Кирик Е.В., Точильников Д.Г. Характеристики органопластиков на основе фенольной матрицы и оксалонитрильного волокна // *Вопросы материаловедения*. – 2006.- №2(46) - С.113-118.
15. Wang Y., Yin Z., Li H., Gengyuan G., Zhang X. et al. Friction and wear characteristics of UHMWPE composites containing glass fibers and carbon fibers under dry and water-lubricated conditions // *Wear*, 2017. DOI: 10.1016/j.wear.2017.03.006
16. Михайлин Ю.А. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен // *Полимерные материалы, изделия, оборудование, технологии*. – 2003. - №3(46), 4(47), 6(49), 7(50), 11(54).
17. Jacobs, M.J.N., et al. Mechanical and tribological properties of short discontinuous UHMWPE fiber reinforced UHMWPE // *Polymer Bulletin*, 1997, vol. 38(4), pp. 485–492. DOI: 10.1007/s002890050077
18. Rajendra Prasad P., Prakash J.N., Manjunath L.H. Effect of process parameters on wear behavior and water absorption of UHMWPE fabric reinforced epoxy composites // *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, 2019, vol. 10(1), pp. 543–549
19. Михайлин Ю.А. Конструкционные полимерные композитные материалы. СПб: Научные основы и технологии, 2008 – 822с.
20. Aderikha, V.N., Shapovalov, V.A. Mechanical and tribological behavior of PTFE–polyoxadiazole fiber composites. Effect of filler treatment // *Wear*, 2011, vol. 271(5–6), pp. 970–976. DOI: 10.1016/j.wear.2011.04.011
21. Корнеева Н.В. Разработка волокнистых полимерных композиционных материалов, армированных СВМПЭ – волокнами, тканями и неткаными материалами, обработанными неравновесной низкотемпературной плазмой: дисс. докт. наук, Казань, 2011 – С.16 - 23,86-92

22. Перепелкин К.Е. Химические волокна: развитие производства, получение, свойства, применение. – СПб.: Научные основы и технологии, 2008. – 356 с.
23. Михайлин Ю.А. Термоустойчивые полимеры и полимерные материалы. СПб «Профессия», 2006г., – 624с.
24. Liu J. et al. Nonuniform wear mechanism of Kevlar/polytetrafluoroethylene fiber-reinforced composites // *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2023, vol. 32, pp. 2881–2891. DOI: 10.1007/s11665-022-07305-2
25. Marchman J.F. et al. Polytetrafluoroethylene (PTFE) fiber reinforced polyetheretherketone (PEEK) composites // *Wear*, 2011, vol. 270, pp. 737–741
26. Guo Q. et al. Friction and wear properties of fabric/phenolic composites with plasma treated-hybrid glass/PTFE fabric // *Composites Science and Technology*, 2007, vol. 67, pp. 981–988
27. Папков С.П. Физико-химические основы переработки растворов полимеров в волокна. – М.: Химия, 1971. – 208 с.
28. Ефимов В.А., Швецов Г.Г. Химические волокна. – М.: Легкая индустрия, 1979. – 320 с.
29. Тверской А.М., Кучерявенко С.В. Арамидные волокна: свойства и области применения // *Химические волокна*. – 2005. – № 4. – С. 27–32.
30. Tribological characteristics of glass/carbon fibre-reinforced thermosetting polymer composites: a critical review // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering (Springer)*, 2022. DOI: 10.1007/s40430-022-03817-z
31. Бирюкова М.И., Шембель Н.Л. Модификация поверхности волокнистых материалов. – М.: Легпромбытиздат, 1990. – 192 с.
32. Филиппов Б.И., Шевченко В.Г. Углеродные волокна и композиты на их основе // *Успехи химии*. – 1993. – Т. 62, № 3. – С. 279–304.
33. Sharma M., et al. Carbon fiber surfaces and composite interphases // *Composites Science and Technology*, 2014, Vol. 102, pp. 35–50.
34. Фролов К.В., Машков Ю.К. Самосмазывающиеся полимерные композиты. – М.: Наука, 2008. – 256 с.

35. Lancaster J.K. Dry bearings: a survey of materials and factors affecting their performance // *Tribology*, 1973, Vol. 6, No. 6, pp. 219–251.
36. Плескачевский Ю.М., Смирнов В.А. Стекланные волокна: получение, свойства, применение. – Минск: Наука и техника, 1979. – 248 с.
37. Kumar S., Singh K.K. Tribological characteristics of glass/carbon fibre-reinforced thermosetting polymer composites: a critical review // *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2022, vol. 44, 496. DOI: 10.1007/s40430-022-03817-z
38. Соболев В.М., Шабалин А.Ф. Конструкционные стеклопластики для машиностроения. – М.: Машиностроение, 1982. – 168 с.
39. Дзенс В.М., Мелешко В.И. Базальтовые волокна и композиты. – Рига: Зинатне, 1985. – 180 с.
40. Friction and wear properties of polyimide matrix composites reinforced with short basalt fibers // *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, vol. 111(6), pp. 2980–2985. DOI: 10.1002/app.29353
41. Friction and sliding wear of UHMWPE modified cotton fibre reinforced polyester composites // *Tribology Letters (Springer)*, 2006, vol. 21, pp. 79–87. DOI: 10.1007/s11249-006-9014-y
42. Viscoelastic and dry-sliding wear properties of basalt fiber-reinforced composites based on a surface-modified graphene oxide/epoxy matrix // *Journal of Industrial Textiles*, 2020, vol. 50(6), pp. 939–953. DOI: 10.1177/1528083719850839
43. Абдуллин И.Ш., Желтухин В.С., Кравцова О.В. Плазменная обработка полимерных материалов. – Казань: Изд-во КГТУ, 2004. – 180 с.
44. Tiwari S., et al. Plasma surface modification of carbon fibers: a review // *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2000, Vol. 14, No. 9, pp. 1175–1200.
45. Pakdel A., et al. Modification of surface of carbon fiber materials by plasma treatment (Review) // *Fibre Chemistry*, 2020, Vol. 52, pp. 167–173.
46. Гиллер С.А., Канторович В.М. Активация поверхности полимеров. – М.: Химия, 1981. – 144 с.

47. Бахарева В.Е., Орыщенко А.С. Углепластики для деталей и узлов трения оборудования, работающего в условиях Арктики и Крайнего Севера. АНО ЛА «Профессионал», 2017г., 916с.
48. Богданова Ю.Г. Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов, учебное пособие МГУ, Москва 2010г, с 68.
49. Гутников С.И., Лазорьяк Б.И., Селезнёв А.Н. Стекланные волокна. Учеб. Пос. для студентов по специальности «Композиционные наноматериалы», Изд-во МГУ имени М.В. Ломоносова, 2010г., 68с.
50. Кербер М.Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. учеб. пособие, г.СПб Профессия, 2008г, 560с.
51. Бахарева В. Е., Орыщенко А.С. Высокопрочные стеклопластики для арктического машиностроения, г.СПб АНО ЛА «Профессионал», 2017г., 224с.
52. Чурсова Л. В. Эпоксидные смолы, отвердители, модификаторы и связующие на их основе / Л. В. Чурсова, Н. Н. Панина, Т. А. Гребенева, И. Ю. Кутергина. – СПб.: Профессия, 2020. – 574 с.
53. Кулезнев В.Н., Шершнёв В.А. Химия и физика полимеров. – М.: КолосС, 2007. – 368 с.
54. Ли Х., Невилл К. Справочное руководство по эпоксидным смолам. – М.: Энергия, 1973. – 416 с.
55. Jin F.L., et al. Epoxy resins and their composites: a review // Polymer International, 2015, Vol. 64, No. 9, pp. 1134–1144.
56. Строганов В.Ф., Охотина Н.А., Строганов И.В. Эпоксидные полимерные композиты: структура, свойства, применение. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2014. – 220 с.
57. Лебедева Е.Д., Полуэктова В.А. Модификация эпоксидных смол пластификаторами // Пластические массы. – 2008. – № 8. – С. 21–24.
58. Мартынова А.Н. Ткацкие переплетения: учебное пособие / под ред. – Иваново: ИГТА, 2009. – 84 с.
59. Сапожников В.В. Ткацкие переплетения и их анализ. – М.: Легкая промышленность, 1970. – 248 с.

60. Анисимов А.В., Бахарева В.Е., Блышко И.В. и др. Современные машиностроительные материалы. Неметаллические материалы: справочник / под ред. И.В. Горынина, А.С. Орыщенко. – СПб.: НПО «Профессионал», 2012. – 656с.
61. Скудра А.М., Булава Ф.Я., Гурвич М.Р. Конструкционные пластики. – Рига: Зинатне, 1982. – 280 с.
62. Зуев В.В., Михайлин Ю.А. Прочность полимерных композитов. – Л.: Химия, 1986. – 224 с.
63. Херцберг Р. Деформация и прочность полимерных материалов. – М.: Мир, 1973. – 264 с.
64. Грищенко А.Е., Чернин И.Л. Адгезия в полимерных композитах. – Киев: Наукова думка, 1988. – 192 с.
65. Park S.J., Seo M.K. Interface science and composites. Academic Press, 2011. pp.752
66. Бахарева В.Е., Николаев Г.И., Анисимов А.В., Антифрикционные неметаллические материалы для узлов трения скольжения // Вопросы материаловедения – СПб.: Изд.-во. ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей» - 2011 - №1 (65) с 75 – 88
67. Дворянцев Д. Д., Лишевич И. В., Саргсян А. С., Савелов А. С., **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
68. Лишевич И.В. Создание Антифрикционных теплостойких углепластиков для высокоскоростных подшипников насосов и паровых турбин / диссертация канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2015г
69. Дьячкова Т.П., Колесникова Н.Н. Методы исследования полимерных материалов. – Минск: БГТУ, 2011. – 212 с
70. Friedrich K., et al. Wear of reinforced polymers by different abrasive counterparts // Journal of Materials Science, 1986, Vol. 21, pp. 3317–3332.

71. Гинзбург Б.М., Козырев Ю.П. Триботехнические испытания полимерных материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2004. – Т. 70, № 8. – С. 37–42.
72. Поляков А.А., Руденко В.Н. Основы трибологии и триботехнических испытаний. – М.: Машиностроение, 2012. – 336 с.
73. Колесников В.И. Трибология: учебник для вузов. – М.: ИНФРА-М, 2018. 464с.
74. Myshkin N.K., et al. Tribology of polymers: adhesion, friction, wear, and mass-transfer // Tribology International, 2005, Vol. 38, No. 11–12, pp. 910–921
75. Дроздов Ю.Н., Матвеев В.Г. Механические испытания полимерных композитов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 48 с.
76. Емельянов А.А., Белова Н.А. Электроизоляционные свойства полимерных материалов. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 264 с.
77. Аскадский А.А., Матвеев Ю.И. Химическое строение и физические свойства полимеров. – М.: Химия, 1983. – 248 с.
78. Сытько И.И., Шаповалов В.М. Композиционные материалы в судостроении. – СПб.: Судостроение, 1999. – 320 с.
79. Tavman I.N. Thermal and mechanical properties of aluminum powder-filled high-density polyethylene composites // Journal of Applied Polymer Science, 1996, Vol. 62, No. 12, pp. 2161–2167.
80. Булатов В.П., Гинзбург Б.М., Приемский Н.Д., Точильников Д.Г. Определение характеристик изнашивания при линейном начальном контакте цилиндрических контртел // Трение и износ. – 1993. – Т. 3, № 4. – С. 759–764.
81. Мышкин Н. К., Петрокопец М. И. Трибология. Принципы и приложения. – Гомель: ИММС НАНБ, 2002. – 310 с.
82. А. В. Анисимов, И. В. Лишевич, А. С. Саргсян, И. В. Лобынцева, И. В. Блышко, М. Ю. Соболев, Д. Д. Дворянцев, **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

83. Браун Э.Д., Смушкович Б.Л. Современные серийные машины трения // Трение и износ, 1984, т. 5, № 1, с. 94 – 99
84. Козырев Ю.П., Гинзбург Б. М., Приемский Н.Д., Точильников Д.Г., Булатов В.П. Определение характеристик изнашивания при линейном начальном контакте цилиндрических контртел // Трение и износ.1993, т. 3, № 4, с. 759-764
85. Семёнов И.В., Хрусталёв Д.А. Коррозия и защита металлов в морской воде. – СПб.: Наука, 2008. – 312 с.
86. ГОСТ 9.005-72 «Допустимые и недопустимые контакты металлов»
87. Шибанов А.К. Плазмохимическая активация поверхности полимерных волокон. – М.: МГУ, 2006. – 156 с.
88. Беляева Е.А. Слоистые органокомпозиты и гибридные композиты на основе волокон из сверхвысокомолекулярного полиэтилена / диссертация канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2019г.
89. Тарасов В.А. Фторполимеры: свойства и технология переработки. – СПб.: Профессия, 2007. – 400 с.
90. Сапожников В.В. Ткацкие переплетения и их анализ. – М.: Легкая промышленность, 1970. – 248 с.
91. Власов С. В. Основы технологии переработки пластмасс: учеб. Для вузов. 2-е изд., испр. И доп. / С. В. Власов, Л. Б. Кандырин, В. Н. Кулезнев, и др. – М.: Химия, 2004. – 600 с.
92. Производство изделий из полимерных материалов: Учеб.пособие/В.К. Крыжановский, М.Л. Кербер, В.В. Бурлов, А.Д. Паниматченко - СПб.:Профессия, 2004.-464 с.
93. Дворянцев Д. Д., А. В. Анисимов, И. В. Лишевич, А. С. Саргсян, Е.П. Сорокина, **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
94. 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

95. Патент РФ №2823387 «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 05.10.2023г.

Приложение А

Акт внедрения результатов кандидатской диссертации

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора
ЗАО «ЦНИИ СМ»

А.Л. Кочубеевский

2026 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы

Шарко Евгения Александровича

«Гибридные антифрикционные полимерные композиционные материалы для
высоконагруженных узлов трения, смазываемых водой»
на соискание ученой степени кандидата технических наук

В результате исследований, выполненных Шарко Евгением Александровичем в рамках диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук, был разработан антифрикционный гибридный ПКМ марки ПЭСТ-4 (ТУ 28.15.39-268-07516250-2022).

Из ПКМ марки ПЭСТ-4, НИЦ «Курчатовский институт» - ЦНИИ КМ «Прометей», изготовлены подшипники скольжения ЦАКИ.713192.018, ЦАКИ.713192.018-01, ЦАКИ.713342.025, ЦАКИ.713392.037, ЦАКИ.723323.044, ЦАКИ.714294.004, ЦАКИ.713192.018 которые были применены на устройстве для имитации рулевых приводов перекладки ЦАКИ.441431.017 разработанном ЗАО «Центральный научно-исследовательский институт Судового машиностроения». Устройство успешно функционирует длительное время и применяется для испытаний серийных рулевых машин пр. 677 и отработки рулей перспективных конструкций. За период эксплуатации нареканий к работе подшипниковых узлов не выявлено.

Разработанный антифрикционный гибридный ПКМ рекомендован для применения в высоко нагруженных, низкоскоростных, работающих в условиях ограниченной смазки узлах трения судового палубного оборудования и рулевого привода.

Главный конструктор-
зам. главного инженера

Ю.А. Лебедев