

Государственное научное учреждение
«ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ МЕТАЛЛОПОЛИМЕРНЫХ СИСТЕМ имени
В.А. БЕЛОГО НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»
(ИММС НАН БЕЛАРУСИ)

Объект авторского права
УДК 678.743.41: 620.17:677.494

**БАШЛАКОВА
АННА ЛЕОНИДОВНА**

**КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
НА ОСНОВЕ ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С ОПТИМАЛЬНЫМ
СОДЕРЖАНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННЫХ В ПЛАЗМЕ УГЛЕРОДНЫХ
ВОЛОКОН**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.16.09 – «Материаловедение
(машиностроение)»

Гомель 2026

Работа выполнена в Государственном научном учреждении «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси» (ИММС НАН Беларуси).

**Научный
руководитель:**

Иванов Леонид Федорович,
кандидат технических наук, доцент, заведующий
отделом «Физика и механика композиционных
систем» Государственного научного учреждения
«Институт механики металлополимерных систем
имени В.А. Белого Национальной академии наук
Беларуси»

**Официальные
оппоненты:**

Гольдаде Виктор Антонович,
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры радиофизики и электроники Гомельского
государственного университета имени Франциска
Скорины

Антонов Александр Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент кафедры
материаловедения и ресурсосберегающих
технологий Гродненского государственного
университета имени Янки Купалы

**Оппонирующая
организация:**

Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет имени
П.О. Сухого»

Защита состоится «29» сентября 2026 г. в 16-00 часов на заседании Совета по защите диссертаций Д 01.14.01 при ИММС НАН Беларуси по адресу: 246050, г. Гомель, ул. Кирова, 32а, тел.: +375 (0232) 34-17-12, факс: +375(0232)34-17-11; e-mail: mpri@mpri.org.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИММС НАН Беларуси.

Автореферат разослан «18» августа 2026 г.

Ученый секретарь Совета
по защите диссертаций



Н.С. Винидиктова

ВВЕДЕНИЕ

Для функционирования узлов трения без смазки остро востребованы материалы, оптимально сочетающие антифрикционные и упруго-прочностные свойства. Из номенклатуры полимеров политетрафторэтилен, обладая свойством самосмазывания, в наибольшей степени способен снизить силу трения в зоне контакта с контртелом, уменьшив износ, коэффициент трения и оптимизировать температурный диапазон сохранения работоспособности узлов трения. В то же время существенными недостатками политетрафторэтилена являются низкая износостойкость и хладотекучесть, что требует применения функциональных наполнителей. Проблема разработки машиностроительных материалов на основе ПТФЭ рассматривалась в трудах Ю.К. Машкова, В.А. Белого, Ю.М. Плескачевского, О.В. Кропотина, В.Н. Адерики, В.М. Шаповалова, А.А. Охлопковой, и других авторов.

В качестве триботехнического и армирующего наполнителя интерес представляют углеродные волокна, сочетающие высокую прочность, модуль упругости, низкий коэффициент трения и коэффициент термического расширения, химическую и термическую стабильность и высокую теплопроводность. Их развитая поверхность способствует формированию структурно организованных межфазных слоев на границе с полимером, что существенно влияет на свойства композитов. В ряде узлов трения без смазки требуется не столько устойчивость к нагрузкам, сколько упругость и эластичность, что обычно не свойственно высоконаполненным композитам. Поэтому на современном этапе актуально решение проблемы расширения ассортимента триботехнических материалов за счет снижения количества наполнителя до функционального оптимума, что позволяет снизить стоимость композита. Например, в случае применения добавок, подвергнутых целевому модифицированию, малое наполнение может оказаться даже значительно более эффективным, чем высокое, за счет интенсификации взаимодействий в системе полимер – наполнитель. Однако до сих пор специфика происходящей на микроуровне структурной эволюции фторполимеров, контактирующих с наполнителями, изучена недостаточно. Это обуславливает актуальность совершенствования рецептурно-технологических подходов к формированию фторполимерных композитов, в которых именно малое наполнение ведет к более выраженным эффектам, и предполагает проведение целевого физического модифицирования наполнителя. В условиях импортозамещения также важным является снижение стоимости материалов технического назначения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Тема соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы согласно Указу Президента Республики, Беларусь № 156 от 7 мая 2020 г.: поз. 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: композиционные и многофункциональные материалы». Работа выполнена в рамках ряда НИР: ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Полимерные материалы и технологии», задание 6.04 (2016–2018 гг., гос.рег. №20161467), задание 6.67 (2019–2020 гг., гос.рег. №20191310); ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», задание 4.2.2 НИР 3 «Изучение и совершенствование процессов получения термостойких полимерных композиционных и пористых материалов на основе полимеров для нефтегазовой промышленности с использованием высокоинтенсивных воздействий» (2021–2025 гг., гос. рег. №20210292).

Цель и задачи исследования. *Цель исследования* – разработка композиционных материалов машиностроительного и общетехнического назначения с оптимальным комплексом эксплуатационных свойств на основе ПТФЭ, наполненного углеродными волокнами, модифицированными в плазме тлеющего разряда. Для достижения цели определены следующие задачи:

- обосновать выбор типа углеволокнистого наполнителя по его влиянию на физико-механические свойства и триботехнические характеристики фторопластовых композитов;
- установить основные закономерности формирования структуры композитов на основе ПТФЭ и модифицированных в плазме углеродных волокон (УВ);
- исследовать влияние содержания модифицированных углеродных волокон на теплофизические, физико-механические, вязкоупругие, триботехнические и электрофизические свойства композиционных материалов;
- разработать композиционные материалы с оптимальным сочетанием физико-механических свойств и триботехнических характеристик для использования в уплотнениях, работающих в высокоподвижных узлах трения;
- разработать способ анализа состава компонентов композита на основе ПТФЭ с определением формы и размеров частиц наполнителя.

Объект исследования – композиционные материалы на основе ПТФЭ, содержащие модифицированные УВ с фторполимерным покрытием.

Предмет исследования – совокупность структурных, физико-механических, триботехнических и электрофизических характеристик фторопластовых композитов (достигаемая при их формировании в условиях физико-химического модифицирования), содержащих до 10 мас.% модифицированных в плазме углеволокнистых наполнителей.

Научная новизна. Установлены закономерности влияния УВ, модифицированных в плазме тлеющего разряда в среде фторорганических соединений, на структуру ПТФЭ-матрицы, заключающиеся в том, что при содержании наполнителя до 5 мас.% происходит стимулирование кристаллизации активными центрами на поверхности волокон с фторполимерным покрытием, которое приводит к росту степени кристалличности и увеличению размера кристаллитов (на 5 % по сравнению с ненаполненным ПТФЭ). Повышение содержания УВ в ПТФЭ до 10 мас.% создает пространственные ограничения для роста кристаллитов (их размер уменьшается на 6 %), при этом дефектные кристаллиты с нарушенной регулярностью образуют паракристаллическую фазу.

Показано, что при концентрациях УВ 5–7 мас.% пропадает анизотропия модуля упругости, он перестает зависеть от направления прессования композитной заготовки и становится одинаков в изделиях как вдоль, так и поперек оси приложения нагрузки.

Установлено влияние наполнения ПТФЭ модифицированными в плазме тлеющего разряда в среде фторорганических соединений УВ, приводящее к изменению скорости релаксации напряжений по сравнению с ненаполненным ПТФЭ, которая при концентрации наполнителя 7 мас.% возрастает на 46 % только на начальном участке релаксации, при концентрации 10 мас.% скорость релаксации возрастает на 65 % на всем участке релаксации напряжений за счет уменьшения доли кристаллической фазы в объеме композита.

Показано, что при концентрации 5 мас.% происходит резкое снижение интенсивности изнашивания композиционного материала по сравнению с ненаполненным ПТФЭ, а значения предельного PV-фактора растут линейно с ростом концентрации модифицированных УВ.

Положения, выносимые на защиту

1. Научное обоснование выбора для антифрикционных композитов на основе ПТФЭ углеволокнистого наполнителя на основе гидратцеллюлозы в сравнении с углеволокнистым наполнителем на основе полиакрилонитрила по критериям наименьшего коэффициента трения (в 1,5 раза ниже), низкой интенсивности изнашивания (в 54 раза ниже) и более высокого значения предельного PV-фактора (в 5,2 раза выше).

2. Экспериментальное обоснование структурирующего эффекта углеродных волокон из гидратцеллюлозы, модифицированных в низкотемпературной плазме тлеющего разряда в среде фторорганических соединений, состоящего в повышении степени кристалличности матрицы ПТФЭ на 10–15 % при содержании УВ до 5 мас.% за счет стимулирования кристаллизации активными центрами на поверхности волокон, что позволило оптимизировать содержание наполнителя как фактора упорядоченности матрицы. При содержании УВ от 5 до 10 мас.%, степень кристалличности снижается на 12 % по сравнению с максимальным значением, что объясняется влиянием стерических ограничений и увеличением количества кристаллитов с нарушенной регулярностью.

3. Экспериментальное обоснование изменения показателей коэффициента теплопроводности (увеличение в 1,6 раз), диэлектрической проницаемости (увеличение в 3,7 раза) и интенсивности изнашивания (в 54 раза ниже), состоящее в возникновении точки перегиба при концентрации 5 мас.% УВ в результате образования цепей из УВ, которые становятся проводниками тепловой и электрической энергии, что позволяет обосновать минимальную концентрацию модифицированных УВ в композите.

4. Новые композиционные материалы на основе ПТФЭ, содержащие модифицированные в низкотемпературной плазме УВ (ПТФЭ+5–7 мас.% УВ), в которых достигнуто сочетание упруго-прочностных, вязкоэластических и триботехнических характеристик, оптимальное для уплотнительных элементов машин, работающих в условиях высокой подвижности, таких как уплотнительные кольца автомобильных амортизаторов, уплотнения шаровых кранов, сферические опорные части скольжения мостов, подвижные уплотнения промывочных барабанов. Модуль упругости разработанных композитов составляет 600 МПа, а предельный PV-фактор в 3,5 раза превышает предельный PV-фактор исходного ПТФЭ.

5. Эффективный способ анализа компонентов композитов на основе ПТФЭ, состоящий в определении формы и размера частиц наполнителя, которые высвобождаются в ходе абляционного воздействия на композиционный материал непрерывного излучения CO₂-лазера с интенсивностью 10–50 Вт/см², что позволяет осуществлять контроль состава изготавливаемых композитов и идентифицировать аналогичные композиты импортных производителей.

Личный вклад соискателя. Направление исследований и выводы обсуждались с к.т.н. Л. Ф. Ивановым, к.т.н. В. А. Шелестовой, к.т.н. П. Н. Граковичем. Обсуждение результатов физико-механических испытаний ПТФЭ–композитов проводилось совместно с к.т.н. С. В. Шилько. Исследование влияния наполнителя на электрофизические свойства ПТФЭ–композита проводились под руководством д.т.н. Е. М. Толстопятова.

Автор непосредственно участвовал в изготовлении опытных образцов, выполнял экспериментальные исследования по анализу роли добавок УВ на структуру и свойства композитов, в отработке методик исследования. В публикациях [1–15] основной вклад внесен в получение и обработку экспериментальных данных, описание результатов и установление закономерностей. При создании патентов [16, 17] соискателем были сформулированы предметы патентования и обоснование технических эффектов.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Основные результаты исследований обсуждены на международных научно-технических конференциях: Республиканская научно-техническая конференция молодых ученых «Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования» (г. Гомель, 2016, 2018, 2020), Международная научно-техническая конференция «Полимерные композиты и трибология» (г. Гомель, 2017, 2022, 2025), Международная научно-техническая конференция молодых ученых «Инновационные материалы и технологии» (г. Минск, 2019).

Опубликованность результатов диссертации. По результатам исследований опубликовано 17 научных работ, в том числе: 8 статей в научных рецензируемых изданиях, соответствующих п.19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь; 1 статья в сборнике статей конференций (2,8 а.л.); 6 тезисов докладов конференций; 1 патент на изобретение РБ; 1 патент РБ на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из общей характеристики работы, введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Содержание работы изложено на 145 страницах, из которых 58 рисунков и 14 таблиц занимают 31 страницу, 13 страниц – библиографический список из 123 наименований и 17 авторских работ, 8 приложений на 15 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Первая глава посвящена рассмотрению состояния проблемы, касающейся разработки фторопластовых композитов с различными типами волокнистых наполнителей.

Анализ состояния вопроса показал:

1. Нет единого мнения о механизмах влияния углеволокнистых наполнителей на структуру ПТФЭ-композитов.

2. Не определена значимость вида и параметров углеволокнистых наполнителей для получения фторопластовых композитов с высокими триботехническими параметрами.

3. Недостаточно учитывается анизотропия свойств ПТФЭ и его композитов при прогнозировании эксплуатационных характеристик.

4. Большинство фторопластовых композитов имеют значительную стоимость из-за высокого содержания дорогих углеродных волокон.

5. Существует проблема обеспечения долговечной прочности и износостойкости узлов трения и деталей машин.

Проведенный анализ позволил определить цель и актуальные задачи исследования и выявить недостаточность отечественных антифрикционных материалов для уплотнений, работающих в условиях повышенной подвижности.

Во второй главе охарактеризованы материалы и методы исследования.

Базовым полимером являлся ПТФЭ марки ПН-90. В качестве углеродного наполнителя использовали измельченные УВ различных типов – на основе гидратцеллюлозы (ГЦ) и полиакрилонитрила (ПАН).

Образцы изготавливали путем смешивания компонентов в высокоскоростном лопастном смесителе, прессования на гидравлическом прессе заготовок в виде цилиндров с последующим свободным спеканием в программируемой печи «PP 20/45» («LAC», Чехия).

Для определения состава компонентов композитов разработан эффективный способ, состоящий в воздействии на поверхность композита излучения непрерывного CO₂-лазера с интенсивностью 10–50 Вт/см². В условиях лазерной абляции реализуется сверхбыстрое разложение фторполимера с выбросом газообразных продуктов деструкции, которое высвобождает частицы наполнителя, изучаемые с помощью растрового электронного микроскопа VEGA II LSH с системой дисперсионного микроанализа INCA ENERGY 250 ADD, («Tescan/OXFORD Instruments Analytical», Чехия/Англия) в режиме обратно-отраженных электронов.

Размер кристаллитов и степень кристалличности композитов исследовали методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на рентгеновском дифрактометре GNR APD 2000 PRO («Gruppo Navale Riiievi», Италия). Теплопроводность измеряли методом вспышки на приборе «LFA 447» («Nanoflash», Германия). Определение коэффициента термического линейного расширения (КЛТР) проводили с помощью дилатометра «DIL 801L» («TA Instruments», Германия). Плотность материалов определяли методом гидростатического взвешивания в соответствии с ГОСТ 1513-69 на аналитических весах «GX-1000» («A&D», Великобритания). Релаксацию напряжений, прочность и модуль упругости при сжатии измеряли на

испытательном стенде Instron 5567 (Великобритания). Триботехнические характеристики изучали на машине трения «2070 СМТ-1» при трении скольжения без смазочных материалов по схеме «вал – частичный вкладыш». Интенсивность изнашивания определяли в процессе триботехнических испытаний путем взвешивания образца после каждого шага нагрузки на весах с точностью 0,0001 кг. Для определения длины измельченных УВ использована компьютерная программа Fiber Scout [15], которая позволяет провести анализ изображений, полученных с помощью микроскопа, и представить распределение волокон по длинам. Математическую обработку результатов экспериментов проводили согласно стандартным методикам.

Третья глава посвящена выбору типа углеродных волокон, оптимального для разработки композитов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Физико-механические характеристики и поверхностные свойства УВ определяются видом исходного сырья, технологическими особенностями (применяемыми катализаторами, температурой термообработки) и могут варьироваться в широких пределах (таблица 1). Для оптимальной реализации преимуществ УВ в композите, предназначенном для использования в высокоподвижных узлах трения, УВ должны иметь высокую прочность, но низкий модуль упругости.

Таблица 1 – Физико-механические характеристики композитов с разными марками углеродных наполнителей

Характеристика композита	Марка УВ для наполнения				
	«Белум» (ИММС НАН Беларуси)	ЛО-1-12Н ЭХО (ОАО «Светлогорск Химволокно»)	«Десна» (Украина)	ПАН 1 (Япония)	ПАН 2 (Россия)
Плотность, г/см ³	1,97	1,94	1,87	2,03	2,06
Предел прочности при растяжении, МПа	21,2	21,1	20,0	22,4	18,4
Модуль упругости при сжатии, МПа	900	850	380	740	670
Напряжение сжатия при 5%-ой деформации, МПа	18,0	17,4	9,7	17,6	20,5

Для всех трёх типов композитов с УВ на основе ГЦ свойственен схожий характер изменения коэффициента трения с ростом давления в зоне трения. Он снижается почти до значений 0,1, в то время как для композитов с УВ ПАН

минимальное значение составляет 0,15–0,16. При этом нагрузочная способность композитов с гидратцеллюлозными УВ существенно выше.

Для композитов, содержащих УВ из ГЦ, температура в зоне трения почти не меняется, но для композитов с УВ из ПАН растёт с повышением давления. Это может быть связано с достаточно высоким коэффициентом трения и, соответственно, с большим выделением тепла в зоне трения, что приводит к преждевременной деформации образца. Поэтому композиты с УВ ПАН имеют более низкие значения PV-фактора и износостойкости. Таким образом при выборе наполнителя для композитов с фторопластовой матрицей, целесообразно использовать УВ на основе ГЦ марки «Белум». Углеродные волокна марки «Белум» выполнены на основе ГЦ и модифицированы в плазме тлеющего разряда в среде фторорганических соединений.

В четвертой главе исследовано влияние дискретных углеродных волокон марки «Белум», на надмолекулярную структуру, параметры кристалличности матрицы ПТФЭ и анизотропию свойств композиционных материалов. Зависимости степени кристалличности от доли УВ, определенные по методу РСА и ДСК показаны на рисунке 1. Значения степени кристалличности, полученные обоими методами, существенно отличаются: 23–26 % и 47–54 % методами ДСК и РСА соответственно.

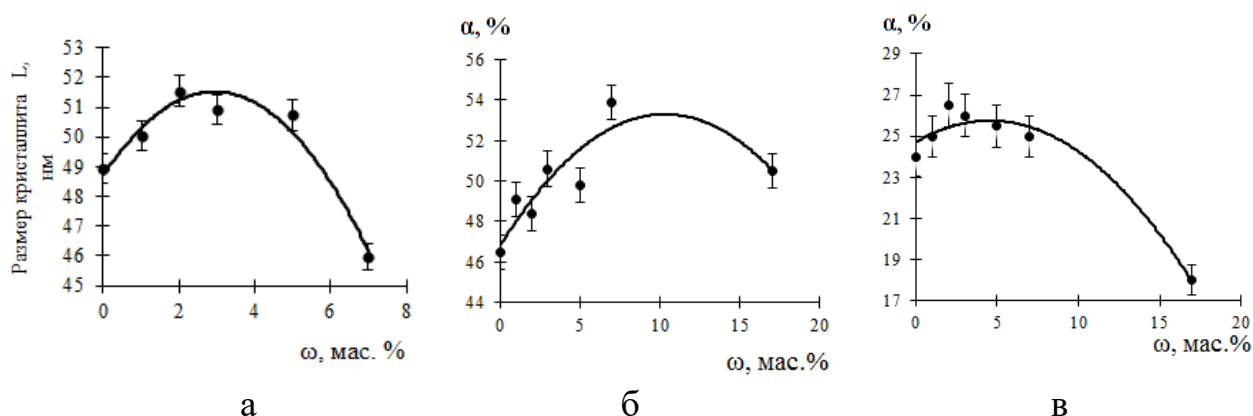


Рисунок 1 – Зависимость размера кристаллитов I (а) и степени кристалличности α (б, в) ПТФЭ от концентрации наполнителя ω : б – по данным РСА; в – по данным ДСК

Это различие можно объяснить тем, что при небольших степенях наполнения УВ кристаллизация в ПТФЭ активизируется поверхностью наполнителей, контактирующих с полимером. При дальнейшем увеличении доли углеродных волокон они начинают создавать препятствия росту кристаллитов. Вследствие пространственных ограничений в кристаллитах возникают дефекты, которые позволяют отнести эти кристаллиты с нарушенной регулярностью к паракристаллической фазе, которая фиксируется методом РСА и не фиксируется методом ДСК. Таким образом,

при некотором наполнении композита УВ метод РСА показывает дальнейшее увеличение степени кристалличности, а метод ДСК – ее снижение.

Результаты зависимости коэффициента теплопроводности от температуры также указывают на структурирующую роль поверхности УВ как совокупности центров кристаллизации (рисунок 2).

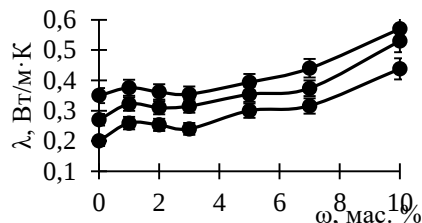
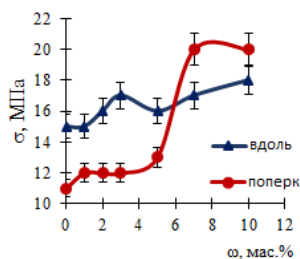


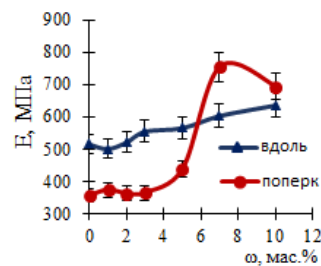
Рисунок 2 – Зависимость коэффициента теплопроводности λ от концентрации ω УВ в ПТФЭ для температур 35, 105 и 210 °С

В области 3 мас.% наблюдается минимум значений коэффициента теплопроводности, что, по-видимому, связано с увеличением объема межфазных слоев, имеющих аморфную структуру. Рост теплопроводности от 3 до 10 мас.% УВ предположительно связан с тем, что волокна пересекаются между собой, образуя «мосты» – проводники тепловой энергии.

Пятая глава посвящена исследованиям физико-механических, вязкоупругих, триботехнических и электрофизических характеристик композитов на основе ПТФЭ и модифицированных в плазме УВ марки «Белум». Упруго-прочностные свойства при сжатии малонаполненного ПТФЭ зависят не только от содержания УВ, но и от направления приложения нагрузки. Для объяснения особенностей изменения упруго-прочностных свойств ПТФЭ при малом содержании УВ учитывали несколько конкурирующих факторов: кристаллическую структуру, армирующее действие наполнителя и макроструктуру композита, а именно его пористость. Рост степени кристалличности при введении небольших количеств (1–2 мас.%) УВ является причиной роста модуля упругости (рисунок 3). Известно, что модуль упругости кристаллической фазы существенно выше, чем аморфной фазы.



а

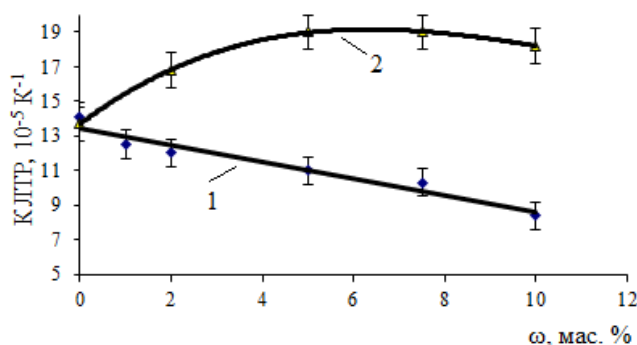


б

Рисунок 3 – Зависимость напряжения σ (а) при 5% деформации ПТФЭ и модуля упругости E (б) от концентрации УВ для композитов, вырезанных вдоль и поперек оси приложения нагрузки

При малой концентрации армирующая роль УВ еще не проявляется. Поэтому дальнейшее снижение степени кристалличности после 3 мас.%, по-видимому, приводит к снижению модуля упругости. Но уже при 5 мас.% преобладающей причиной роста модуля становится армирующее действие УВ, и дальнейшее снижение степени кристалличности не играет значительной роли. Некоторое замедление роста модуля упругости после 8 мас.% УВ может быть вызвано увеличением пористости композита вследствие разрыхления его значительным количеством наполнителя.

Температурные зависимости коэффициента линейного теплового расширения (КЛТР) фторопластовых композитов согласно рисунку 4 демонстрируют анизотропию: КЛТР для образцов, изготовленных вдоль и поперек оси приложения нагрузки, отличаются в 1,5–3 раза. Зависимость КЛТР от содержания УВ для образцов, изготовленных вдоль направления оси приложения нагрузки, имеет экстремальный характер с максимумом около 5–7 мас.%, а для образцов, изготовленных поперек оси приложения нагрузки, характерно снижение КЛТР с увеличением доли УВ, что соответствует известным представлениям о влиянии наполнителя, имеющего адгезионную связь с матрицей. Анизотропия КЛТР возникает из-за преимущественной ориентации УВ поперек направления прессования, в то время как волокна вдоль направления приложения силы ломаются.

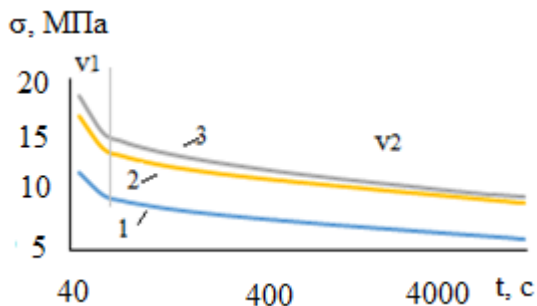


1 – поперек оси приложения нагрузки; 2 – вдоль оси приложения нагрузки
Рисунок 4 – Зависимость КЛТР при температуре 100 °С от концентрации УВ в фторопластовых композитах

Разница в КЛТР вдоль/поперек тем больше, чем ниже плотность и прочностные свойства композита, которые зависят от пористости и дефектности. Поперек направления прессования оказывается больше длинных УВ, а вдоль – коротких, сломанных. Более длинные поперечные УВ обладают адгезией к ПТФЭ за счет фторполимерного покрытия, что повышает их сцепление с матрицей. Таким образом направление приложения нагрузки

определяет преимущественное положение УВ и влияет на анизотропию свойств исследуемых композитов.

Для оценки релаксации напряжения образец мгновенно деформировали на 5 %, а затем измеряли напряжение, необходимое для поддержания этой деформации (рисунок 5).

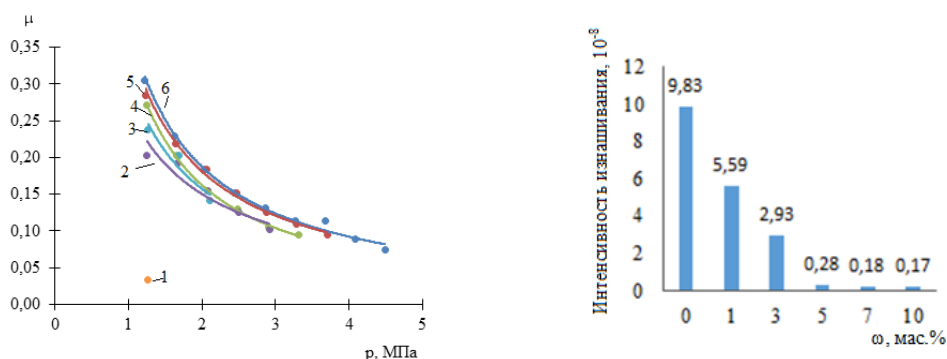


1 – ПТФЭ; 2 – ПТФЭ+7 мас.% УВ; 3 – ПТФЭ+10 мас.% УВ

Рисунок 5 – Зависимость напряжения при сжатии, при постоянной деформации 5% от времени для образцов с различным содержанием УВ

Скорость снижения напряжений в образцах не одинакова на двух участках кривых релаксации напряжения. Первый период, длительностью 3 мин. характеризуется резким падением напряжения. Второй период релаксации, длительность которого намного больше первого (3 часа), напротив, характеризуется умеренной скоростью падения напряжения: релаксационная кривая на этом участке при большой длительности испытания приближается к оси абсцисс. Таким образом, вязкоупругие свойства ПТФЭ-композита начинают усиливаться при содержании 7 мас.% УВ на первом участке релаксации напряжений, а при 10 мас.% УВ – на всей кривой.

Результаты триботехнических испытаний композитов представлены на рисунке 6.



1 – ПТФЭ; 2 – ПТФЭ+1мас.% УВ; 3 – ПТФЭ+2 мас.% УВ;
4 – ПТФЭ+ 5 мас. % УВ; 5 – ПТФЭ+7 мас.% УВ; 5 – ПТФЭ+10 мас.% УВ
Рисунок 6 – Зависимость коэффициента трения μ от давления p (а) и зависимости интенсивности изнашивания от концентрации УВ ω (б)

Для всех образцов композитов с УВ наблюдался одинаковый характер изменения коэффициента трения с ростом давления в зоне трения – он снижается от значений 0,38–0,35 до 0,1–0,18, что характерно для большинства антифрикционных материалов на основе ПТФЭ, причем значительных отличий коэффициента трения с изменением содержания УВ не обнаружено. Интенсивность изнашивания (рисунок 6,б) рассчитана при среднем давлении 1,5 МПа, время воздействия 1 час, площадь контакта 2,4 см². Заметное снижение интенсивности изнашивания наблюдается при наполнении 5–7 мас.%; она уменьшается в 54 раза по сравнению с ненаполненным фторопластом.

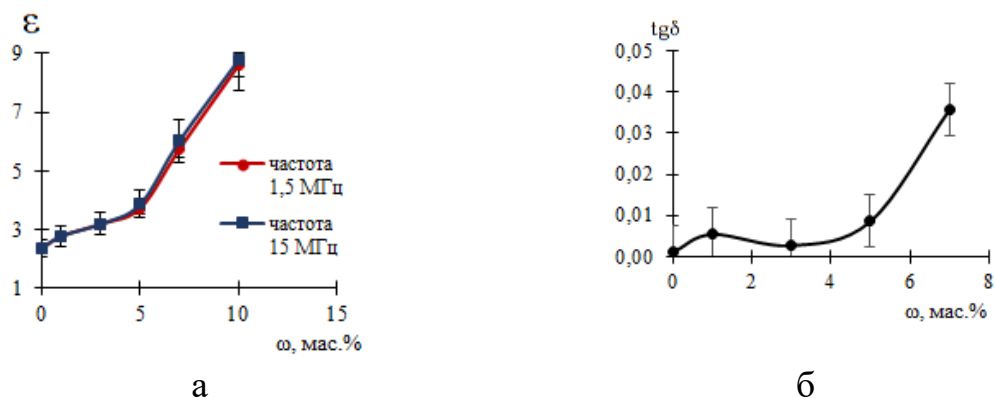
При увеличении содержания УВ коэффициент трения изменяется нелинейно. Минимум для разных давлений достигается при содержании 1 мас.% УВ. Далее наблюдается рост коэффициента трения. PV-фактор (таблица 2) ожидаемо растет с увеличением наполнения углеродными волокнами.

Таблица 2 – PV-фактор и удельное сопротивление композиционных материалов

Состав композита	PV-фактор, МПа*м/с	Удельное сопротивление ρ_v , Ом·м
ПТФЭ	1,27	$>10^{12}$
ПТФЭ+1 мас. % УВ	2,11	$>10^{12}$
ПТФЭ+2 мас. % УВ	2,92	$>10^{12}$
ПТФЭ+3 мас. % УВ	3,32	$9,5 \cdot 10^{12}$
ПТФЭ+5 мас. % УВ	4,12	$2,8 \cdot 10^{11}$
ПТФЭ+7 мас. % УВ	4,49	$6,3 \cdot 10^9$
ПТФЭ+10 мас. % УВ	4,12	$3,5 \cdot 10^4$

Исследование электрофизических характеристик ПТФЭ-композитов с УВ проводилось на постоянном токе и переменном токе. На постоянном токе было измерено удельное сопротивление, результаты отражены в таблице 2. Композиты с содержанием УВ менее 5 мас.% имеют сопротивление, близкое к сопротивлению ненаполненного ПТФЭ. Проводящие свойства начинают проявляться у композитов с содержанием УВ 5-7 мас.%, что открывает новые возможности использования данного материала в оборудовании, эксплуатируемом в условиях возможного накопления электростатического заряда.

Наличие в объёме образца большого количества изолированных электропроводящих микроволокон эквивалентно действию молекулярных дипольных структур в переменном электрическом поле и обеспечивает повышение диэлектрической проницаемости материала. Установлены зависимости электрических характеристик композитов от концентрации УВ (рисунок 7), близкие к линейным, но с разными угловыми коэффициентами в областях низкой и повышенной концентраций с точкой перегиба при 5 мас.%, в которой предполагается электрическая перколяция. Перегиб можно объяснить, исходя из перколяционной задачи теории протекания, которая рассматривает вероятности образования проводящих цепочек из касающихся друг друга частиц наполнителя, так как диэлектрическое фторполимерное покрытие на УВ, не является сплошным. При малых степенях наполнения все проводящие УВ изолированы друг от друга. По мере увеличения концентрации наполнителя и при превышении некоторого критического значения возникают проводящие мостики вследствие контакта между УВ.



1 – частота переменного тока 15 МГц, 2 – 1,5 МГц

Рисунок 7 – Зависимость показателей композиционных материалов от концентрации УВ: а – диэлектрической проницаемости, б – тангенса угла электрических потерь при частоте переменного тока 1,5 МГц

С помощью сравнительного анализа упруго-прочностных, триботехнических и электрофизических свойств композитов определен интервал содержания УВ, модифицированных в низкотемпературной плазме в среде фторорганических соединений, обеспечивающий оптимальный комплекс характеристик композита для использования в узлах трения высокой подвижности. Установлено, что ПТФЭ-композиты с наполнением УВ 5–7 мас.% наиболее полно достигают цели, поставленной в диссертационном исследовании, и обладают необходимыми эксплуатационными характеристиками.

Модифицированные по вышеприведенной технологии измельченные УВ комбинировали с порошком карбида кремния SiC (размер частиц менее

1 мкм, таблица 3). При добавлении SiC в ПТФЭ-композит, содержащий 10 мас. % УВ, незначительно снижается прочность при растяжении, но модуль упругости повысился. Триботехнические испытания показали снижение коэффициента трения и температуры в зоне трения. Достигнутое с помощью SiC изменение свойств композитов может явиться основой для разработки комбинированных наполнителей направленного действия. При добавлении порошка SiC в ПТФЭ-композит, содержащий 10 мас. % УВ, незначительно снижается прочность при растяжении, модуль упругости с добавлением SiC повысился. Триботехнические испытания показали снижение коэффициента трения и температуры в зоне трения. Таким образом, достигнутое с помощью ультрадисперсной добавки SiC изменение свойств композитов может явиться основой для разработки комбинированных наполнителей направленного действия.

Таблица 3 – Физико-механические характеристики композитов с УВ и SiC

Физико-механические характеристики	ПТФЭ (90 %) + УВ (10 %)	ПТФЭ (87 %) + УВ (10 %)+ SiC (3 %)
Предел прочности при растяжении, МПа	23–24	21–22
Относительное удлинение при разрыве, %	340–350	150–180
Модуль упругости при сжатии, МПа (вдоль/поперек)	640–700	680–740
Напряжение сжатия при 10%-ой деформации, МПа	24–25	24–25
Минимальный коэффициент трения	0,1	0,05
Температура в зоне трения при давлении 3 МПа, °С	175–180	125–130

Установлены закономерности, обосновывающие роль модифицированных УВ в перестройке структуры и улучшении комплекса свойств ПТФЭ-композитов. Разработаны технические условия на материал антифрикционный «Эластофлувис» (ТУ ВУ 400084698.324-2023), получен патент на полезную модель уплотнительной манжеты № 20230239 от 05.11.2024. Уплотнение предназначено для предотвращения вытекания газа из области высокого давления в область низкого давления, а также защиты детали от попадания в нее пыли и грязи. Уплотнительная манжета из разработанного материала прошла испытания в качестве уплотнения для шаровых клапанов АН-2с-МК на Белорусском газоперерабатывающем заводе (БГПЗ) РУП ПО «Белоруснефть», где показала преимущество над импортными деталями аналогичного назначения по сроку службы и эксплуатационным свойствам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Экспериментально обоснована роль содержания УВ, обработанных в низкотемпературной плазме в среде фторорганических соединений, в процессах

структурной перестройки композиционных материалов на основе ПТФЭ. При содержании 1–3 мас.% поверхность наполнителя работает как совокупность центров кристаллизации ПТФЭ, при этом образуются кристаллы с ненарушенной структурой. При наполнении от 3 до 7 мас.% УВ кристаллизация происходит под действием стерических ограничений, вследствие чего образуются кристаллы с нерегулярной дефектной структурой. При наполнении от 7 до 10 мас.% УВ наполнитель работает как фактор преимущественного армирования. Таким образом, за счет варьирования рецептурного состава можно использовать конкуренцию этих структурообразующих процессов, тем самым управляя комплексом свойств композита [1, 2, 7].

2. Установлен характер влияния типа УВ на свойства композита на основе ПТФЭ. Композитам с УВ из ГЦ присущи меньший коэффициент трения (в 1,5 раза), интенсивность изнашивания (в 54 раза ниже) и более высокий PV-фактор (в 5,2 раза выше), чем у содержащих УВ из ПАН, что обуславливает преимущество УВ из ГЦ в качестве наполнителя антифрикционных фторопластовых композитов [2, 9, 10].

3. Установлен характер анизотропии физико-механических свойств композитов на основе ПТФЭ и модифицированных УВ. КЛТР для образцов, изготовленных вдоль оси приложения нагрузки, в 1,5–3 раза, выше, чем у образцов, вырезанных поперек, причем для 5 мас.% УВ эта разница максимальна. При малом содержании УВ (до 3 мас.%) модуль упругости при сжатии и напряжение сжатия имеют более высокие значения для образцов, вырезанных вдоль направления прессования, чем для вырезанных поперек. При содержании наполнителя 5–7 мас.% УВ пропадает анизотропия модуля упругости при сжатии, он перестает зависеть от направления прессования композитной заготовки. Анизотропия свойств частично возникает из-за преимущественной ориентации углеродных волокон. Разница в КЛТР вдоль/поперек тем больше, чем ниже плотность и прочностные свойства композита, которые зависят от пористости и дефектности. Это позволяет предложить способ изготовления уплотнений путем роспуска втулки из композита [3, 12, 13].

4. Установлено, что в образцах, содержащих 7 мас.% модифицированных УВ, скорость релаксации напряжений при 5 % деформации растет только на начальном участке релаксации, а в образцах с содержанием 10 мас.% модифицированных УВ скорость релаксации напряжений растет на всей кривой. Это позволяет оценить вязкопластические свойства композиционных материалов [7].

5. Установлен экстремальный характер зависимости коэффициента теплопроводности и электрической проницаемости от содержания модифицированных УВ в ПТФЭ с точкой перегиба в 5 мас.% наполнения УВ,

который обусловлен, с одной стороны, изменением кристаллической фазы ПТФЭ, с другой – образованием проводящих мостов между УВ [5].

6. Разработаны композиционные материалы на основе ПТФЭ, содержащие модифицированные в низкотемпературной плазме УВ (5–7 мас.%) с оптимальным сочетанием упруго-прочностных и триботехнических свойств для уплотнительных элементов, работающих в условиях высокой подвижности. Модуль упругости разработанных композитов 600 МПа, предельный PV-фактор в 3,5 раза превышает предельный PV-фактор исходного ПТФЭ [4, 6, 8, 17].

7. Разработан способ анализа компонентов композита на основе ПТФЭ, состоящий в определении формы и размера наполнителя, который высвобождается после воздействия на фторопластовый композиционный материал излучением непрерывного CO₂-лазера с интенсивностью 10–50 Вт/см², что позволяет осуществлять контроль качества изготавливаемых композитов и идентифицировать аналогичные композиты импортных производителей [11, 14, 15, 16].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные материалы на основе ПТФЭ, содержащие модифицированные в низкотемпературной плазме УВ (5–7 мас.%), рекомендованы для изготовления изделий антифрикционного назначения для работы в узлах трения без смазки в интервале температур от минус 120 °С до плюс 260 °С. Антифрикционный материал «Эластофлувис» (ТУ ВУ 400084698.324-2023) прошел практические испытания на предприятиях: БГПЗ РУП ПО «Белоруснефть» в качестве уплотнений для шаровых клапанов, на ООО «Белань Плюс» – в качестве уплотнений для углового питательного элемента. Положительные результаты испытаний дают основания для рекомендации дальнейшего использования материала «Эластофлувис» на предприятиях машиностроительной отрасли Республики Беларусь в качестве импортозамещающих.

Основные области применения разработанных материалов – машиностроительная и химическая промышленности. Материал рекомендован для использования в узлах трения и деталях, где требуется эластичный, износостойкий материал: уплотнительные кольца автомобильных амортизаторов, уплотнения шаровых кранов, сферические опорные части скольжения мостов, подвижные уплотнения промывочных барабанов и другие уплотнительные элементы подвижных и неподвижных.

А.Л. Башлакова



СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи

1. Исследование влияния модифицированных углеродных волокон на кристалличность политетрафторэтиленовой матрицы / А. Л. Башлакова, П. Н. Гракович, В. А. Шелестова, Л. Ф. Иванов // Полимерные материалы и технологии. – 2020. – Т. 6, № 1. – С. 78–84.
2. Влияние типа углеволокнистого наполнителя на физико-механические и триботехнические свойства фторопластовых композитов / П. Н. Гракович, В. А. Шелестова, В. Ю. Шумская, И. С. Шилько, Д. М. Гуцев, А. Л. Башлакова, М. Ю. Целуев // Трение и износ. – 2019. – Т. 40, № 1. – С. 18–24.
3. Шелестова, В. А. Влияние анизотропии фторопластовых композитов и доли наполнителя на коэффициент термического линейного расширения / В. А. Шелестова, А. Л. Башлакова, И. В. Коваль // Полимерные материалы и технологии. – 2019. – Т. 5, № 3. – С. 64–68.
4. Влияние содержания модифицированных углеродных волокон на физико-механические свойства малонаполненного ПТФЭ / А. Л. Башлакова, В. А. Шелестова, Л. Ф. Иванов, П. Н. Гракович // Полимерные материалы и технологии. – 2021. – Т. 7, № 4. – С. 59–63.
5. Электрические характеристики политетрафторэтилена, наполненного модифицированными углеродными волокнами / А. Л. Башлакова, Е. М. Толстомятов, В. А. Шелестова, Л. Ф. Иванов // Полимерные материалы и технологии. – 2023. – Т. 9, № 1. – С. 39–45.
6. Влияние ультрадисперсного карбида кремния на структуру и свойства фторопластовых композитов / В. А. Шелестова, Л. Е. Евсеева, В. Г. Лещенко, К. В. Николаева, С. М. Данилова-Третьяк, А. Л. Башлакова, Л. Ф. Иванов // Полимерные материалы и технологии. – 2021. – Т. 7, № 4. – С. 59–63.
7. Башлакова, А. Л. Обзор композиционных материалов на основе политетрафторэтилена и дисперсных волокнистых наполнителей для изделий машиностроительного назначения / А. Л. Башлакова, Л. Ф. Иванов. // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2025. – № 2, № 1 – С. 41–55.
8. Исследование влияния комплексных наполнителей на трибологические свойства и структуру политетрафторэтилена / А. А. Охлопкова, А. П. Васильев, Т. С. Стручкова, П. Н. Гракович, А. Л. Башлакова // Трение и износ. – 2018. – Т. 39, № 5. – С. 543–550.

Материалы конференций

9. Башлакова, А. Л. Влияние плазмохимического модифицирования углеродных волокон на коэффициент трения армированного ими поливинилиденфторида / А. Л. Башлакова, В. П. Селькин, С. В. Копылов // *Машиноведение и инновации : сб. ст. XXIX конф. молодых учёных и студентов (МИКМУС-2017), г. Москва, 6–8 дек. 2017 г. – Москва, 2017. – С. 148–151.*

Тезисы докладов конференций

10. Башлакова, А. Л. Методика определения модулей упругости направленно-армированных композитов / А. Л. Башлакова // *Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования : тез. докл. IV Респ. науч.-техн. конф. молодых ученых, г. Гомель, 10–11 нояб. 2016 г. / ИММС НАН Беларуси ; сост. В. В. Шевченко. – Гомель, 2016. – С. 59.*

11. Башлакова, А. Л. Способ качественного анализа состава композитов на основе фторопласта-4 / А. Л. Башлакова // *Полимерные композиты и трибология (Поликомтриб-2017) : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., г. Гомель, 27–30 июня 2017 г. / НАН Беларуси [и др.] ; редкол.: В. Н. Адери́ха [и др.]. – Гомель, 2017. – С. 173.*

12. Башлакова, А. Л. Влияние малых концентраций углеродного наполнителя на свойства композитов на основе фторопласта-4 / А. Л. Башлакова // *Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования : тез. докл. V Респ. науч.-техн. конф. молодых ученых, г. Гомель, 12–14 нояб. 2018 г. / ИММС НАН Беларуси ; сост. А. А. Тимофеенко. – Гомель, 2018. – С. 6–7.*

13. Башлакова, А. Л. Влияние малых концентраций углеродного наполнителя на термическое расширение композитов на основе фторопласта-4 / А. Л. Башлакова // *Инновационные материалы и технологии : материалы докладов. Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, г. Минск, 9–11 янв. 2019 г. / Бел. гос. техн. ун-т ; редкол.: И. В. Войтов (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГТУ, 2019. – С. 92–95.*

14. Башлакова, А. Л. Качественный фазовый анализ композитов на основе фторопласта-4 с малой степенью наполнения углеродными волокнами / А. Л. Башлакова // *Полимерные композиты и трибология (Поликомтриб-2019) : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., г. Гомель, 23–26 июня 2019 года / НАН Беларуси [и др.] ; редкол.: В. Н. Адери́ха [и др.]. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2019. – С. 97.*

15. Башлакова, А. Л. Влияние содержания модифицированных углеволокнистых наполнителей на вязкоупругие свойства композиционных материалов на основе ПТФЭ / А. Л. Башлакова // Полимерные композиты и трибология» (Поликомтриб-2025) : тезисы докладов Международной научно-технической конференции, г. Гомель, 24–27 июня 2025 г. / НАН Беларуси [и др.] ; редкол.: В. Н. Адериha [и др.]. – Гомель : ИММС НАН Беларуси, 2025. – С. 32.

Патенты и патентные заявки

16. Патент BY 22964, МПК G 01N 25/00 (2006.01). Способ качественного анализа состава композитов на основе фторопласта-4 : № а 20170430 : заявлено 17.11.2017 : опубл. 30.06.2019 / Гракович П. Н., Башлакова А. Л., Кудрицкий В. Г., Иванов Л. Ф. ; заявитель Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси. – С. 3.

17. Полезная модель BY 13582, МПК F 16J 15/00 (2006.01). Уплотнительная манжета : № и 20230239 : заявлено 15.11.2023 : опубл. 05.11.2024 / Башлакова А. Л., Гракович П. Н., Иванов Л. Ф. ; заявитель Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси. – С. 2.

РЭЗІЮМЭ

Башлакова Анна Леанідаўна

Кампазіцыйныя матэрыялы на аснове політэтрафторэтылену для вырабаў машынабудаўнічага прызначэння з аптымальным утрыманнем мадыфікаваных у плазме вугляродных валокнаў

Ключавыя словы: політэтрафторэтылен, вугляроднае валакно, карбід крэмнію, фізіка-механічныя характарыстыкі.

Мэта даследавання: распрацоўка кампазіцыйных матэрыялаў машынабудаўнічага і агульнатэхнічнага прызначэння з аптымальным комплексам эксплуатацыйных уласцівасцей на аснове ПТФЭ, напоўненага вугляроднымі валокнамі мадыфікаванымі ў плазме тлеючага разраду.

Метады даследавання: стандартныя метадыкі вызначэння фізіка-механічных і трыбатэхнічных характарыстык, растровая электронная мікраскапія, рэнтгенаструктурны аналіз, дыферэнцыяльная скануючая каларыметрыя, дынамічны механічны аналіз.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Абгрунтаваны выбар вугляродных валокнаў (ВВ) для напаўнення антыфрыкцыйных фтапластавых кампазітаў. Устаноўлены эфект вызвалення ВВ з кампазіта падчас абляцыйнага ўздзеяння, на падставе чаго распрацаваны арыгінальны спосаб аналізу складу кампазітаў. Паказана, што пры напаўненні 1–3 мас.% паверхня мадыфікаваных ВВ працуе як сукупнасць цэнтраў крышталізацыі ПТФЭ, што дазваляе кіраваць структураўтварэннем і комплексам уласцівасцей кампазіта. Устаноўлены заканамернасці змянення ў залежнасці ад утрымання ВВ фізіка-механічных характарыстык, электрычных характарыстык (лінейна з кропкай перагіну каля 5 мас.%), PV-фактару (лінейны рост з павышэннем напаўнення), інтэнсіўнасці зносу (рэзкае зніжэнне пры напаўненні 5 мас.%), хуткасці рэлаксацыі напружанняў і каэфіцыента цеплаправоднасці. Распрацаваны імпартазамышчальныя кампазіцыйныя матэрыялы з аптымальным спалучэннем пругка-трываласных і трыбатэхнічных уласцівасцей. Модуль пругкасці распрацаваных кампазітаў 600 МПа, PV-фактар у 3,5 разы вышэйшы, чым у зыходнага ПТФЭ.

Вобласць прымянення: машынабудаўнічая і хімічная прамысловасць (вузлы шаравой запорнай арматуры, эластычныя высокатэмпературныя ушчыльняльныя элементы і інш.).

РЕЗЮМЕ

Башлакова Анна Леонидовна

Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена для изделий машиностроительного назначения с оптимальным содержанием модифицированных в плазме углеродных волокон

Ключевые слова: политетрафторэтилен, углеродное волокно, карбид кремния, физико-механические характеристики.

Цель исследования: разработка композиционных материалов машиностроительного и общетехнического назначения с оптимальным комплексом эксплуатационных свойств на основе ПТФЭ, наполненного углеродными волокнами, модифицированными в плазме тлеющего разряда.

Методы исследования: стандартные методики определения физико-механических и триботехнических характеристик, растровая электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, дифференциальная сканирующая калориметрия, динамический механический анализ.

Полученные результаты и их новизна. Обоснован выбор УВ для наполнения антифрикционных фторопластовых композитов. Установлен эффект высвобождения УВ из композита в ходе абляционного воздействия, на основании чего разработан оригинальный способ анализа состава композитов. Показано, что при наполнении 1–3 мас.% поверхность модифицированных УВ работает как совокупность центров кристаллизации ПТФЭ, что позволяет управлять структурообразованием и комплексом свойств композита. Установлены закономерности изменения в зависимости от содержания УВ физико-механических характеристик, электрических характеристик (линейно с точкой изгиба около 5 мас.%), PV-фактора (линейный рост с повышением наполнения), интенсивности изнашивания (резкое снижение при наполнении 5 мас.%), скорости релаксации напряжений и коэффициента теплопроводности. Разработаны импортозамещающие композиционные материалы с оптимальным сочетанием упруго-прочностных и триботехнических свойств. Модуль упругости разработанных композитов 600 МПа, PV-фактор в 3,5 раза выше, чем у исходного ПТФЭ.

Область применения: машиностроительная и химическая промышленность (узлы шаровой запорной арматуры, эластичные высокотемпературные уплотнительные элементы и др.).

SUMMARY

Bashlakova Anna Leonidovna

Composite materials based on polytetrafluoroethylene for machine-building products with an optimal content of plasma-modified carbon fibers

Keywords: polytetrafluoroethylene, carbon fiber, silicon carbide, physical and mechanical characteristics

Research objective: development of composite materials for machine-building and general technical purposes with an optimal set of operational properties based on PTFE and carbon fiber fillers modified in glow discharge plasma.

Research methods: standard methods for determining physico-mechanical and tribotechnical characteristics, scanning electron microscopy, X-ray diffraction analysis, differential scanning calorimetry, dynamic mechanical analysis. Research methods: standard methods for determining physical, mechanical and tribotechnical characteristics, scanning electron microscopy, X-ray diffraction analysis, differential scanning calorimetry, dynamic mechanical analysis.

The results obtained and their novelty. The choice of HC for filling antifriction fluoroplast composites is justified. It is shown that when filling 1-3 mas. % the surface of the modified HC works as a set of PTFE crystallization centers, which makes it possible to control the structure formation and complex properties of the composite by varying the formulation composition. The laws of change depending on the content of HC of the crystallinity of the matrix (non-monotonically due to the occurrence of the paracrystalline phase), physical and mechanical characteristics, electrical characteristics (linearly with a bending point of about 5 mas. %), PV-factor (linear growth with an increase in filling), wear intensity (a sharp decrease when filling 5 wt. %), stress relaxation rate and thermal conductivity coefficient. Import-substituting composite materials with an optimal combination of elastic-strength and tribo-technical properties have been developed. The modulus of elasticity of the developed composites is 600 MPa, the PV factor is 3.5 times higher than that of the original PTFE.

Scope of application: mechanical engineering and chemical industry (ball valve units, elastic high-temperature sealing elements etc.).

ЛИСТ ИСПРАВЛЕНИЙ

в текст автореферата диссертации Башлаковой Анны Леонидовны
«Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена для изделий машиностроительного назначения с оптимальным содержанием модифицированных в плазме углеродных волокон», представленной к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.16.09 «Материаловедение (машиностроение)»

стр.	Написано	Следует читать
оборотная сторона обложки	Защита состоится «29» сентября 2026 г. в 16-00..	Защита состоится «29» сентября 2026 г. в 14-00..
17	2. Установлен характер влияния типа УВ на свойства композита на основе ПТФЭ. Композитам с УВ из ГЦ присущи меньший коэффициент трения (в 1,5 раза), интенсивность изнашивания (в 54 раза ниже) и более высокий PV-фактор (в 5,2 раза выше), чем у содержащих УВ из ПАН, что обуславливает преимущество УВ из ГЦ в качестве наполнителя антифрикционных фторопластовых композитов [2, 9, 10].	2. Установлен характер влияния типа УВ на свойства композита на основе ПТФЭ. Композитам с УВ из ГЦ присущи меньший коэффициент трения (в 1,5 раза), интенсивность изнашивания (в 54 раза ниже) и более высокий PV-фактор (в 5,2 раза выше), чем у содержащих УВ из ПАН, что обуславливает преимущество УВ из ГЦ в качестве наполнителя антифрикционных фторопластовых композитов [2, 3, 4, 9, 10].
18	7. Разработан способ анализа компонентов композита на основе ПТФЭ, состоящий в определении формы и размера наполнителя, который высвобождается после воздействия на фторопластовый композиционный материал излучением непрерывного CO ₂ -лазера с интенсивностью 10–50 Вт/см ² , что позволяет осуществлять контроль качества изготавливаемых композитов и идентифицировать аналогичные композиты импортных производителей [11, 14, 15, 16].	7. Разработан способ анализа компонентов композита на основе ПТФЭ, состоящий в определении формы и размера наполнителя, который высвобождается после воздействия на фторопластовый композиционный материал излучением непрерывного CO ₂ -лазера с интенсивностью 10–50 Вт/см ² , что позволяет осуществлять контроль качества изготавливаемых композитов и идентифицировать аналогичные композиты импортных производителей [1, 4, 5, 11, 14, 15, 16].
19	4. Влияние содержания модифицированных углеродных волокон на физико-механические свойства малонаполненного ПТФЭ / А. Л. Башлакова, В. А. Шелестова, Л. Ф. Иванов, П. Н. Гракович // Полимерные материалы и технологии. – 2021. – Т. 7, № 4. – С. 59–63.	4. Влияние содержания модифицированных углеродных волокон на физико-механические свойства малонаполненного ПТФЭ / А. Л. Башлакова, В. А. Шелестова, Л. Ф. Иванов, П. Н. Гракович // Полимерные материалы и технологии. – 2021. – Т. 7, № 4. – С. 62–67 .
19	6. Влияние ультрадисперсного карбида кремния на структуру и свойства фторопластовых композитов / В. А. Шелестова, Л. Е. Евсеева, В. Г. Лещенко, К. В. Николаева, С. М. Данилова-Третьяк, А. Л. Башлакова, Л. Ф. Иванов // Полимерные материалы и технологии. – 2021. – Т. 7, № 4. – С. 59–63.	6. Влияние ультрадисперсного карбида кремния на структуру и свойства фторопластовых композитов / В. А. Шелестова, Л. Е. Евсеева, В. Г. Лещенко, К. В. Николаева, С. М. Данилова-Третьяк, А. Л. Башлакова, Л. Ф. Иванов // Полимерные материалы и технологии. – 2021. – Т. 7, № 2 . – С. 80–88 .

Соискатель



Башлакова А.Л.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций Д 01.14.01



Винидиктова Н.С.