

«УТВЕРЖДАЮ»

директор федерального

государственного бюджетного  
учреждения науки «Байкальский  
институт природопользования СО РАН»  
д-р. физ.-мат. наук Е.Ж. Гармаев



«26» февраля 2025 г.

## ОТЗЫВ

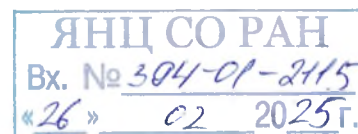
ведущей организации на диссертационную работу  
**Марковой Марфы Алексеевны «Разработка композиционных материалов  
триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена,  
модифицированного углеродным волокнистым наполнителем»,**  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 2.6.17 – Материаловедение (технические науки)

Политетрафторэтилен (ПТФЭ) благодаря своим уникальным свойствам считается одним из распространенных полимерных материалов, используемых в узлах трения в машиностроении, и имеет большой потенциал для использования в арктических условиях. Изделия из ПТФЭ обладают низким коэффициентом трения и широким диапазоном рабочих температур. Кроме того, они практически не поглощают воду и устойчивы к воздействию агрессивных химических сред. Однако ПТФЭ имеет и значительные недостатки, такие как высокую ползучесть, низкую износостойкость и слабую адгезию с армирующими модификаторами, что определяет необходимость проведения исследований по поиску новых технологических способов устранения описанных недостатков. Таким образом, разработка новых эффективных технологических способов совмещения компонентов, исследование их влияния на свойства разрабатываемых материалов, проведение механических и триботехнических испытаний в широком диапазоне изменения параметров для прогнозирования их поведения в различных уплотнительных устройствах и узлах трения является **актуальным** направлением, представляющим научный и практический интерес.

### **Содержание диссертационной работы.**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка использованной литературы из 210 источников. Объем работы составляет 177 страниц, включая 60 рисунков, 10 таблиц и 2 приложения.

Работа соответствует паспорту специализации 2.6.17 – Материаловедение (технические науки) по пп. 1, 2, 16.



**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.

**Первая глава** (литературный обзор) состоит из нескольких частей. Автором приведен анализ рынка фторполимерных материалов, рассмотрены исследования по разработке композиционных материалов на основе ПТФЭ в ведущих российских и зарубежных центрах. Далее подробно описаны способы модифицирования полимерных композитов углеродными наполнителями с использованием различных технологических приемов механоактивации. На основании проведенного анализа работ сформулированы цель и задачи исследования.

**Вторая глава** посвящена экспериментальной части. В ней предложены гипотеза и структура исследования, представлены характеристики объектов исследования, а также описание стадий технологии переработки композитов на основе ПТФЭ и дискретных углеродных волокон марки УВИС-АК-П. Приведены методы экспериментальных исследований и математическая модель теплового процесса полимерных композиционных материалов (ПКМ) при трении скольжения по схеме «диск-диск», использованная для определения допустимых нагрузочно-скоростных параметров трения разрабатываемых материалов.

**В третьей главе** представлены результаты исследований по разработке способов введения углеродного модификатора в полимерную матрицу. Изучены структурные характеристики, деформационно-прочностные и триботехнические свойства получаемых композитов. Установлено, что использование способа введения углеродных волокон (УВ) через концентрат приводит к повышению комплекса деформационно-прочностных и триботехнических характеристик ПКМ. Установлено, что введение наполнителя через концентрат в ПТФЭ до 5 мас. % с использованием технологического приема совместной механоактивации компонентов при скорости вращения барабанов 400 об/мин приводит к повышению деформационно-прочностных показателей и износостойкости ПКМ. Установлены закономерности влияния состава и технологии получения ПКМ на последовательность процессов разрушения ПКМ при трении, определяющих скорость изнашивания полимерных композитов с дискретными волокнами.

**В четвертой главе** приведены результаты исследований по изучению влияния способа активации компонентов ПКМ путем вальцевания порошковой смеси на физико-механические и триботехнические показатели. Установлено, что технология активации в виде вальцевания компонентов позволяет повысить прочность при сжатии и износостойкость ПТФЭ, модифицированного углеродными волокнами УВИС-АК-П. Этот эффект достигается за счет интенсификации адгезионного взаимодействия на границе раздела фаз полимер-наполнитель, что подтверждено структурными исследованиями. Также в этой главе приведены результаты триботехнических исследований ПКМ при изменении нагрузочно-скоростных параметров в режиме сухого трения.

**Пятая глава** посвящена математическим расчетам триботехнических показателей разработанных материалов при изменении нагрузочно-скоростных параметров трения с использованием факторного анализа. Приведены результаты экспериментально-расчетного определения допустимых нагрузочно-скоростных параметров трения ПКМ в зависимости от содержания наполнителя и технологии их получения с использованием разработанной математической модели теплового процесса трения при скорости скольжения стального вала в интервале от 0,2 до 0,5 м/с в режиме сухого трения. Стоит отметить, что такими расчетами можно определить предельные допустимые значения температур эксплуатации в узлах трения для любого полимерного композиционного материала.

**В Заключение** выполнено обобщение полученных в ходе исследования данных, сформулированы основные научные результаты работы, указана их практическая ценность.

**В Приложении** представлены один патент РФ на изобретение «Полимерный материал триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена», акт промышленного внедрения на предприятии АО «Водоканал» уплотнений и прокладок из разработанного материала в системах водоснабжения и отопления г. Якутска.

Диссертационная работа выполнена на достаточно высоком теоретическом и экспериментальном уровне, оформлена по установленным требованиям. Работа написана ясным, грамотным языком. Иллюстрации и таблицы отражают необходимую информацию об исследуемых процессах.

**Научная новизна** диссертации заключается в следующих полученных результатах:

1. Выявлены закономерности влияния технологических параметров совмещения компонентов на процессы структурообразования ПКМ. Установлено, что использование технологического приема поэтапного смешения компонентов, заключающегося в проведении на первом этапе механоактивации смесевой композиции, состоящей из 0,5 части полимера с частицами наполнителя в планетарной мельнице «Pulverisette-5» при скорости вращения барабанов 400 об/мин, и дальнейшем смешении этой композиции с остальной частью ПТФЭ, а также комбинация технологии поэтапного смешения компонентов с активацией порошковой смеси путем вальцевания с зазором между валками менее 1 мм, способствуют реализации структурной активности частиц УВ и формированию более упорядоченной структуры в виде плотно упакованных сферолитоподобных образований с центрами кристаллизации на поверхности частиц УВ за счет интенсификации адгезионного взаимодействия на границе раздела фаз полимер-наполнитель.

2. Установлены закономерности влияния состава и способа получения ПКМ на последовательность процессов разрушения при трении, определяющих их износостойкость. Повышение износостойкости ПКМ, содержащего 5-10 мас. % УВ, связано с тем, что частицы наполнителя, выступая на поверхность трения,



воспринимают часть нагрузки на себя, в то время как при содержании в ПТФЭ УВ в диапазоне 1-3 мас. %, в первую очередь, подвергается износу мягкая полимерная составляющая композита. При этом использование разработанных технологий совмещения и активации компонентов способствует упрочнению поверхностного слоя ПКМ за счет повышения устойчивости закрепления волокна на полимерном основании, что значительно замедляет вовлечение полимерного связующего в процесс трения.

3. Установлено, что при увеличении подаваемой на ПКМ нагрузки в процессе трения происходит изменение спиральной конформации макромолекул ПТФЭ с переходом от конформации  $13_6$  к более стабильной конформации  $15_7$ , связанное с протеканием процессов рекристаллизации полимерного композита, приводящее к упрочнению поверхностного слоя полимерного материала.

#### **Обоснованность и достоверность полученных результатов**

Достоверность и обоснованность полученных в работе экспериментальных результатов, выводов и рекомендаций обеспечена корректностью постановки задачи, использованием современных методов исследования и оборудования, а также апробированных стандартизированных методик исследований. Основное содержание диссертационной работы отражено в 25 публикациях, из них 8 статьях опубликованных в научных журналах, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий ВАК РФ, 3 статьях в других научных изданиях и 1 патенте РФ на изобретение.

#### **Практическая и теоретическая значимость полученных результатов.**

Разработаны новые технологические приемы получения ПКМ с дискретными УВ марки УВИС-АК-П с использованием которых получены ПТФЭ-композиты с повышенными до 2000 раз износостойкостью и в 1,7-4 раза сопротивляемостью деформациям ползучести по сравнению с аналогичными показателями для исходного полимера. Предложенные технологические приемы перспективны также для использования при создании ПТФЭ-композитов с другими видами волокон. Разработана математическая модель трибопроцесса с ограничением допустимой температуры на выходе из скользящего контакта ПКМ-стальное контртело до 120 °С, позволившая определить нагрузочно-скоростные параметры трения разработанных материалов. Математическая модель и предложенная методика вычисления могут быть использованы для оценки температурных полей и определения нагрузочно-скоростных параметров для других ПКМ.

Разработанные композиты прошли опытно-промышленные испытания в системах водоснабжения и отопления АО «Водоканал» г. Якутска. Получены патент РФ и акт промышленного внедрения.

Теоретическая значимость полученных в работе результатов заключается в расширении знаний о влиянии технологических приемов введения наполнителей в полимер на структуру, механические и триботехнические характеристики ПКМ на основе ПТФЭ.

Работа выполнялась в соответствии со следующими научно-исследовательскими программами и темами:

- Госзадание Министерства науки и высшего образования РФ АААА-А17-117040710038-8 «Исследование и разработка полимерных и композиционных материалов для северных и арктических условий эксплуатации» – 2017-2020 гг.;

- Госзадание Министерства науки и высшего образования РФ №122011100162-9 «Научные основы создания морозостойких композитов технического и дорожно-строительного назначения с высокой надежностью и долговечностью при эксплуатации в арктическом климате» с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования ФИЦ ЯНЦ СО РАН грант № 13 ЦКП.21.0016 – 2021-2025 гг.;

- НИР по государственному контракту (№ 0708, №5304) «Создание и испытания композиционных материалов и конструкций с их применением, предназначенных для эксплуатации в климатических условиях Республики Саха (Якутия)» (Заказчик – Академия наук РС(Я) – 2021-2022 гг.;

- Грант Главы Республики Саха (Якутия) – 2024 г.

#### **Рекомендации по использованию результатов диссертации**

Полученные научно-технические результаты целесообразно использовать в НИР по разработке новых полимерных композитов на основе ПТФЭ и в программах обучения дисциплин материаловедческого направления в таких научно-исследовательских центрах и университетах как ФГАОУ ВО СВФУ им. М.К. Аммосова (Якутск), ИФПМ СО РАН (Томск), ФИЦ «Красноярский научный центр СО РАН» (Красноярск), ИММС НАН Беларуси (Гомель), ФГБОУ ВО ВолгГТУ (Волгоград), ФГБУН «ИОХ им. Н. Д. Зелинского РАН» (Москва), ИОНХ им. Н.С. Курнакова РАН (Москва), ФГАОУ ВО «ОмГТУ» (Омск) и др.

Разработанные морозостойкие материалы на основе ПТФЭ могут существенно расширить области применения, ассортимент изделий и запасных частей для технических систем, что позволит перейти на импортозамещающие аналоги в реальном секторе экономики России, особенно в Арктических регионах.

#### **Замечания по диссертационной работе**

По диссертационной работе Марковой М.А. имеются следующие вопросы и замечания:

1. Рынок фторопластов обширен. Чем обусловлен выбор в качестве полимерной матрицы именно фторопласта-4?

2. Происходит ли механохимическая деструкция макромолекул ПТФЭ после активации в планетарной мельнице?

3. Как связано улучшение деформационно-прочностных свойств ПКМ со способом его получения, изображенным на рисунке 3.2.

4. На с. 94 диссертации приведено: «Вследствие чего, контурная и фактическая площади контакта полимерного материала становятся меньше по сравнению с ПКМ с меньшим количеством частиц УВ на поверхности до трения». Неплохо было бы привести их количественные показатели.

5. На с.104 диссертации написано: «Установлено, что интенсивность пиков, появляющихся на поверхности образцов после трения, снижается при повышении концентрации УВИС-АК-II в полимерной матрице и использовании технологии совместной механоактивации». Как фиксировали изменения интенсивности пиков?

6. На с.113 диссертации изложено: «При увеличении содержания УВ в полимере до 10 мас. % (рисунок 4.3, в) дефектность структуры повышается за счет роста свободной поверхности, занятой только частицами УВ без полимера. Заметно, что поверхность волокна также становится дефектной». Чем объясняется, что именно при таком содержании наполнителя в объеме полимера поверхность волокна становится дефектной?

7. На с.113 диссертации приведено: «Далее были проведены ускоренные испытания (в течение 24 часов) на сопротивляемость ПКМ, полученных активацией путем вальцевания, к деформациям ползучести при значениях напряжения 1, 3, 5 и 7,5 МПа в зависимости от содержания УВ в полимере, которые представлены на рисунках 4.6 и 4.7». Почему не приведены данные ПКМ с содержанием 10 % УВ при 7,5 МПа?

8. На рисунке 5.8 для выявления площади износа от нагрузки по экспериментальным данным представлены кривые. В диссертации не отмечен метод или способ их определения.

9. В тексте рукописи встречаются технические неточности и опечатки, такие как:

- на рисунке 2.8 и в уравнении (2.14) не совпадают буквенные обозначения нагрузки;
- в уравнении (2.13) имеется лишний символ {;
- на странице 129, во втором абзаце, во второй строке некорректно записана формула  $N=Sk$ , здесь  $k$  - степень.

### **Заключение**

Указанные выше недостатки и замечания носят частный характер и не относятся к сути основных выводов и защищаемых положений, а также не оказывают существенного влияния на достоверность результатов диссертационного исследования.

Текст автореферата соответствует содержанию диссертации. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.6.17 – Материаловедение (технические науки).

Диссертационная работа Марковой М.А. «Разработка композиционных материалов триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена, модифицированного углеродным волокнистым наполнителем» является завершённым научно-квалификационным исследованием, в котором решена важная научно-практическая задача разработки композитов функционального назначения на основе ПТФЭ, повышающих ресурс работы изделий триботехнического назначения. Представленная работа соответствует требованиям

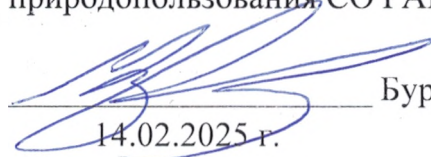


п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (со всеми изменениями и дополнениями), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор Маркова Марфа Алексеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата наук по специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки).

Диссертационная работа М.А. Марковой «Разработка композиционных материалов триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена, модифицированного углеродным волокнистым наполнителем» обсуждена, отзыв заслушан и утвержден на заседании лаборатории химии полимеров (протокол № 18 от 12.02.2025 г.).

**Отзыв подготовил:**

Доктор химических наук (02.00.06 – Высокомолекулярные соединения), доцент, заведующий лабораторией химии полимеров, заместитель директора по научной работе федерального государственного бюджетного учреждения науки «Байкальский институт природопользования СО РАН»



Бурдуковский Виталий Федорович

14.02.2025 г.

**Сведения о ведущей организации:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Байкальский институт природопользования Сибирского отделения Российской академии наук, адрес: 670047, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6

Тел.: (3012) 43-36-76; E-mail: [info@binm.ru](mailto:info@binm.ru)

Подпись Бурдуковского В.Ф. заверяю:



Подпись

*Бурдуковского В.Ф.*

СЕКРЕТАРЬ

Пинтаева Е.Ц.

02 20 25 г.