

На правах рукописи



Тарасова Прасковья Николаевна

**РАЗРАБОТКА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ
ПОЛИТЕТРАФТОРЭТИЛЕНА, АЛЮМОСИЛИКАТОВ ПОДГРУППЫ
КАОЛИНИТА И ШПИНЕЛИ МАГНИЯ**

2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных
полимеров и композитов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
Охлопкова Айталиня Алексеевна,

Официальные оппоненты: **Кропотин Олег Витальевич,** доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», кафедра физики, заведующий;

Русанова Светлана Николаевна, доктор химических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», кафедра технологии пластических масс, доцент.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», г. Москва

Защита диссертации состоится «11» ноября 2026 г. В 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.312.09, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д.68 (А-330, зал заседаний Ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», и на сайте (ФГБОУ ВО «КНИТУ») https://www.kstu.ru/event.jsp?id=182493&id_cat=141

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах с подписями, заверенными печатью, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, ученый совет и на e-mail: upak@kstu.ru.

В отзыве указываются фамилия, имя, отчество (полностью), ученая степень с указанием специальности, ученое звание, наименование организации и должность лица, представившего отзыв, с указанием структурного подразделения, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии) (п. 28 Положения о присуждении ученых степеней).

Автореферат разослан « » июля 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, д-р хим. наук, профессор

Черезова Елена Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время полимерные композиционные материалы (ПКМ) все чаще заменяют металлы и сплавы в машиностроении, обеспечивая высокую надежность и долговечность деталей машин и механизмов. Перспектива применения полимерных материалов в узлах трения обусловлена рядом достоинств таких как меньшая масса, практически бесшумная работа, демпфирующая способность, а также в большинстве случаев работоспособность без применения смазки. Одним из наиболее предпочтительных полимеров для изготовления деталей трибосопряжений является политетрафторэтилен (ПТФЭ), обладающий уникальным сочетанием физико-механических, химических и триботехнических свойств: высокие прочностные характеристики, термо- и морозостойкость, химическая инертность и низкий коэффициент трения. Однако наряду с этим ПТФЭ характеризуется низкой износостойкостью, высокими хладотекучестью и коэффициентом температурного расширения. Одним из наиболее эффективных способов целенаправленного воздействия на структуру и свойства полимера является его наполнение различными соединениями, среди которых особый интерес представляют неорганические и минеральные наполнители. Разработка полимер-силикатных нанокомпозитов – одно из наиболее динамично развивающихся направлений современного материаловедения, которое обусловлено возможностью получения материалов с интеркалированной / эксфолиированной структурой. Среди минеральных наполнителей алюмосиликаты подгруппы каолинита представляют интерес благодаря совокупности их структурно-химических и морфологических особенностей, включая развитую удельную поверхность, высокую степень диспергируемости в полимере, термическую и химическую стабильность, эффект самосмазывания и доступность. Применение метода комбинированного наполнения, в частности, совместное введение глинистых минералов и наноразмерных неорганических частиц, позволяет достигнуть комплекса служебных характеристик: износостойкости, прочности, жесткости и т. д., которые трудно или невозможно получить при использовании одного вида наполнителя. В связи с этим разработка полимерных композиционных материалов на основе ПТФЭ и алюмосиликатов подгруппы каолинита в сочетании с синтетической шпинелью магния представляет большой научный и практический интерес.

Степень разработанности темы. Исследования, посвященные разработкам ПКМ на основе ПТФЭ, проводились ведущими учеными еще в XX в. Значительное число работ посвящено модификации ПТФЭ путем введения наполнителей, что обусловлено необходимостью придания материалу комплекса заданных эксплуатационных характеристик (Ю.К. Машков, В.М. Бузник, А.В. Виноградов, А.А. Охлопкова, Н.А. Адаменко, О.В. Кропотин и др.). Вместе с тем в последние десятилетия активно развиваются исследования, направленные на создание ПКМ на основе полиолефинов, полиамидов, полиимидов и др. полимеров, армированных минеральными и синтетическими силикатами. Тем не менее, несмотря на многообразие научных трудов в данной области, ограниченное количество исследований посвящено разработке ПКМ на основе ПТФЭ со слоистыми силикатами, в том числе, алюмосиликатами каолинитовой подгруппы, что связано с трудностью обеспечения адгезионного взаимодействия между неполярным ПТФЭ и гидрофильными силикатами. В данной работе в качестве модификатора, помимо алюмосиликатных наполнителей (каолинита и галлузита), применялась синтетическая шпинель магния. В серии трудов А.А. Охлопковой, С.А. Слепцовой и Л.С. Пинчука было изучено влияние ультрадисперсных керамик, в том числе шпинели

магния, на свойства ПТФЭ. Авторами было установлено значительное повышение износостойкости материала. Таким образом, комплексное исследование влияния различных типов наполнителей, их морфологических особенностей, концентрации, а также взаимодействия компонентов на процессы формирования надмолекулярной структуры, физико-механические и триботехнические свойства ПКМ обладает высокой научной и практической значимостью.

Цель работы – комплексное исследование влияния алюмосиликатов подгруппы каолинита (каолинита и галлуазита) и шпинели магния на структуру, физико-механические и триботехнические характеристики ПТФЭ и создание на их основе композиционных материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи**:

1. Исследование физико-механических характеристик композитов на основе ПТФЭ, модифицированных алюмосиликатами с различной морфологией частиц и шпинелью магния, в разных температурных режимах.
2. Исследование физико-химических особенностей формирования структуры композитов на основе ПТФЭ, модифицированных алюмосиликатами подгруппы каолинита и шпинелью магния.
3. Исследование триботехнических характеристик и установление закономерностей изнашивания композитов на основе ПТФЭ, алюмосиликатов подгруппы каолинита и шпинели магния.
4. Разработка новых составов композитов на основе ПТФЭ, содержащих алюмосиликаты подгруппы каолинита и шпинель магния, герметизирующего и антифрикционного назначений.

Научная новизна.

1. Исследованы процессы формирования структуры композитов на основе ПТФЭ в зависимости от концентрации и морфологии частиц алюмосиликатов (каолинит – пластинчатая, галлуазит – трубчатая). Впервые, на примере ПКМ на основе ПТФЭ и каолинита показана возможность формирования композитов с эксфолированной структурой, обладающих высокой износостойкостью и оптимальными физико-механическими свойствами.
2. Выявлены закономерности изнашивания ПТФЭ, модифицированного алюмосиликатами и шпинелью магния, в зависимости от содержания наполнителей и морфологии алюмосиликатов. Установлено, что использование алюмосиликата с пластинчатой морфологией (каолинита) обеспечивает формирование материала с улучшенными триботехническими характеристиками. Установлены механизмы изнашивания ПКМ, базирующиеся на образовании защитного слоя вторичной структуры из продуктов трибохимической деструкции ПКМ, состав и структура которой определяются содержанием и типом алюмосиликатного наполнителя.
3. Предложены механизмы трибохимических реакций, включающие процессы окисления с образованием солей перфторкарбоновых кислот, оксидов металлов и фторирования с образованием фторидов металлов, в зависимости от содержания и типа наполнителя. Образующиеся продукты трибохимических превращений являются ингибиторами изнашивания и обеспечивают формирование устойчивого, самоорганизующегося износостойкого трибослоя, повышающего ресурс работы ПКМ в условиях сухого трения.

Практическая и теоретическая значимость полученных результатов. В работе разработаны и оптимизированы составы полимерных композиционных материалов на основе ПТФЭ, алюмосиликатов каолинитовой подгруппы и магниевой

шпинели, обеспечивающие повышенную износостойкость. Полученные композиции предназначены для изготовления уплотнительных и герметизирующих деталей гидравлических систем, сохраняющих работоспособность в широком температурном диапазоне. По предложенным технологиям и рецептурам получен патент РФ №2699109. Разработанные материалы внедрены в качестве уплотнительных колец для редуктора газового баллона ООО «МИП Графен» (г. Якутск) и резьбового соединения на краны газового адсорбера АО «Сахатранснефтегаз» (г. Якутск).

Методология и методы исследования. Исследования проводили с использованием современных физико-химических методов и оборудования (атомно-абсорбционная спектроскопия, анализатор газовой сорбции, лазерный анализатор частиц, рентгеноструктурный анализ, дифференциально сканирующая калориметрия, термомеханический анализ, сканирующая электронная микроскопия, инфракрасная спектроскопия, энергодисперсионная спектроскопия, рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия), применены стандартизированные методы определения свойств полимерных материалов.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Влияние алюмосиликатов подгруппы каолинита с различной морфологией частиц на физико-механические, триботехнические свойства полимерных композиционных материалов на основе ПТФЭ.
2. Закономерности структурообразования в полимерных композиционных материалах при введении комбинированных наполнителей (алюмосиликат + шпинель магния) в зависимости от морфологии и концентрации.
3. Закономерности изнашивания ПКМ на основе ПТФЭ и комбинированных наполнителей – алюмосиликат + шпинель магния, зависящие от морфологии частиц, химической природы, концентрации алюмосиликата и заключающиеся в трибохимическом формировании износостойкого защитного поверхностного слоя.
4. Новые составы композиционных материалов на основе ПТФЭ с комбинацией двух модификаторов (алюмосиликата – каолинита/галлуазита и шпинели магния), характеризующиеся повышенной износостойкостью.

Достоверность результатов подтверждается их воспроизводимостью и взаимной дополняемостью статистически обработанных результатов, полученных с использованием современного оборудования и стандартных методов. Полученные результаты исследования сопоставимы и не противоречат данным других авторов по теме исследования.

Работа **соответствует паспорту специальности 2.6.11** Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов: п. 2, 3, 6.

Апробация работы. Результаты исследований и основные положения работы докладывались на Всеросс. научно-практич. конф. «Материалы XXI» (г. Нерюнгри, 2020); Всеросс. научно-практич. конф. «Полимерные и композиционные материалы в условиях Севера» (г. Якутск, 2021); Международ. конф. «Новые материалы и технологии в условиях Арктики» (г. Якутск, 2022); XXIV Международ. научно-практич. конф. «Химия и химическая технология в XXI веке» (г. Томск, 2023); Международ. симпозиуме «Химия и химическое образование» (г. Владивосток, 2024); Международ. научно-практич. конф. «Новые полимерные композиционные материалы» (г. Нальчик, 2024); XXVI Международ. научно-практич. конф. «Химия и химическая технология в XXI веке» (г. Томск, 2025); Всеросс. научной конф. «Функциональные материалы: Синтез, Свойства. Применение» (г. Санкт-Петербург, 2025).

Публикации. Основное содержание работы изложено в 15 публикациях, в том числе, 4 статьях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, 2 статьях в журналах, индексируемых в базах Web of Science и Scopus, 1 патенте РФ, 8 тезисах и докладах в сборниках материалов конференций.

Личный вклад автора состоит в сборе и анализе данных по теме исследования, участии в формулировке цели и задач работы, постановке экспериментов, обработке и анализе полученных результатов, оформлении в виде научных публикаций и диссертации. Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова» на химическом отделении Института естественных наук.

Связь работы с научными программами: Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках государственных заданий (FSGR-2020-0017, FSRG-2021-0016, FSRG-2023-0026, FSRG-2024-0004).

Структура научно-квалификационной работы. Работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка использованной литературы из 256 источников. Объем работы составляет 195 страниц, включая 88 рисунков, 32 таблицы и 2 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи, определена научная новизна работы и ее теоретическая и практическая значимость, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ современного состояния исследований в области разработки ПТФЭ-композитов. Рассмотрены физико-химические и эксплуатационные свойства политетрафторэтилена, а также подходы к повышению его износостойкости. Систематизированы данные об эффективности слоистых силикатов и алюмосиликатов каолининовой группы в качестве наполнителей и выявлены особенности их структурного строения, влияющие на формирование свойств композитов. На основе проведенного анализа определены цель и задачи работы.

Вторая глава посвящена описанию объектов и методик исследования. Полимерной основой выбран ПТФЭ марки ПН-90 производства АО «ГалоПолимер». В качестве наполнителей выбраны природные алюмосиликаты каолининовой группы с общей формулой $Al_2[Si_2O_5](OH)_4$: каолинит (К) Глуховецкого месторождения и галлуазит (Г) продукт ООО «Молекулярные технологии и новые материалы». Несмотря на одинаковый химический состав, выбранные минералы отличаются геометрией частиц: пластинчатая – у каолинита, трубчатая – у галлуазита. Дополнительным модифицирующим компонентом выбран шпинель магния (ШМ), синтезированная в Институте химии твердого тела и механохимии СО РАН.

Процесс изготовления образцов ПКМ включает несколько последовательных технологических стадий: 1) механическая активация наполнителей в измельчителе-активаторе планетарного типа «Активатор 2S» при ускорении 80 g; 2) смешение компонентов в лопастном смесителе (суммарное содержание наполнителей варьировали от 1 до 5 мас. %); 3) формование методом холодного прессования в гидравлическом прессе при нагрузке 50 МПа и выдержке 2 мин; 4) спекание отпрессованных заготовок при температуре 375°C.

Для установления оптимального режима механоактивации варьировали время обработки – 1, 2 и 3 мин. Подбор осуществляли по результатам исследования текстурных характеристик, а также комплекса структурно-химических свойств с применением методов: атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС), инфракрасной

спектроскопии (ИКС), рентгеноструктурного анализа (РСА) и сканирующей электронной микроскопии (СЭМ).

Для образцов ПКМ исследованы их физико-механические и триботехнические характеристики. Испытания на растяжение и сжатие при разных температурных режимах (комнатной и отрицательной температурах) проведены на универсальной машине испытания «МИМ.2-5-2.1-16.1.2-3.1.1» («ГОСТ», Россия) в соответствии с ГОСТ Р 56800-2015, ГОСТ 9550-81 и ГОСТ 4651-2014. Для проведения испытаний при отрицательной температуре (-50°C) использовали термокриокамеру «КТ-150» («ГОСТ», Россия). Твердость и плотность определены согласно ГОСТ 24621-2015 и ГОСТ 15139-69, соответственно. Трибологические испытания реализованы на трибометре «UMT-3» (CETR) по схеме трения «палец-диск». Испытания проводили при давлении 2 МПа и скорости скольжения 0,2 м/с; в качестве контртела выбран диск из стали 45 со значением твердости 40-50 HRC и шероховатости 0,06-0,08 мкм.

Для анализа структуры ПКМ использовали: рентгеновский порошковый дифрактометр «ARLX'Tra» (ThermoFisher Scientific), сканирующий электронный микроскоп «JSM-7800F» (JEOL), оснащенный системой энергодисперсионного анализа «Oxford Instruments», а также ИК-Фурье-спектрометр «FTIR 7000» (Varian) и рентгеновский фотоэлектронный спектрометр «SPECS» (GmbH). Оценку термодинамических и термомеханических свойств проводили методами дифференциально сканирующей калориметрии (ДСК) и термомеханического анализа (ТМА) с использованием измерительных приборов «DSC 204 F1 Phoenix» (NETZSCH) и «ТМА-60» (Shimadzu), соответственно.

В третьей главе приведены результаты исследования физико-химических свойств и структуры алюмосиликатов подгруппы каолинита, обоснован выбор оптимального режима механической активации. Приведены результаты исследования влияния алюмосиликатов и шпинели магния на физико-механические, термодинамические и термомеханические свойства ПТФЭ, а также на процессы формирования ПКМ.

Обоснование выбора оптимального времени механоактивации (м/а) каолинита и галлуазита проводили на основании результатов исследования текстурных характеристик. Оптимальный режим устанавливали по значениям среднего размера частиц и удельной поверхности. Текстурные характеристики, определенные на анализаторе газовой сорбции «NOVAtouch LX» (Quantachrome), приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Текстурные характеристики алюмосиликатов при разных временных режимах обработки

Время м/а, мин	Каолинит				Галлуазит			
	0	1	2	3	0	1	2	3
Средний размер частиц, нм	167	73	33	86	64	154	168	204
Удельная поверхность, м ² /г	14	31	35	27	36	19	17	14

Анализ механоактивированных порошков алюмосиликатов показал, что оптимальная продолжительность механической обработки каолинита, обеспечивающая максимальное диспергирование частиц, составляет 2 мин. В отличие от этого, механоактивация галлуазита приводит к агломерации частиц, сопровождающейся снижением удельной поверхности в 2-2,5 раза и соответствующим увеличением среднего размера частиц в 2-3 раза. Результаты анализа фракционного

распределения и среднего размера частиц, выполненного на «Analysette 22» (Fritsch), дополнительно подтверждают преимущество механической активации каолинита. Для галлузита, напротив, обработка сопровождается агломерацией.

Исследование кристаллической структуры алюмосиликатов проводили с помощью РСА; рентгенограммы исходных и механоактивированных порошков представлены на рисунке 1.

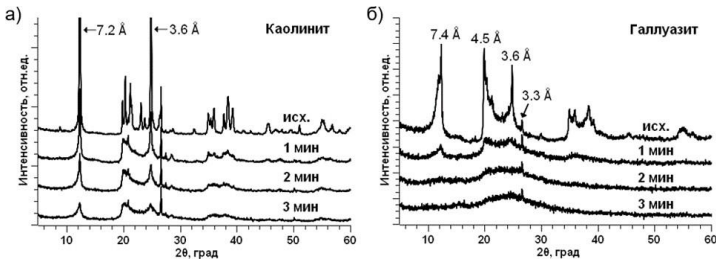


Рисунок 1. Рентгенограммы каолинита (а) и галлузита (б) в зависимости от времени механоактивации

Анализ полученных рентгенограмм свидетельствует о том, что с увеличением продолжительности механической обработки происходит постепенный переход материалов в метастабильное / аморфное состояние, указывающее на существенное влияние механоактивации на кристаллическую структуру алюмосиликатов. Наибольшим изменениям подвергается галлузит: механоактивация в течение 3 мин приводит к практически полной аморфизации его кристаллической структуры. В случае каолинита, несмотря на снижение интенсивностей базальных рефлексов, наблюдается сохранение основных кристаллических пиков.

В дополнение к дифракционному методу анализа проведено ИК-спектроскопическое исследование. Сравнение ИК-спектров механоактивированных порошков с исходными образцами также выявило переход материалов в полукристаллическое / аморфное состояние. При этом наблюдались следующие изменения: снижение, уширение и сглаживание интенсивностей характеристических полос поглощения, а также их смещение в высокочастотную область. Согласно литературным данным, наблюдаемые изменения указывают на протекание силовых деформаций в тетраэдрических позициях, обусловленных разрушением октаэдрических сеток алюмосиликатов под воздействием механической энергии. Методом ААС подтверждено повышение содержания катионов алюминия при механической активации (таблица 2) в результате высвобождения из октаэдрических структур. Так, после 3 мин обработки у каолинита наблюдается повышение содержания Al^{3+} практически в 2 раза. Следовательно, полученные данные подтверждают, что механические воздействия вызывают нарушение целостности октаэдрических слоев алюмосиликатной структуры, сопровождающееся высвобождением ионов Al^{3+} .

Таблица 2 – Содержание подвижных катионов алюминия в вытяжках алюмосиликатов

	Галлузит	Каолинит			
		0	1 мин	2 мин	3 мин
Содержание Al^{3+} , мг/л	28	15	21	25	31

Таким образом, результаты исследования свойств и структуры алюмосиликатов каолининовой подгруппы позволили выявить, что для каолинита 2-минутная обработка является оптимальной, при которой достигается максимальное диспергирование частиц и, следовательно, повышение его реакционной способности. В случае галлуазита происходит разрушение структуры нанотрубок, приводящее к агломерации и аморфизации частиц. Исходя из результатов далее был использован галлуазит без предварительной механоактивации.

Данные физико-механических испытаний разработанных ПКМ при различном составе и содержании наполнителей приведены на рисунке 2.

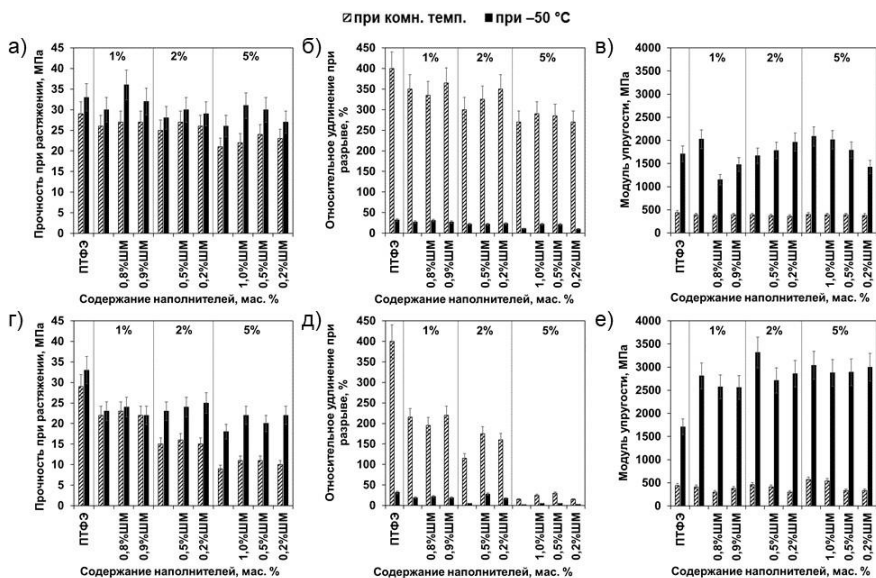


Рисунок 2. Физико-механические характеристики ПТФЭ и ПКМ при комнатной и отрицательных температурах в зависимости от состава и содержания наполнителей: а,б,в – с каолинитом и ШМ; г,д,е – с галлуазитом и ШМ

В ходе исследования были определены физико-механические характеристики исследуемых ПКМ в различных температурных режимах. Анализ прочностных показателей композитов при комнатной температуре свидетельствует, что введение каолинита и ШМ в основном способствует сохранению деформационно-прочностных характеристик на уровне исходного ПТФЭ, однако при превышении степени наполнения 2 мас. % наблюдается их некоторое снижение. Из литературных данных известно, что сохранение данных показателей может наблюдаться при условии достижения эффективного межфазного взаимодействия между полимерной матрицей и наполнителями. В случае введения галлуазита и ШМ во всех составах зарегистрировано снижение показателей физико-механических свойств, что обусловлено охрупчиванием материала. Данный эффект вызван снижением релаксационных процессов в системе вследствие введения значительного количества наполнителей и образования дефектных областей.

Анализ низкотемпературных испытаний ПКМ при -50°C выявил изменения физико-механических характеристик. Зарегистрировано повышение прочности на 5-

120% и модуля упругости на 550-850%, а также снижение относительного удлинения при разрыве на 80-95% для всех составов композитов. Наблюдаемые изменения, прежде всего, обусловлены снижением релаксационных процессов в аморфной фазе и переходом материалов в триклинное фазовое состояние, при котором разрушение протекает по хрупкому механизму, характеризующему практически полным отсутствием пластического деформирования. При данном температурном режиме деформирование материалов носит упругий характер, который требует приложения более высоких напряжений, что и объясняет повышение прочности. На рисунке 3 представлены СЭМ-изображения зон разрушения образца ПКМ при разных температурных режимах.

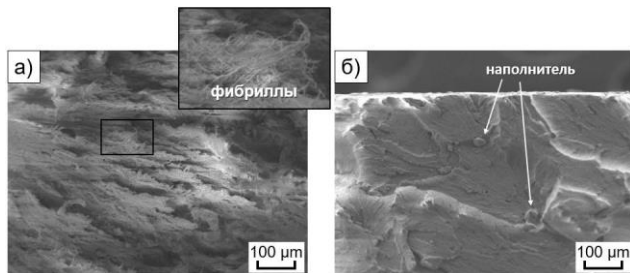


Рисунок 3. СЭМ-изображения зон разрушения ПКМ, содержащего 1,5 мас. % каолинита и 0,5 мас. % ШМ при комнатной (а) и отрицательной (б) температурах

На микрофотографиях зон разрушения композита, полученных при различных температурных режимах, отчетливо наблюдаются различия в механизме деформации, обусловленные условиями испытаний. При -50°C реализуется хрупкое разрушение, о чем свидетельствует наличие на поверхности излома частиц наполнителей. В то время как, разрушение при $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$ происходит по вязкому механизму, сопровождающемуся накоплением пластических деформаций; при этом фибриллы ПТФЭ ориентируются из зоны концентрации напряжений и формируются вдоль направления прикладываемой нагрузки.

Исследование физико-механических свойств материалов при сжатии, особенно в условиях отрицательных температур, имеет ключевое значение для оценки их надежности в качестве уплотнительных и конструктивных элементов при эксплуатации в широком диапазоне рабочих температур. Так, на рисунке 4 представлены результаты испытания ПКМ на сжатие (при заданной установленной деформации 10%), определенных при разных температурах. Результаты испытаний на сжатие свидетельствуют о том, что введение алюмосиликатных наполнителей и ШМ обеспечивает повышение прочности при сжатии на 5-40% по сравнению с исходным ПТФЭ.

При снижении температуры данный эффект усиливается вследствие развития нескольких взаимодополняющих механизмов, связанных с механическим армированием, распределением нагрузки и взаимодействием с температурными изменениями в полимере. Максимальный прирост прочности при сжатии, равный 48 ± 3 МПа, зафиксирован для композитов, содержащих галлузит. Наблюдаемый эффект обусловлен упрочняющим действием нанотрубок в полимере, которые формируют внутренний каркас и эффективно воспринимают прикладываемую нагрузку.

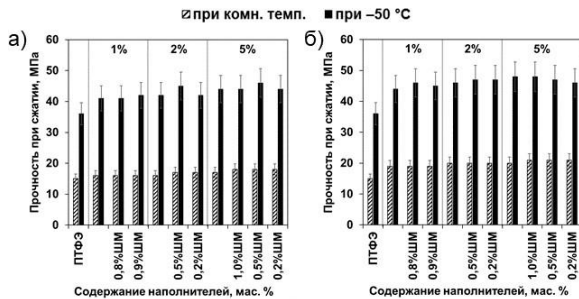


Рисунок 4. Прочность при сжатии ПТФЭ и ПКМ в зависимости от состава и содержания наполнителей, определенных при разных температурах: а) каолинит и ШМ; б) галлаузит и ШМ

Еще одним из ключевых методов исследования материалов при температурном воздействии является ТМА, на основе данных которого сформулированы следующие положения. ПКМ, содержащие галлаузит, продемонстрировали наибольшее снижение коэффициента линейного термического расширения (КЛТР) и являются предпочтительными для эксплуатации в области промежуточных температур – от 0 до ~300 °C, тогда как ПКМ с каолинитом обеспечили более стабильные показатели во всем исследованном температурном диапазоне от -50°C до 370°C. Также были проведены исследования по определению термодинамических характеристик исследуемых композитов методом ДСК. Установлено, что введение алюмосиликатов и ШМ в ПТФЭ сопровождается изменением термодинамических свойств, а именно: повышением энтальпии плавления и степени кристалличности.

Для оценки воздействия наполнителей на процессы структурообразования был выполнен комплекс структурных исследований с использованием РСА и СЭМ; результаты исследований отражены на рисунке 5.

Надмолекулярная структура ПТФЭ, характеризуемая как ленточная, претерпевает изменения при введении алюмосиликатов и ШМ. Так, при введении наполнителей наблюдается трансформация надмолекулярной структуры ПТФЭ с формированием сферолитоподобных образований, где частицы наполнителей выполняют функцию зародышей кристаллизации. Для ПКМ с галлаузитом характерна мелкосферолитная надмолекулярная структура. На СЭМ-изображениях идентифицированы нанотрубки галлаузита, хаотично распределенные в полимере и деноструирующие соразмерность с толщиной ламелей ПТФЭ.

Дифракционные пики 001 и 002, указанные на рентгенограммах ПКМ, соответствуют базальным отражениям алюмосиликатов и характеризуют их слоевую периодичность. Отсутствие базальных рефлексов на рентгенограммах полимерных композитов, содержащих механоактивированный каолинит и ШМ, свидетельствует о расслоении алюмосиликата и формировании эксфолированной структуры. Наблюдаемый эффект указывает о достижении эффективного межфазного взаимодействия компонентов, что позволило сохранить физико-механические свойства ПКМ на уровне, сопоставимом с исходным ПТФЭ. На рентгенограммах ПКМ, содержащих галлаузит и ШМ, базальные рефлексы сохраняются, что обусловлено отсутствием воздействия механоактивации на кристаллическую структуру наполнителя и является ожидаемым результатом.

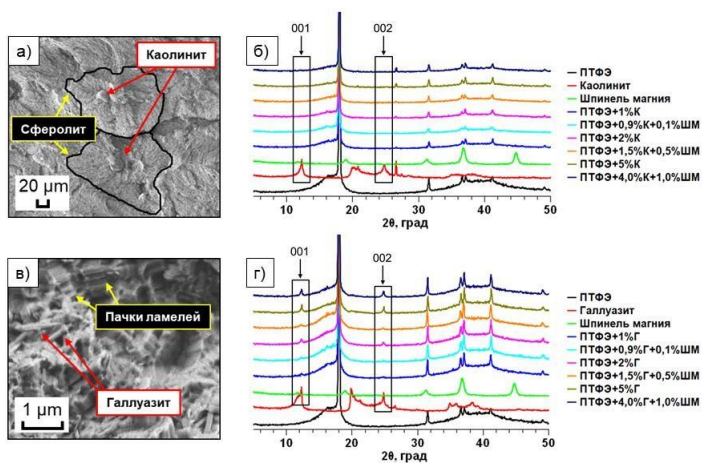


Рисунок 5. Надмолекулярная структура (а,в) и рентгенограммы (б,г) ПКМ, содержащих: а, б – каолинит и ШМ; в, г – галлуазит и ШМ

В четвертой главе обобщены результаты триботехнических испытаний и структурно-химического анализа поверхностей трения ПКМ, полученные методами СЭМ, ИКС и РФЭС. Триботехнические характеристики материалов представлены на рисунках 6 и 7.

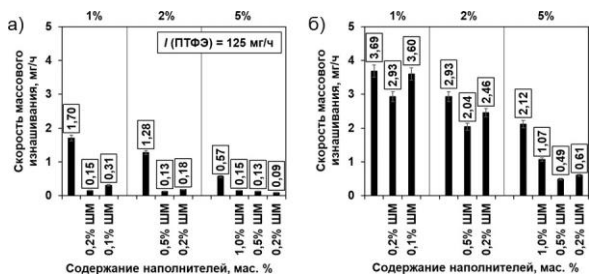


Рисунок 6. Скорость массового изнашивания ПКМ в зависимости от состава и содержания наполнителей: а) каолинит и ШМ; б) галлуазит и ШМ

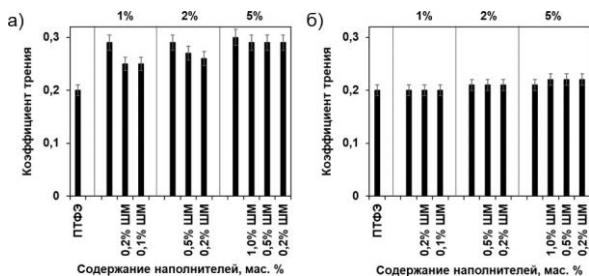


Рисунок 7. Коэффициент трения ПТФЭ и ПКМ в зависимости от состава и содержания наполнителей: а) каолинит и ШМ; б) галлуазит и ШМ

Анализ триботехнических свойств выявил влияние алюмосиликатных наполнителей и ШМ на износостойкость ПТФЭ. В частности, введение каолинита обеспечивает повышение износостойкости в 220 раз, а галлузита – в 60 раз. Дополнительная модификация ШМ приводит к значительному улучшению триботехнических характеристик композитов. Так, использование комбинированного наполнения «каолинит+ШМ» способствует повышению износостойкости ПТФЭ в **1380 раз**, а комбинация «галлузит+ШМ» – в **205 раз**. Введение каолинита способствовало повышению коэффициента трения на 25-50%. Для ПКМ с галлузитом и ШМ коэффициент трения остается практически неизменным и характеризуется значением, сопоставимым с исходным полимером (0,20-0,22). Данный эффект обусловлен реализацией нанотрубками ориентационных механизмов аналогично любым волокнистым наполнителям. Повышение коэффициента трения в ПКМ с каолинитом, вероятно, связано с формированием более прочной и износостойкой структуры на фрикционной поверхности. Поскольку химический состав алюмосиликатов в исследуемых образцах идентичен, выявленные отличия в их трибологическом поведении могут быть объяснены исключительно влиянием морфологии частиц, которая обуславливает характер формирования вторичной структуры. Стабильность и свойства этого трибослоя выступают ключевым механизмом, обеспечивающим повышенную износостойкость материалов на основе ПТФЭ.

СЭМ-изображения поверхностей трения ПКМ представлены на рисунке 8.

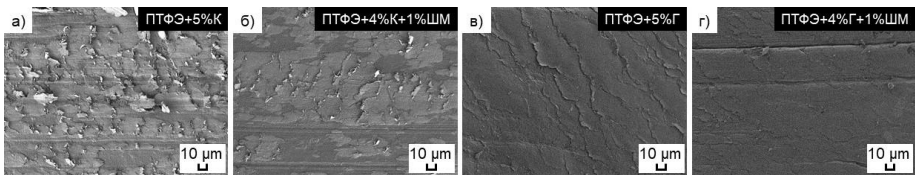


Рисунок 8. СЭМ-изображения поверхностей трения ПКМ, содержащих: а) 5 мас. % К; б) 4 мас. % К и 1 мас. % ШМ; в) 5 мас. % Г; г) 4 мас. % Г и 1 мас. % ШМ

Фрикционные поверхности ПКМ характеризуются формированием фрагментированных структурных элементов в виде «чешуек». При этом морфология фрикционных поверхностей ПКМ, наполненных галлузитом, отличается от морфологии ПКМ с каолинитом и характеризуется образованием дискретных вторичных структур, а также заметны параллельные борозды, ориентированные по направлению скольжения. Полученные микроснимки поверхностей трения композитов согласуются с результатами трибологических испытаний: образцы с галлузитом менее износостойки, чем ПКМ с каолинитом. Для оценки элементного состава поверхности трения ПКМ проведено ЭДС-исследование, результаты которого представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Элементный анализ до и после трения ПКМ

Элемент		C	O	F	Mg	Al	Si	Fe
<i>ПТФЭ+4%К+1%ШМ</i>								
До трения	Содержание,	21,29	4,39	71,23	0,22	1,01	1,86	-
После трения	%	15,23	13,07	39,75	0,30	1,65	1,55	28,45
<i>ПТФЭ+4%Г+1%ШМ</i>								
До трения	Содержание,	26,80	-	71,69	0,33	0,84	0,33	-
После трения	%	28,45	16,71	49,51	0,89	3,42	1,02	-

При анализе элементного состава поверхности трения ПКМ, модифицированного каолинитом и ШМ, обнаружено появление сигнала Fe в результате абразивного воздействия наполнителей на стальное контртело. Одновременно зафиксирован рост доли кислорода, подтверждающий развитие окислительных реакций в зоне фрикционного контакта. В противоположность этому, на поверхности ПКМ, содержащего галлуазит и ШМ, сигнал Fe не выявлен. Тем не менее наличие пика кислорода, отсутствовавшего на исходной поверхности, свидетельствует о протекании трибоокислительных процессов. Остальные сигналы (C, F, Mg, Al, Si) относятся к ПТФЭ и наполнителям. Для детального изучения трибоокислительных превращений, сопровождающих трение, выполнены ИК-спектроскопические исследования, результаты которых представлены на рисунке 9.

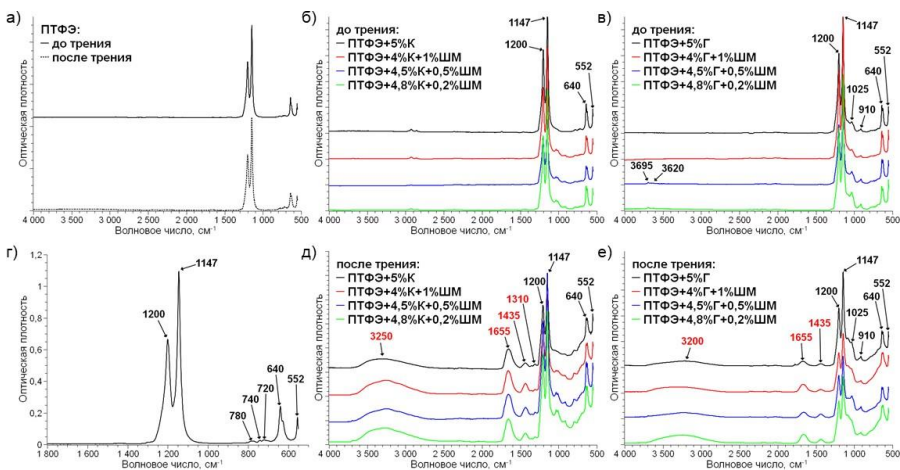


Рисунок 9. ИК-спектры ПТФЭ (а,г) и ПКМ до (б,в) и после (д,е) трения

Фрикционное воздействие не приводит к заметным изменениям в ИК-спектрах ПТФЭ: спектральные кривые до и после испытания практически идентичны (рисунок 9, а). Характерные полосы поглощения, представленные на рисунке 9 (г), соответствуют валентным, веерным и деформационным колебаниям фторуглеродной связи. На ИК-спектрах композитов до трения зафиксированы пики, характерные для ПТФЭ и алюмосиликатных наполнителей (1025 и 910 см⁻¹). В результате трения в спектрах ПКМ фиксируется возникновение новых характеристических полос поглощения. Наблюдается интенсивный широкий максимум в интервале 3600-2500 см⁻¹, обусловленный валентными колебаниями гидроксильных групп. Кроме того, регистрируются полосы при 1655, 1435 и 1310 см⁻¹, соответствующие асимметричному и симметричному колебаниям карбоксилатных анионов. При этом максимумы при 1655 и 1435 см⁻¹ соответствуют солям перфторкарбоновых кислот. Обнаружение пиков данных групп свидетельствует об окислении фрагментов трибораспада ПТФЭ под действием фрикционного напряжения с участием кислорода воздуха. Следует отметить, что в образцах с галлуазитом интенсивность полос поглощения, соответствующих окисленным фрагментам, ниже, чем в аналогичных ПКМ с каолинитом. Полученные данные подтверждают реализацию ориентационных эффектов нанотрубками галлуазита, что обеспечивает низкое сопротивление трению без значительного локального нагрева в зоне контакта ПКМ-контртело.

Дополнительный анализ структурно-химического состояния поверхностных слоев выполнен с помощью РФЭС (рисунок 10).

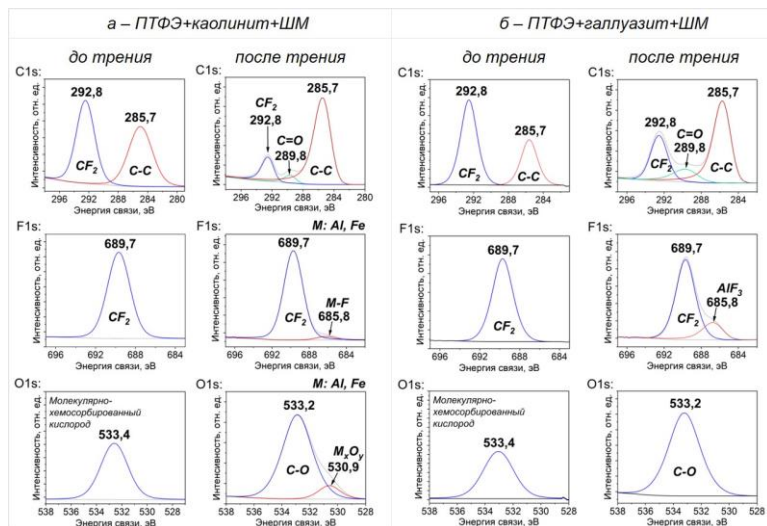


Рисунок 10. РФЭС-спектры до и после трения ПКМ, содержащих:
а) каолинит и ШМ; б) галлаузит и ШМ

Анализ РФЭС-спектров ПКМ до и после трения подтвердил протекание трибохимических процессов, что также согласуется с результатами СЭМ, ЭДС и ИКС. После трения в области спектральных линий C1s наблюдается появление нового пика с $E_{св} = 289,8$ эВ, который относится к связи $C=O$. В областях C1s и F1s наблюдается снижение интенсивности пиков, относящихся к связи $C-F$, что свидетельствует о деградации фторуглеродных связей ПТФЭ под действием фрикционной нагрузки. Кроме того, в области F1s отчетливо наблюдается плечо с $E_{св} = 685,8$ эВ, который может быть отнесен к фториду металла (железа или алюминия). В ПКМ, содержащих галлаузит, данный пик соответствует фториду алюминия, так как согласно результатам ЭДС образование соединений железа в этих композиционных системах не зафиксировано. Анализ области O1s выявил широкий пик с основным максимумом при $E_{св} = 533,2$ эВ, соответствующий связям углерода с кислородом: $C-O$, $C=O$ и COO . В спектре наблюдается плечо при $E_{св} = 530,9$ эВ, характерное для оксидов железа и/или алюминия. Важно подчеркнуть, что формирование оксидной фазы зафиксировано исключительно в композитах с каолинитом. В частности, появление оксида железа, вероятно, обусловлено переносом железа в ходе трения, что подтверждается данными ЭДС.

В целом, наблюдаемые явления свидетельствуют о том, что в процессе трения не только происходит образование кислородсодержащих групп как прямой результат окисления, но и активируются реакции фторирования, включающие участие компонентов системы «ПКМ-контртело» в формировании вторичного слоя. В совокупности все вышеуказанные соединения входят в состав продуктов износа, накапливающихся на поверхности трения и влияющих на изменение трибологических

характеристик ПКМ в целом. Трибохимические реакции, протекающие при трении ПКМ, представлены на рисунке 11.

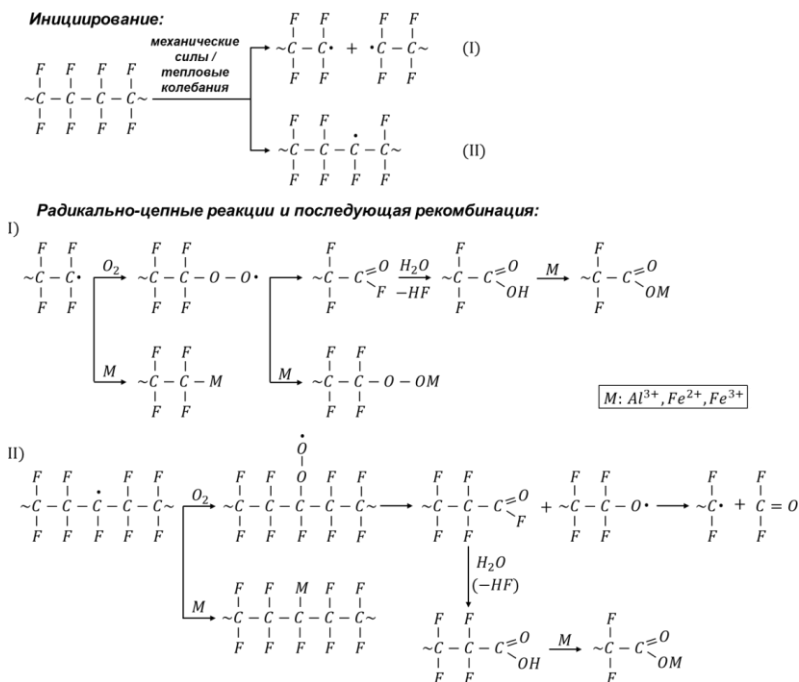


Рисунок 11. Схема трибохимических превращений

Из ранее проведенных исследований в области трибохимии ПТФЭ известно, что инициирование трибохимических реакций обусловлено разрывом связей C–C и C–F в ПТФЭ в условиях фрикционного нагружения и нагрева. Дальнейшее развитие радикально-цепных реакций происходит при участии окружающей среды, в частности кислорода воздуха. Формирование основных продуктов реакций – солей перфторкарбоновых кислот, реализуется через стадию образования промежуточного соединения, представляющего собой ацилфторид. Образование фторидов металлов (железа и алюминия) может протекать как в результате дефторирования цепи ПТФЭ, так и в ходе развития радикально-цепных реакций с участием фтороводорода (HF), являющегося одним из продуктов трибохимических превращений.

В серии трудов А.А. Охлопковой подтверждено, что в процессе трибодеструкции ПТФЭ наряду с деструктивными процессами развиваются и структурирующие процессы при участии частиц наполнителя. Наполнитель благодаря высокой поверхностной и электронодонорной активности выступает в качестве агента сшивки фрагментов трибораспада ПТФЭ, приводящее к повышению износостойкости ПКМ. Введение шпинели магния приводит к повышению износостойкости композитов на 3-6 порядков, что обусловлено развитием структурирующих процессов в поверхностных слоях при трении. Кроме того, решающую роль в фрагментации макромолекул ПТФЭ по связям C–F играет химическая природа наполнителя. В ПТФЭ связи C–F обладают значительной полярностью вследствие высокой

электроотрицательности атома фтора. В результате атомы углерода приобретают электронодефицитный характер и выступают в качестве центров нуклеофильной атаки. Роль активных электронодоноров (нуклеофилов) при этом выполняют частицы наполнителя, характеризующиеся повышенной делокализованной электронной плотностью. Следствием такого взаимодействия является расщепление связи $C-F$ по механизму нуклеофильного замещения с образованием фторид-ионов. Высвобождающиеся фторид-ионы способны в дальнейшем образовать соответствующие фториды металлов (рисунок 12).

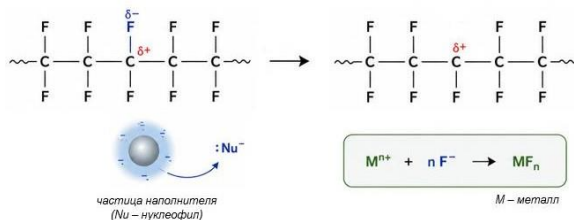


Рисунок 12. Схема расщепления связи $C-F$ по механизму нуклеофильного замещения

Таким образом, предложенные механизмы трибохимических превращений полностью подтверждают состав продуктов износа, а также описывают наблюдаемые процессы трибохимической деструкции ПТФЭ и формирования вторичной структуры в композитной системе «ПТФЭ+алюмосиликат+ШМ». Совокупность трибохимических реакций может рассматриваться как основной фактор снижения износа ПКМ на основе ПТФЭ, поскольку именно эти химические превращения обеспечивают формирование защитного слоя вторичной структуры и, как следствие, существенное повышение износостойкости и увеличение ресурса работы деталей в условиях сухого трения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований можно сформулировать следующие выводы:

1. Выявлено влияние механической активации на физико-химические и структурно-морфологические свойства алюмосиликатов подгруппы каолинита: каолинита и галлуазита. Установлено, что механоактивация каолинита в течение 2 мин обеспечивает максимальную степень диспергирования частиц, увеличение их удельной поверхности, тогда как механообработка галлуазита приводит к агрегации и деструкции нанотрубчатой морфологии. С использованием методов РСА и ИКС зафиксирован переход каолинита в полукристаллическое состояние, а галлуазита в аморфное состояние. Методом ААС выявлено повышение содержания катионов алюминия после механоактивации каолинита, что свидетельствует о высвобождении катионов из октаэдрических структур в результате их разрушения.

2. Исследованы физико-механические и триботехнические свойства ПКМ на основе ПТФЭ в зависимости от состава, содержания и морфологии алюмосиликата каолиновой подгруппы. Установлено, что различия в свойствах разработанных ПКМ обусловлены морфологическими особенностями алюмосиликатов. Показано преимущество наполнения ПТФЭ алюмосиликатом с пластинчатой морфологией частиц – каолинитом, при котором зафиксировано значительное повышение износостойкости при сохранении допустимых физико-механических свойств. Установлено, что введение каолинита и ШМ при суммарной концентрации не

превышающих 2 мас. % позволяет сохранить физико-механические характеристики на уровне исходного ПТФЭ, тогда как введение галлуазита совместно со ШМ приводит к их снижению. Выявлено, что комбинированное наполнение каолином и ШМ обеспечивает повышение износостойкости в 1380 раз, а галлуазитом и ШМ – в 205 раз по сравнению с ненаполненным ПТФЭ.

3. Выявлены особенности механического поведения ПКМ в условиях низких температур. Установлено, что при понижении температуры наблюдается повышение прочности при растяжении и модуля упругости, при некотором снижении относительного удлинения при разрыве ПКМ. Наблюдаемые изменения связаны с переходом материалов в триклинное фазовое состояние, при котором наблюдается снижение подвижности макромолекул, сопровождаемое снижением релаксационных процессов и повышением жесткости. По результатам низкотемпературных испытаний на сжатие установлено, что разработанные ПКМ превосходят ненаполненный ПТФЭ прочностью при сжатии и обладают потенциалом для применения в качестве антифрикционных материалов в условиях низких температур.

4. Установлены закономерности структурообразования в ПТФЭ при введении наполнителей в зависимости от состава, содержания и морфологии алюмосиликатов. Показано, что введение наполнителей сопровождается трансформацией надмолекулярной структуры ПТФЭ с формированием сферолитоподобных образований. Впервые, на примере ПТФЭ, модифицированного каолином и ШМ, показана возможность получения композиционных материалов с эксфолиированной структурой, характеризующихся повышенной износостойкостью. Установлено, что определяющее значение для формирования интеркалированной / эксфолиированной структуры в ПКМ имеет морфология алюмосиликата.

5. Выявлены закономерности процессов изнашивания ПКМ на основе ПТФЭ, модифицированных алюмосиликатами подгруппы каолинита и ШМ. Установлено, что комплексное наполнение ПТФЭ каолином и ШМ обеспечивает оптимальное сочетание износостойкости и механической целостности материала, что обусловлено формированием наполнителями внутреннего структурного каркаса, эффективно ограничивающего пластическую деформацию и сдвиговые перемещения в условиях фрикционного воздействия. В свою очередь, гибридная система наполнения «галлуазит+ШМ», уступая по износостойкости композитам с каолином, обеспечивает сохранение низкого коэффициента трения на уровне исходного ПТФЭ, что обусловлено проявлением ориентационных эффектов нанотрубками галлуазита. Установлено, что основным фактором повышения износостойкости материала является формирование на поверхности трения защитного слоя вторичной структуры, состоящего из компонентов композита и продуктов износа, образующихся в результате трибохимической деструкции ПКМ в процессе фрикционного нагружения.

6. Установлены закономерности трибохимических реакций в зоне металлополимерного фрикционного контакта. Спектральными методами идентифицированы продукты износа, подтверждающие участие систем «ПТФЭ+алюмосиликат+ШМ» и контртела в формировании износостойкой вторичной структуры. На основе результатов предложен механизм трибохимических реакций, включающих процессы окисления и фторирования с образованием продуктов на основе солей перфторкарбоновых кислот и фторидов/оксидов металлов. Установлено, что формирование вторичной структуры на поверхности трения ПКМ снижает сдвиговые деформации при трении и защищает материал от дальнейшего изнашивания.

7. Разработаны новые составы полимерных композиционных материалов на основе ПТФЭ, алюмосиликатов каолининовой подгруппы и шпинели магния, обладающие повышенной износостойкостью с оптимальным сочетанием физико-механических свойств. Разработанные ПКМ не уступают по триботехническим и деформационно-прочностным свойствам существующим промышленным аналогам.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования

Дальнейшее развитие работы может быть направлено на установление фундаментальных закономерностей влияния дисперсности, состава, структуры комплексных модификаторов, включающих природные и синтетические силикаты, на свойства полиолефинов и на разработку на их основе высокотехнологичных материалов с заданным комплексом свойств. Разработанные составы ПКМ могут расширить области применения и ассортимент деталей и комплектующих технических систем, способствуя внедрению импортозамещающих решений в промышленности России.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах из рекомендованного списка ВАК РФ

1. Тарасова, П.Н. Структура и свойства полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена и галлузита разных марок / **П.Н. Тарасова**, Ю.В. Капитонова, Н.П. Сивцева-Гладкина [и др.] // Вопросы материаловедения. – 2025. – №. 3 (123). – С. 108-121.
2. Тарасова, П.Н. Исследование влияния алюмосиликатов подгруппы каолинита на свойства и структуру политетрафторэтилена / **П.Н. Тарасова**, Ю.В. Капитонова, Н.Н. Лазарева [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. – 2024. – № 5(57). – С. 135-143.
3. Тарасова, П.Н. Уплотнительные материалы на основе политетрафторэтилена для авиационной техники / **П.Н. Тарасова**, С.А. Слепцова, С. Лаукканен [и др.] // Авиационные материалы и технологии. – 2022. – № 1(66). – С. 51-64.
4. Лаукканен, С. Влияние механоактивированных каолина и шпинели магния на свойства политетрафторэтилена / С. Лаукканен, С.А. Слепцова, **П.Н. Тарасова** [и др.] // Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – № 3(21). – С. 18-23.

Публикации в рецензируемых журналах в WoS / Scopus

5. Tarasova, P.N. Effect of Kaolinite Subgroup Aluminosilicates and Magnesium Spinel Hybrid Fillers on the Properties of PTFE Composites / **P.N. Tarasova**, S.N. Danilova, Y.V. Kapitonova [et al.] // Mechanics of Advanced Materials and Structures. – 2026. – P. 2611318.
6. Tarasova, P.N. The Influence of Mechanically Activated Kaolinite and Magnesium Spinel on Tribological Properties and Structure of PTFE Friction Surfaces / **P.N. Tarasova**, S.N. Danilova, A.A. Okhlopova, N.N. Lazareva // Journal of Friction and Wear. – 2022. – Vol. 43, No. 5. – P. 312-317.

Патент

7. Пат. 2699109 РФ, МПК C08J 5/16, C08L 27/18, C08K 3/22. Полимерный материал триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена, механоактивированных каолина и шпинеля магния / Лаукканен Э.А.С., **Тарасова П.Н.**, Слепцова С.А. [и др.]; заявитель и патентообладатель Северо-Восточный федеральный ун-т им. М.К. Аммосова. – № 2019109138; заявл. 29.03.2019; опубл. 03.09.2019, Бюл. № 25. – 6 с.

Тезисы докладов и материалы конференции

8. Тарасова, П.Н. Полимерные композиты на основе политетрафторэтилена и глинистых минералов / **П.Н. Тарасова**, Ю.В. Капитонова, Н.Н. Лазарева [и др.] // Сб. тезисов докладов Всеросс. молодежной научн. конф. с международ. участием «Функциональные материалы: Синтез. Свойства. Применение». – Санкт-Петербург, 2025. – С. 188-189.
9. Тарасова, П.Н. Разработка и исследование полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена и алюмосиликатов: каолинита и галлуазита / **П.Н. Тарасова**, Ю.В. Капитонова, Н.Н. Лазарева [и др.] // Сб. материалов XXVI Международ. научно-практич. конф. студентов и молодых ученых «Химия и химическая технология в XXI веке». – Томск, 2025. – С. 305-306.
10. Тарасова, П.Н. Исследование влияния алюмосиликатов подгруппы каолинита на свойства и структуру политетрафторэтилена / **П.Н. Тарасова**, Ю.В. Капитонова, Н.Н. Лазарева [и др.] // Сб. материалов XX Международ. научно-практич. конф. «Новые полимерные композиционные материалы». – Нальчик, 2024. – С. 295.
11. Тарасова, П.Н. Разработка полимерных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена и алюмосиликатов подгруппы каолинита / **П.Н. Тарасова**, Ю.В. Капитонова, Н.Н. Лазарева [и др.] // Сб. материалов IX Международ. симпозиума «Химия и химическое образование». – Владивосток, 2024. – С. 152-153.
12. Тарасова, П.Н. Исследование влияния каолинита и шпинели магния на свойства и структуру политетрафторэтилена / **П.Н. Тарасова**, Ю.В. Капитонова, А.А. Охлопкова // Сб. материалов XXIV Международ. научно-практич. конф. студентов и молодых ученых «Химия и химическая технология в XXI веке». – Томск, 2023. – С. 388.
13. Тарасова, П.Н. Разработка материалов триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена и слоистых силикатов со структурой 1:1 / **П.Н. Тарасова** // Сб. материалов V Международ. конф. «Новые материалы и технологии в условиях Арктики». – Якутск, 2022. – С. 188-190.
14. Тарасова, П.Н. Уплотнительные и антифрикционные материалы на основе политетрафторэтилена и слоистых силикатов со структурой 1:1 / **П.Н. Тарасова**, С.А. Слепцова // Сб. материалов Всеросс. научно-практич. конф. с международ. участием «Полимерные и композиционные материалы в условиях Севера». – Якутск, 2021. – С. 72-75.
15. Тарасова, П.Н. Разработка и исследование свойств полимерных композитов на основе политетрафторэтилена, модифицированного каолинитом и шпинелью магния / **П.Н. Тарасова**, С. Лаукканен, С.А. Слепцова // Сб. материалов XXI Всеросс. научно-практич. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов. – Нерюнгри, 2020. – С. 53-55.

Подписано в печать 09.07.2026. Формат 60х84/16.

Печать цифровая. Усл.-печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № 156.

Издательский дом Северо-Восточного федерального университета
677891, г. Якутск, ул. Петровского, 5.

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ИД СВФУ