

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования «Белорусский государственный технологический  
университет»

На правах рукописи  
УДК 620.022 : 67.02

**Воропаев  
Виктор Викторович**

**РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ И ТЕХНОЛОГИИ  
НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ  
НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕР-ОЛИГОМЕРНЫХ ФТОРСОДЕРЖАЩИХ  
МАТРИЦ**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.17.06 - технология и переработка полимеров и композитов

Минск 2014

Научная работа выполнена на кафедре материаловедения и ресурсосберегающих технологий учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»

**Научный руководитель**

**Струк Василий Александрович**,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры материаловедения  
и ресурсосберегающих технологий УО  
«Гродненский государственный  
университет имени Янки Купалы»

**Официальные оппоненты:**

**Песецкий Степан Степанович**,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий отделом № 5 «Технология  
полимерных композиционных  
материалов и изделий» ГНУ «ИММС  
им. В.А. Белого НАН Беларуси»;

**Злотников Игорь Иванович**,  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры «Физика» УО «ГТТУ  
им. П.О. Сухого»

**Оппонирующая организация**

Учреждение образования  
«Белорусский государственный  
университет транспорта»

Защита состоится 21 ноября 2014 в 15.30 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.04 в учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» по адресу 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а; e-mail: olga\_tolkach@belstu.by; тел. (017) 327 63 54.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет».

Автореферат разослан «14» октября 2014 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций  
канд. техн. наук, доц.



О.Я. Толкач

## ВВЕДЕНИЕ

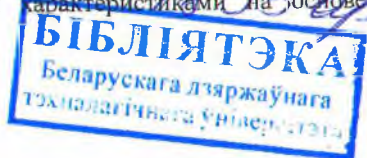
В узлах запорной и регулирующей арматуры, применяемой в газо- и водоснабжении, теплоэнергетике и конструкциях компрессорной техники химических производств используют элементы из фторкомпозитов, разработанные на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ), модифицированного дисперсными компонентами различного состава и технологии получения.

В номенклатуре фторкомпозитов, применяемых для изготовления герметизирующих и уплотнительных элементов статических и подвижных сопряжений, широкое распространение получили материалы типа Флубон и Флувис, в которых в качестве многофункционального наполнителя использовано диспергированное углеродное волокно (УВ). Эти материалы по комплексу служебных характеристик превосходят отечественные и зарубежные аналоги. Однако, в силу характерных особенностей структуры, строения и морфологии макромолекул и дисперсных частиц ПТФЭ и УВ, потенциальные возможности компонентов фторкомпозита реализуются не в полной мере. Это приводит к заметному сужению нагрузочно-скоростного диапазона применения изделий из композиционных материалов на основе ПТФЭ, сокращает ресурс их эффективной эксплуатации и увеличивает стоимость изготовления и переработки.

В связи с изложенным актуальной является задача разработки составов и технологии фторкомпозитов с повышенными параметрами деформационно-прочностных и триботехнических характеристик путем направленного регулирования физико-химических и теплофизических процессов на границе раздела «матрица-углеродный наполнитель».

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами.** Диссертационная работа выполнена на кафедре материаловедения и ресурсосберегающих технологий учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» в рамках заданий государственной научно-технической программы А-15-06 «Наноматериалы и нанотехнологии (№ 200754, срок исполнения 03.04.2006 – 31.12.2010) № 5.17 «Исследование влияния размера и формы наночастиц на их модифицирующее действие при создании композитов на основе полимеров» и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований № Т12М-152 «Энергосберегающая технология производства композиционных материалов с повышенными деформационно-прочностными характеристиками на основе фторсодержащих матриц».



**Цель и задачи исследования.** Цель работы состояла в разработке составов и технологии изготовления высоконаполненных фторкомпозитов, содержащих углеродные модификаторы, для изделий с повышенными параметрами деформационно-прочностных и триботехнических характеристик.

Для достижения цели были сформулированы следующие задачи:

1. Исследовать механизмы формирования дефектов гетерофазной структуры фторкомпозитов, содержащих углеродные наполнители, при использовании технологии холодного прессования и спекания (монолитизации).

2. Разработать методы гомогенизации углеродсодержащих высоконаполненных фторкомпозитов и заготовок на различных стадиях технологического процесса.

3. Разработать составы и технологию высоконаполненных фторкомпозитов с повышенными параметрами деформационно-прочностных и триботехнических характеристик.

*Объект исследования* – композиционные материалы на основе политетрафторэтилена, модифицированные углеродсодержащими компонентами различного состава, дисперсности и технологии получения при их содержании 20–35% масс.

*Предмет исследования* – механизмы межфазного взаимодействия политетрафторэтилена и углеродсодержащих частиц при изготовлении композиционных материалов и монолитизации изделий.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Структурно-технологические закономерности получения высоконаполненных композиционных материалов, состоящие в преобладающем влиянии дефектов, образованных кластерами наполнителя и связующего под действием технологических факторов, на параметры деформационно-прочностных и триботехнических характеристик изделий, определяющие условия формирования малодефектной структуры с максимально возможной интенсивностью взаимодействия компонентов при высоких степенях наполнения (25–35 % масс.) матричного политетрафторэтилена.

2. Технология получения изделий из высоконаполненных фторкомпозитов, содержащих 25–35 % масс. углеродных наполнителей, с параметрами деформационно-прочностных и триботехнических характеристик, превосходящими параметры аналогов не менее чем в 1,3–2,0 раза, реализованная в способе механоактивации (МА) при совмещении компонентов под действием сдвиговых напряжений в диапазоне 27–66 МПа, способе монолитизации (спекания) заготовок (изделий) в условиях всестороннего сжатия (ВС), способе пластического деформирования изделий (заготовок) под

действием давления, превышающего в 5–6 раз предел хладотекучести матричного политетрафторэтилена (ХМ), защищенная патентами РБ на изобретения.

3. Составы композиционных высоконаполненных материалов на основе политетрафторэтилена, при содержании углеродных волокон и дисперсных модификаторов 25–35 % масс., для изготовления изделий (заготовок), превосходящих отечественные и зарубежные аналоги Флубон и Флувис с параметрами прочности при разрыве не менее 20 МПа и износостойкости не менее  $3,5 \times 10^{-7} \text{ мм}^3/\text{Н} \times \text{м}$ .

**Личный вклад соискателя.** Соискатель провел экспериментальные исследования структуры гетерофазных углеродсодержащих фторкомпозитов при различных видах технологического воздействия на компоненты и заготовки, разработал конструкцию технологической оснастки для изготовления высокопрочных износостойких изделий из композитов с повышенным содержанием модификатора. По результатам проведенных исследований соискателем подготовлены публикации в научно-технических изданиях, рекомендованных ВАК Беларуси, сделаны доклады на профильных научно-технических конференциях и симпозиумах, в том числе с международным участием.

Соискатель провел апробирование разработанных составов и технологий на ОАО «Гродненский механический завод» и уплотнительных элементов в узлах трения запорной арматуры, компрессорной техники и автомобильных агрегатов на ОАО «Белкард», ОАО «ГродноАзот», ЧУП «Цветлит» совместно с сотрудниками УМЦ «Промагромаш» ОАО «Белкард».

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты научных исследований и их практических приложений были доложены и обсуждены на 27 профильных научных, научно-технических конференциях и симпозиумах, в том числе: I Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Фторполимерные материалы. Научно-технические, производственные и коммерческие аспекты» (Россия, г. Кирово-Чепецк, 2008г.), Международной научно-технической конференции «Полимерные композиты и трибология» (РБ, г. Гомель, 2009г.), Международной конференции «Наука о полимерах: вклад в инновационное развитие экономики» (Узбекистан, г. Ташкент, 2011г.), XIII Международной конференции «Физика и технология тонких пленок и наносистем» (Украина, г. Ивано-Франковск, 2011г.), III Международной научно-технической конференции «Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития» (РБ, г. Гродно, 2013г.), XXXIII Международной конференции «Композиционные материалы в промышленности» (Украина, г. Ялта, 2013г.), Международной научно-технической конференции «Полимерные композиты и трибология» (РБ, г.

Гомель, 2013г.).

**Опубликованность результатов диссертации.** Основное содержание работы опубликовано в 34 научных работах, в том числе 2 монографиях, 4 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных исследований, 8 статьях в других научных изданиях, 12 статьях в научно-технических сборниках и материалах конференций, 5 тезисах докладов на конференциях, 3 патентах РБ на изобретения. Общий объем опубликованных материалов – 14,69 авторского листа, из них 2,38 авторского листа в изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертационных исследований.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Полный объем диссертации – 145 страниц, в том числе 94 страницы машинописного текста. Диссертация содержит 54 рисунка, 14 таблиц, 179 страниц приложений и 11 страниц списка использованных источников из 145 наименований, в том числе 9 публикаций соискателя.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

**Первая глава** посвящена анализу современного состояния материаловедения фторкомпозитов и основных направлений совершенствования составов и технологий изготовления изделий для узлов с экстремальными условиями эксплуатации.

При наличии достаточно широкой номенклатуры машиностроительных материалов на основе политетрафторэтилена особое место занимают составы, в которых в качестве многофункционального модификатора использованы углеродсодержащие компоненты, прежде всего, углеродные волокна (УВ). Однако при выраженных достоинствах материалов типа Флубон, Флувис по сравнению с аналогами, содержащими в качестве функциональных модификаторов дисперсные частицы минералов (цеолитов, глин), углеродсодержащих частиц (УДАГ, технического углерода, фуллеренов, кокса), дисперсных фрагментов волокон (стеклянных, базальтовых, оксалоновых), не в полной мере реализованы потенциальные возможности, обусловленные составом, структурой и характеристиками как политетрафторэтилена (ПТФЭ), так и высокопрочного (высокомодульного) модификатора – УВ. Не устранен структурный парадокс, проявляющийся в снижении параметров деформационно-прочностных и триботехнических характеристик при увеличении доли УВ в композиционном материале при использовании традиционных технологических операций – смешивания компонентов,

холодного прессования заготовок и спекания (монолитизации).

Анализ литературных, патентных и коммерческих источников свидетельствует о практическом исчерпании потенциала традиционных технологических подходов к изготовлению герметизирующих и триботехнических изделий из фторкомпозитов, которые не в полной мере учитывают характерные особенности ПТФЭ и УВ – выраженную инертность в процессах межфазного взаимодействия, отсутствие вязкотекучего состояния, низкую поверхностную энергию дисперсных частиц на стадиях прессования и монолитизации.

Перспективным направлением совершенствования составов и технологии машиностроительных фторкомпозитов является разработка приемов, снижающих вероятность образования дефектов гетерогенной структуры, обусловленных особыми реологическими, электрофизическими и адгезионными параметрами компонентов, на разных стадиях процесса. Этот подход позволяет существенно повысить параметры потребительских характеристик триботехнических и герметизирующих материалов при снижении себестоимости и энергоемкости.

На основании аналитического обзора сформулированы цель и задачи исследования.

**Во второй главе** диссертации рассмотрены методики исследования физико-химических аспектов формирования фторкомпозитов различного состава, структурных особенностей материалов, полученных по различным технологиям, а также анализа параметров деформационно-прочностных, триботехнических и теплофизических характеристик в соответствии с эксплуатационными требованиями.

Структуру полимерных композиционных материалов (ПКМ) исследовали методами ИК-спектроскопии (Tensor-27), оптической (Micro200T-01), атомно-силовой (НАНОТОП-III), электронно-растровой (LEO1455VP) микроскопии, рентгеноструктурного анализа (ДРОН-2.0).

Деформационно-прочностные характеристики ПКМ определяли в соответствии с действующими ГОСТами и нормативной документацией на фторкомпозиты Флубон и Флувис. Прочность и модуль упругости при сжатии определяли по ГОСТ 4651-82 на стенде ComTen 94C (США).

Триботехнические характеристики ПКМ оценивали с помощью машины трения СМЦ-2 по схеме «вал – частичный вкладыш» и машины трения ХТИ-72 по схеме «палец-диск» в соответствии с нормативной документацией.

Обработку экспериментальных данных производили на ЭВМ при помощи стандартного пакета программ «Microsoft Office 11».

**Третья глава** диссертационной работы посвящена анализу особенностей морфологии, теплофизических и энергетических параметров компонентов

фторкомпозитов различного состава, и их влияния на параметры деформационно-прочностных и триботехнических характеристик.

Широко применяемые в технологии фторкомпозитов порошкообразные продукты марок Ф4ТМ, Ф4ПН, позиционируемые производителями как политетрафторэтилен, представляют собой частицы с нерегулируемыми параметрами молекулярной массы и морфологии.

Очевидным является существенный вклад морфологического фактора частиц ПТФЭ в параметры характеристик композиций, полученных на их основе при традиционной технологии фторкомпозитов, основанной на последовательных стадиях смешивания компонентов, холодного прессования заготовок и их спекания (монолитизации), так как в этом случае существенно влияние электрофизических параметров и межчастичного трения на формирование дефектов структуры композита. Поэтому при выборе компонентов фторкомпозита необходимо обеспечивать корреляцию параметров формы частиц и морфологии поверхностного слоя с реологическими параметрами ПТФЭ в условиях формирования композитов и изделий из них.

Морфологический анализ методами РЭМ и АСМ дисперсных частиц распространенных модификаторов ПТФЭ – фрагментов углеродных волокон (УВ), углеродных нанотрубок (УТ), минеральных продуктов трепела (ТР), шунгита (ШТ) свидетельствует о существенном различии в строении поверхностного слоя, определяющего механическую составляющую адгезионного взаимодействия на границе раздела «матрица ПТФЭ – наполнитель» (рисунок 1). Различие в морфологии поверхностного слоя модифицирующих частиц предопределяет отличие в механизме и кинетике формирования

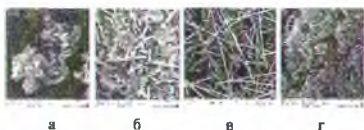


Рисунок 1 – Морфология поверхностного слоя: а) углеродных трубок (УТ), б) трепела (ТР), в) углеродного волокна (УВ), г) шунгита (ШТ)

граничного слоя на стадии холодного прессования заготовок, так как время их прессования ограничено технологическим циклом и не превышает 3–6 мин. Поэтому даже при относительно высоких значениях давления прессования ( $P = 60\text{--}70\text{МПа}$ ) не проявляется в полной мере эффект хладотекучести матричных частиц ПТФЭ, который определяет кинетику заполнения микронеровностей поверхностного слоя частиц наполнителя и образования структуры граничного слоя с минимальным количеством дефектов. Наблюдается выраженный концентрационный градиент частиц наполнителя по объему матричного полимера, обусловленный технологией смешивания компонентов и различием их геометрических, электрофизических параметров и массы. При этом частицы наполнителя с размерами, меньшими, чем у промышленного порошкообразного ПТФЭ (10-





**Рисунок 2** – **Кластерные структуры фрагментов углеродного волокна в композиционном материале ПТФЭ + 10% масс. УВ: исходные (а), после холодного прессования при  $P = 70$  МПа (б). Распределение частиц УПТФЭ в смеси фрагментов УВ (в).**

500 мкм), и близкими размерами, образуют кластеры в областях контакта матричного полимера (рисунок 2). Дефектные участки с практически полным отсутствием связующего (ПТФЭ), образовавшиеся на стадии смешения (рисунок 2, а), сохраняются и после стадии холодного прессования (рисунок 2, б). При этом в результате действия механических и электрофизических факторов процесса смешивания исходные частицы ПТФЭ также формируют кластерные структуры, увеличивая концентрационный градиент по объему композиционного материала и заготовок (рисунок 2, а, б). Вследствие отмеченных

факторов формируются технологические предпосылки образования дефектов гетерогенной структуры изделия при получении композиционного материала по действующему технологическому регламенту.

Для реализации поставленной задачи повышения параметров фторкомпозитов использовали различные подходы. Стабилизацию геометрических, размерных и технологических параметров промышленных порошков ПТФЭ осуществляли с применением в качестве многофункционального модификатора ультрадисперсного политетрафторэтилена (УПТФЭ). Характерной особенностью единичных частиц УПТФЭ является наличие в составе олигомерных компонентов различной молекулярной массы с различной температурой плавления и повышенной деформативностью. При модифицировании дисперсных частиц ПТФЭ марок Ф4ТМ и Ф4ПН частицами УПТФЭ происходит изменение технологических параметров, которые обуславливают увеличение показателей прочности в 1,2–1,4 раза и износостойкости в 1,1–1,2 раза. Высокодисперсные частицы УПТФЭ способствуют повышению параметров деформационно-прочностных характеристик композитов, содержащих как вискерные наполнители (УВ), так и дисперсные, пластинчатой и сферической формы, например, частицы технического углерода (ТУ) (таблица 1).

Реализуется механизм многоуровневого модифицирующего действия УПТФЭ в композиционных материалах, который состоит в понижении дефектности матричного ПТФЭ и в уменьшении числа кластерных агрегатов частиц наполнителя (УВ, ТУ), в которых отсутствует связующее (рисунок 2, а). Дисперсные частицы УПТФЭ на стадии подготовки наполнителя располагаются в пустотах кластеров УВ (рисунок 2, в), снижая дефектность композита. Характерным следствием действия УПТФЭ в композитах является

повышение износостойкости благодаря образованию устойчивого разделительного слоя из полимер-олигомерных продуктов трибохимических превращений УПТФЭ, ПТФЭ и ТУ.

Таблица 1 – Характеристики композитов типа Флувис на основе фторопластов разных марок с добавлением модификатора УПТФЭ

Наименование показателей	Результаты испытаний			
	С добавлением модификатора		Без модификатора	
	Матричный материал		Матричный материал	
	Фторопласт-4ТМ	Фторопласт-4ПН	Фторопласт-4ТМ	Фторопласт-4ПН
Прочность при разрыве, МПа, не менее	27	23	24	17
Плотность, кг/м <sup>3</sup> , не менее	2000	1970	1980	1930
Интенсивность изнашивания, $J \cdot 10^{-7}$ мм <sup>3</sup> /Н·м, не более	3,0	3,5	3,3	3,5

Проведенные исследования особенностей гетерогенной структуры композиционных материалов на основе ПТФЭ и различных модификаторов позволили разработать принципы получения малодефектных изделий, основанные на регулировании процессов межфазного взаимодействия на различных стадиях производства изделий (рисунок 3).



Рисунок 3 – Технологические методы получения высокопрочных износостойких фторкомпозитов с повышенным содержанием УВ

В четвертой главе диссертации рассмотрены практические приложения разработанных структурно-морфологических принципов получения изделий из высоконаполненных фторкомпозитов с повышенными параметрами прочности и износостойкости. Проведены исследования технологических процессов получения фторкомпозитов типа Флувис, которые по комплексу деформационно-прочностных и триботехнических характеристик существенно превосходят аналоги и имеют стабильную производственную базу.

Исследования, проведенные в гл. 3, послужили основой для разработки технологических приемов формирования фторкомпозитов с минимальным уровнем дефектности. Для уменьшения негативного влияния кластерных структур, образованных фрагментами углеродного волокна (УВ), разработана технология модифицирования полуфабриката в виде ткани методом трибостатического напыления УПТФЭ. Исследования показали, что фрагменты УПТФЭ закрепляются на фрагментах УВ и после измельчения ленты сохраняются в структуре кластеров (рисунок 2, в), что снижает степень дефектности изделий из фторкомпозитов, содержащих углеродные наполнители. Разработанная технология эффективна при получении изделий из композитов с содержанием УВ до 20% масс.

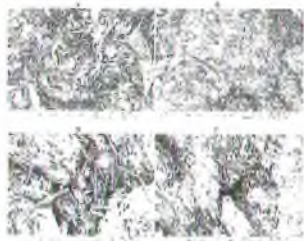
В герметизирующих, триботехнических узлах компрессорного оборудования химических производств, технологического оборудования предприятий теплоэнергетики, газо- и водоснабжения наиболее эффективны элементы с повышенными деформационно-прочностными и триботехническими характеристиками, изготовленные из высоконаполненных фторкомпозитов, содержащих 25–35% масс. УВ. Традиционные технологии не позволяют получить изделия из таких композитов, удовлетворяющие требованиям технического задания.



Разработана технология механоактивационной обработки компонентов фторкомпозитов, наполненных фрагментами волокон, обеспечивающая комплексный эффект корреляции геометрических параметров компонентов и увеличения их межфазного взаимодействия –

**Рисунок 4** – Принципиальная схема механоактивации композиционных материалов на основе политетрафторэтилена (ПТФЭ+УВ)

– технология МА. Сущность технологии МА состоит в механохимической обработке механической смеси (ПТФЭ и УВ) в зазоре валков при заданной скорости сдвига (рисунок 4). Регулируя скорости относительного вращения  $\omega_1$  и  $\omega_2$  валков диаметром  $d$  и контактное усилие  $F$ , осуществляют механохимический сдвиг порошкообразной композиции в зазоре  $S$ . Тангенциальные напряжения в зазоре обеспечивают



**Рисунок 5 – Характерная морфология структуры композита после механического смешивания (в) и прессования (г); и при реализации технологии МА: после смешивания (а) и прессования (б)**



**Рисунок 6 – Прочностные характеристики заготовок из композитов на основе ПТФЭ, содержащих 25% масс. УВ**



**Рисунок 7 – Схема оснастки для реализации технологии ВС**

образование волокнообразных частиц ПТФЭ, которые по геометрическим размерам коррелируют с фрагментами УВ (рисунок 5, а). Кроме того, механохимические процессы приводят к модифицированию поверхностного слоя фрагментов УВ вследствие механического закрепления продуктов механодеструкции частиц ПТФЭ. При реализации технологии МА происходит разрушение кластерных структур УВ и ПТФЭ, образовавшихся на стадии смешивания (рисунок 5, в), и снижается вероятность образования дефектов на стадии прессования заготовки (5, б).

Вследствие отмеченных эффектов технология МА обеспечивает значительное увеличение прочностных характеристик высоконаполненных фторкомпозитов (рисунок 6). Параметр  $\sigma_p$  увеличивается с 16 до 26 МПа при одновременном повышении параметра  $\sigma_{сж}$  при 10% деформации с 34 до 40 МПа. Полученные по технологии МА композиционные материалы с повышенным содержанием УВ (25–35% масс.) превосходят отечественные и импортные аналоги и могут быть использованы для изготовления изделий с повышенным эксплуатационным ресурсом.

Для устранения дефектов структуры на стадии монолитизации разработана оригинальная технология термообработки заготовок в оправках заданной геометрической формы и размеров – технология ВС. Сущность технологии ВС состоит в использовании эффекта различия теплового расширения дисперсных частиц ПТФЭ и УВ на различных стадиях термообработки для обеспечения оптимального межфазного взаимодействия компонентов, определяющего параметры прочности и износостойкости. В процессе монолитизации в металлической оправке разработанной конструкции (рисунок 7) вследствие теплового натяга обеспечивается оптимальное адгезионное взаимодействие на границе раздела «матрица ПТФЭ–УВ».

Эффект ВС-технологии зависит от величины зазоров между заготовкой из композиционного материала и элементами технологической оснастки. Спекаемую заготовку 5 размещают на стержень 1 и фиксируют кольцами 2 и 6 с помощью диска 8 и гайки 9. Касание наружной поверхности заготовки 5 внутренней поверхности гильзы 7 обеспечивается величиной зазора  $d$ . Величину зазора  $a$  выбирают экспериментально, оценивая размеры заготовок при температурах, близких  $T_{пл}$  ПТФЭ. Таким образом, взаимодействие заготовки композита 5 с гильзой 7 произойдет после перехода матрицы в высокоэластическое состояние, способствуя ее упрочнению.

Разработанная технология наиболее эффективна для высоконаполненных композитов и опровергает устоявшееся мнение о невозможности получения высокопрочных изделий из таких материалов (таблица 3).

Таблица 3 – Физико-механические и триботехнические характеристики высоконаполненных композитов на основе политетрафторэтилена, полученных с применением технологий МА и термообработки в условиях ВС

Содержание УВ, %	Интенсивность изнашивания, $\cdot 10^{-7}$ мм <sup>3</sup> /Н·м		Прочность при растяжении, МПа		Прочность при 10%-ной деформации, МПа		Плотность, кг/м <sup>3</sup>	
	спекание в своб. состоянии	спекание в условиях ВС	спекание в своб. состоянии	спекание в условиях ВС	спекание в своб. состоянии	спекание в условиях ВС	спекание в своб. состоянии	спекание в условиях ВС
20	2,15	1,92	22,4	29,3	29,5	33,4	2020	2090
25	3,65	2,44	22,9	32,8	33,3	40,9	1800	1870
30	3,54	2,35	20,9	31,9	26,7	39,6	1770	1860
35	3,92	1,48	14,1	19,6	19,1	39,8	1560	1630

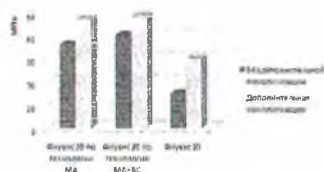


Рисунок 8 – Характерная морфология поверхности сколов заготовок из композитов на основе ПТФЭ, содержащих 30 % масс. УВ, при традиционной технологии (а), технологии МА (б), технологии ВС (в), технологии ХМ (г).

Применение разработанных технологий МА и ВС уменьшает негативное влияние структурно-морфологического фактора в создании предпосылок образования дефектов гетерогенной структуры композитов, приводящих к разрушению изделий в процессе эксплуатации (рисунок 8). Анализ сколов образцов в жидком азоте методом РЭМ свидетельствует о снижении доли микротрещин в объеме образца при использовании технологий МА (рисунок 8, б) и ВС (рисунок 8, в). Вместе с тем, разработанные технологии не полностью устраняют дефекты гетерогенной структуры, которые сформировались на стадии горячей монолитизации (спекания) вследствие нарушения

оптимальных режимов предшествующих стадий, а также практически не оказывают влияния на структуру поверхностных слоев изделий.

Разработана оригинальная технология обработки заготовок, реализующая уникальную способность матрицы ПТФЭ к холодному течению под внешним давлением – технология холодной монолитизации (ХМ-технология). Сущность ХМ-технологии состоит в монолитизации изделия, полученного с применением операций смешивания, холодного прессования заготовки и спекания, путем воздействия давления, превышающего предел текучести матричного полимера (ПТФЭ), в металлической форме с заданными геометрическими размерами. Основная масса передеформируемого полимера заполняет свободные пространства между единичными волокнами УВ-кластеров, локализуя их в



**Рисунок 9 – Прочность при 10%-й деформации при сжатии образцов композита из ПТФЭ, содержащего 30% масс. УВ, сформированных по различным технологиям.**

Характерной особенностью технологии ХМ является значительное увеличение износостойкости изделий из высоконаполненных композитов вследствие формирования градиентной структуры изделия вследствие ориентации в поверхностном слое фрагментов УВ в направлении, перпендикулярном действию нагрузки монолитизации (рисунок 8, г). Важным достоинством ХМ-технологии является формирование градиентной структуры изделия вследствие ориентации в поверхностном слое фрагментов УВ в направлении, перпендикулярном действию нагрузки монолитизации (рисунок 8, г). В которой ориентированные фрагменты волокон наполнителя воспринимают нагрузку, препятствуя разрушению и изнашиванию (рисунок 10). При этом износостойкость срединной части изделия, подвергнутого ХМ, не менее чем в 2,5–3 раза выше, чем износостойкость изделия аналогичного состава, изготовленного по действующей нормативной документации.



**Рисунок 10 – Износ образцов из фторкомпозита, содержащего 30% масс. УВ.**

Разработанные технологии изготовления изделий из композиционных материалов на основе политетрафторэтилена эффективны и для композитов, содержащих многоуровневый модификатор, включающий высокодисперсные частицы технического углерода марки П 234 или графита и ультрадисперсные частицы УПТФЭ. По параметрам прочностных характеристик  $\sigma_p$  и  $\sigma_{сж}$  при 10%

деформации изделия из разработанных композитов с содержанием УВ 5–10% масс. не уступают высоконаполненным изделиям –  $\sigma_p = 30$  МПа,  $\sigma_{сж} = 35$  МПа. Это позволяет использовать такие композиты в качестве полноценной альтернативы дорогостоящим композитам марок Флувис 20 и Флувис 30.

Таким образом, разработанные технологические приемы позволяют изменять структуру фторкомпозитов на межмолекулярном и межфазном уровнях, обеспечивая уменьшение дефектности изделий и расширение нагрузочно-скоростного диапазона их эксплуатации.

**Пятая глава** диссертации рассматривает экономические аспекты технологии производства герметизирующих и триботехнических изделий из композиционных материалов на основе политетрафторэтилена.

Рассмотрены направления снижения себестоимости композиционных материалов типа Флувис, основанные на принципе многоуровневого модифицирования матрицы ПТФЭ. Применение комплексного модификатора УПТФЭ+ТУ позволяет, при сохранении параметров деформационно-прочностных и триботехнических характеристик, снизить содержание дорогостоящего углеродного волокна не менее чем на 5–10% масс., что обуславливает экономический эффект при производстве 1 кг заготовок от 20000 до 40000 рублей. Модифицирование фторопласта марки 4ПН ультрадисперсным политетрафторэтиленом обуславливает возможность использования более дешевого сырья и достижения экономии не менее 40000 рублей на 1 кг заготовок при сохранении уровня потребительских характеристик, соответствующих нормативной документации на изделия из материалов Флувис.

Использование разработанных сокращенных циклов производства изделий из фторкомпозитов (гл. 4) снижает продолжительность процесса не менее чем на 4 часа при экономии электроэнергии 1,52 кВт·ч на 1 кг заготовок.

Технология холодной монолитизации позволяет уменьшить припуски на заготовки, которые подвергаются механической обработке, и снизить расход композиционного материала не менее чем на 10%. Применение изделий из высокопрочных износостойких фторкомпозитов, обработанных по технологии ХМ, увеличивает ресурс эксплуатации в 1,3–1,5 раза.

На фторкомпозиты повышенной износостойкости разработана нормативная документация, регламентирующая их изготовление и применение.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты**

Проведены комплексные исследования особенностей формирования гетерофазной структуры композиционных материалов на основе

политетрафторэтилена, содержащих модификаторы различного состава, формы и геометрических размеров при их содержании 20–35% масс. Определены направления совершенствования технологических процессов изготовления изделий с повышенными параметрами деформационно-прочностных и триботехнических характеристик путем управления структурой высоконаполненных фторкомпозитов на различных уровнях.

1. Исследованы закономерности формирования дефектов гетерофазной структуры фторкомпозитов, содержащих повышенное количество углеродных наполнителей (25–35% масс.), обуславливающих механизмы разрушения и изнашивания изделий при эксплуатации в триботехнических и герметизирующих системах. Установлено, что основными факторами, создающими структурно-технологические предпосылки проявления структурного парадокса снижения прочности и износостойкости при увеличении степени наполнения политетрафторэтилена, являются несоответствие геометрических, размерных и электрофизических характеристик дисперсных частиц компонентов, обуславливающее формирование кластерных агрегатов наполнителя, и низкий уровень адсорбционного взаимодействия в межфазной зоне вследствие структурных и реологических особенностей полимера. [1, 5, 6, 10, 12–20, 22, 23, 26, 27, 29–31]

2. Развита концепция многоуровневого модифицирования применительно к созданию высоконаполненных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена. Установлен принцип модифицирующего действия продуктов термогазодинамического синтеза политетрафторэтилена (УПТФЭ) в композите, основанный на повышении прочностных и триботехнических характеристик матричного полимера, увеличении адгезионного взаимодействия на границе раздела «ПТФЭ–УВ» и повышении устойчивости к многоцикловым воздействиям разделительного слоя в зоне фрикционного контакта. Разработана технология модифицирования компонентов фторкомпозитов, содержащих углеродные волокна, ультрадисперсными частицами продуктов термогазодинамического синтеза (УПТФЭ), обеспечивающая повышение износостойкости в 1,1–1,2 раза и прочности по параметрам  $\sigma_p$  и  $\sigma_{сж}$  в 1,1–1,35 раза при формировании изделий холодным прессованием с последующим спеканием. [1, 2, 17, 28]

3. Разработана технология повышения параметров деформационно-прочностных и триботехнических характеристик изделий из высоконаполненных фторкомпозитов с волокнистым армирующим компонентом. Данная технология обеспечивает снижение дефектности гетерогенных изделий вследствие оптимизации геометрических и адгезионных параметров компонентов механоактивацией (МА) и активизации межфазных процессов путем теплового деформирования заготовок в оправке при



температурах высокоэластического состояния матрицы (ВС). Применение разработанных технологий обеспечивает увеличение параметров прочности изделий из композитов, содержащих 25–35% масс. УВ, по критериям  $\sigma_p$  и  $\sigma_{сж}$  с 13,5 МПа и 27,5 МПа до значений 17,5 МПа и 35 МПа (технология МА), и до значений 25,0 МПа и 37,5 МПа (технология ВС) соответственно при одновременном увеличении их износостойкости не менее чем в 1,5–2,6 раза. Установлено, что основным фактором, обеспечивающим повышение эксплуатационных характеристик изделий, является повышение термодинамической совместимости компонентов вследствие активизации межфазных взаимодействий и снижение дефектности гетерогенной структуры в результате разрушения кластерных образований в объеме композита на стадиях подготовки композиционного материала и монолитизации изделий из него. [1–16, 21, 24, 25, 32]

4. Предложен метод упрочнения и увеличения износостойкости изделий из высоконаполненных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена, основанный на реализации эффекта холодного течения матрицы при внешней нагрузке, превышающей предел текучести. Реализация метода холодной монолитизации в оптимизированной оснастке приводит к увеличению параметра  $\sigma_{сж}$  для композитов типа Флувис с содержанием УВ 30–35% масс. в 2–2,5 раза при применении стандартной технологии и в 1,15–1,45 раза при использовании технологий ВС и МА соответственно при одновременном повышении износостойкости не менее чем в 1,6–2,3 раза. Установлено, что эффект повышения параметров эксплуатационных характеристик ( $\sigma_p$ ,  $\sigma_{сж}$ ,  $J \cdot 10^{-7}$ ) обусловлен снижением дефектности гетерогенной структуры композита вследствие пластического течения матрицы и ориентационных явлений в поверхностных слоях изделия. [1–4, 16, 18, 34]

5. Разработаны составы композиционных материалов на основе политетрафторэтилена и комплексного наполнителя, включающего углеродные волокна, технический углерод и ультрадисперсный политетрафторэтилен. Установлено, что применение при изготовлении изделий из разработанных фторкомпозитов технологий МА и ВС позволяет снизить содержание углеродного волокна до 5–10% масс. при одновременном увеличении параметров прочности  $\sigma_p$  и  $\sigma_{сж}$  до 30 МПа и 35 МПа соответственно при величине износа  $1,2 \cdot 10^{-7}$  мм<sup>3</sup>/Н·м –  $1,75 \cdot 10^{-7}$  мм<sup>3</sup>/Н·м. Изделия из разработанных составов обладают коэффициентом трения при эксплуатации без подвода внешней смазки в диапазоне 0,14–0,15. [32, 33]

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

Разработана технология термообработки заготовок из композиционных

материалов на основе фторопласта в условиях всестороннего сжатия, позволяющая получать материалы с улучшенными деформационно-прочностными и триботехническими характеристиками, а также уменьшающая потери от брака при спекании заготовок и повышающая стабильность характеристик композитов.

Разработана технология механоактивации композиции (МА) на основе ПТФЭ с комбинированным наполнителем, позволяющая повысить межфазное взаимодействие компонентов материала в результате изменения зарядового состояния частиц композиции. Применение технологии МА при изготовлении высоконаполненных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена обуславливает увеличение параметров  $\sigma_p$ ,  $\sigma_{сж}$ , и  $J$  не менее чем в 1,2-1,5 раза.

Разработана технология предварительной обработки полуфабрикатов углеродного волокна ультрадисперсным политетрафторэтиленом, которая состоит в его трибостатическом напылении на углеродную ленту с последующей высокотемпературной фиксацией. Разработано технологическое оборудование для реализации технологии трибостатического модифицирования углеродной ленты. Применение данной технологии обеспечивает увеличение параметров  $\sigma_p$ ,  $\sigma_{сж}$ ,  $J$  не менее чем в 1,2-1,5 раза при использовании стандартной технологии изготовления заготовок из материалов типа «Флубон».

Разработана технология получения высокопрочных износостойких изделий из композиционных материалов на основе политетрафторэтилена, содержащих 25-35% масс. углеродного волокна. Применение технологии холодной монолитизации обеспечивает увеличение параметров  $\sigma_{сж}$  в 2,0-2,5 раза и повышение износостойкости в 1,6-2,3 раза высоконаполненных изделий вследствие уменьшения дефектности гетерогенной структуры.

Создана оснастка и экспериментальное оборудование для внедрения на действующем производстве разработанных технологий и составов композиционных материалов, получены образцы и проведены стендовые и натурные испытания, подтверждающие возможность получения заявленных параметров деформационно-прочностных и триботехнических характеристик при применении стандартной технологии изготовления изделий из фторкомпозитов.

Резервы снижения себестоимости за счет применения разработанных составов и технологий при различных вариантах использования могут составить от 4,48 до 517,28 млн. руб. в год при объеме производства заготовок 8 т в год.

Разработанные технологии могут служить основой для модернизации производства композиционных материалов на основе фторопласта типа «Флубон» в РБ, поскольку их внедрение будет способствовать повышению конкурентоспособности соответствующих производств.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Монографии

1. Воропаев, В.В. Энергосберегающие технологии получения упрочненных фторкомполитов / В.В. Воропаев // Машиностроительные фторкомполиты: структура, технология, применение : моногр. / С.В. Авдейчик, В.В. Воропаев, А.А. Скаскевич, В.А. Струк ; под ред. В.А. Струка. – Гродно : ГрГУ, 2012. – С. 226–335.
2. Овчинников, Е.В. Методы модифицирования компонентов трибосистем фторсодержащими ингибиторами изнашивания / Е.В. Овчинников, А.А. Скаскевич, В.В. Воропаев // Прогрессивные машиностроительные технологии. Том II. Коллективная монография / С.В. Авдейчик, А.Н. Афонин, В.В. Воропаев, В.П. Иванов, А.В. Киричек, Г.А. Костюкович, В.И. Кравченко, В.А. Лиопо, Л.В. Михайлова, А.В. Морозова, Е.В. Овчинников, А.А. Рыскулов, А.А. Скаскевич, В.А. Струк, Е.И. Эйсымонт ; под ред. А.В. Киричека. – М.: Издательский дом «Спектр», 2012. – С. 249–289.

### Статьи в рецензируемых научных журналах, согласно перечню ВАК

3. Технология триботехнических композиционных материалов на основе политетрафторэтилена / Г.Н. Горбачевич, В.В. Воропаев, С.В. Авдейчик, Н.А. Антанович // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэх. навук. – 2010. – № 4. – С. 19–25.
4. Технология высокопрочных композиционных материалов на основе модифицированного политетрафторэтилена / В.В. Воропаев, В.А. Струк, Г.Н. Горбачевич, И.Л. Лавринюк // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэх. навук. – 2012. – № 3. – С. 31–38.
5. Авдейчик, С.В. Технологические принципы формирования высокопрочных износостойких фторкомполитов / С.В. Авдейчик, В.А. Струк, В.В. Воропаев // Пластические массы. – 2013. – №12. –С. 3–8.
6. Воропаев, В.В. Технология формирования высокопрочных износостойких фторкомполитов / В.В. Воропаев, С.В. Авдейчик, В.А. Струк // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэх. навук. – 2014. – № 1. – С. 50–58.

### Статьи в других научных изданиях

7. Механохимические аспекты технологии фторопластовых композитов / А.С. Антонов, С.В. Авдейчик, Г.Н. Горбачевич, В.В. Воропаев, Л.В. Михайлова // Инженерный вестник. – 2009. - №2. – С.20-26.
8. Воропаев, В.В. Технология высоконаполненных фторопластовых композитов / В.В. Воропаев // Наука и инновации. – 2009. - №5. – С. 48-49.

9. Структура и технология функциональных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена / Г.Н. Горбачевич, В.А. Струк, Д.А. Прушак, В.В. Воропаев // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка. – 2011. – №1 (116). – С. 90-99.

10. Михайлова, Л.В. Технология триботехнических и герметизирующих композиционных материалов на основе политетрафторэтилена / Л.В. Михайлова, В.В. Воропаев, Г.Н. Горбачевич // Горная механика и машиностроение. – 2011. – №4. – С. 86-97.

11. Воропаев, В.В. Влияние технологии на характеристики композиционных материалов на основе политетрафторэтилена / В.В. Воропаев, А.Ю. Бачурина // Весн. ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 6. Тэхніка. – 2012. – №4 (141). – С. 119-124.

12. Высокопрочные износостойкие фторкомпозиты как результат изменения технологической парадигмы / В.В. Воропаев, В.А. Струк, А.А. Скаскевич, С.В. Авдейчик // Весн. ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 6. Тэхніка. – 2013. – №2 (154). – С. 84-92.

13. Technology of polytetrafluoroethylene-based nanocomposite materials: structural and morphological aspect / V. Voropaev, A. Skaskevich, S. Avdeychik, Y. Eisymont, G. Juldashaeva // Весн. ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 6. Тэхніка. – 2013. – №4 (163). – С. 102-110.

14. Technology of polytetrafluoroethylene-based nanocomposite materials: structural and morphological aspect / V. Voropaev, A. Skaskevich, S. Avdeychik, Y. Eisymont, G. Juldashaeva // Applied Technologies and Innovations. – 2013. – Volume 9. Issue 2. – PP. 59-68.

### **Материалы научных конференций**

15. Технология триботехнических композиционных материалов для автотракторной техники / В.А. Струк, А.В. Балейко, В.В. Воропаев, В.В. Андрикевич // Тракторы, автомобили, мобильные энергетические средства: проблемы и перспективы развития: Доклады междунар. науч.-техн. конф., Минск, 11-14 февраля 2009г. – БГАУ: Минск, 2009. – С. 361-366.

16. Технология высоконаполненных композитов на основе модифицированного политетрафторэтилена / Г.Н. Горбачевич, В.А. Струк, В.В. Воропаев, В.И. Кравченко // Механика - машиностроению: сб. научн. тр. междунар. науч.-техн. конф. «Инновации в машиностроении» и VI междунар. симп. по трибофатике МСТФ 2010 ОИМ НАН Беларуси. / ОИМ НАН Беларуси: редкол.: М.С. Высоцкий [и др.], г. Минск, 26-29 октября 2010 г. – Минск, 2010. – С. 272-275.

17. Structure and Technology of Engineering Nanocomposite Fluorinated Materials / A.N. Antanovich, V.V. Voropaev, V.G. Sorokin, S.V. Avdejchik //

Mechanika 2010: proceedings of the 15th int. conf., Kaunas, April 8-9, 2010. – Kaunas: Technologija, 2010. – PP. 19-24.

18. Технология высокопрочных материалов на основе модифицированного политетрафторэтилена / В.В. Воропаев, Г.Б. Юлдашева, А.А. Рыскулов, В.А. Струк, И.Л. Лавринюк // Современные материалы, техника и технологии в машиностроении: Сборник материалов междунар. науч.-практ. конф., г. Андижан, 19-20 апреля 2012г. – Андижан, 2012. – С. 54-59.

19. Методологические аспекты технологии машиностроительных фторкомпозитов / В.В. Воропаев, В.И. Кравченко, Г.Б. Юлдашева, Е.И. Эйсымонт, А.А. Скаскевич // Композиционные материалы в промышленности. Материалы Тридцать второй междунар. конф. 4-8 июня 2012г., Ялта. – Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2012. – С. 51-57.

20. Структурно-технологические факторы получения высокопрочных фторкомпозитов / В.В. Воропаев, В.А. Струк, Г.Н. Горбацевич, И.Л. Лавринюк // Композиционные материалы в промышленности. Материалы Тридцать второй междунар. конф. 4-8 июня 2012г., Ялта. – Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2012. – С. 57-65.

21. Энергосберегающие технологии получения изделий из машиностроительных фторкомпозитов / В.В. Воропаев, В.И. Кравченко, Г.Б. Юлдашева, Е.И. Эйсымонт, А.А. Скаскевич, А.А. Рыскулов // Композиционные материалы в промышленности. Материалы Тридцать второй междунар. конф. 4-8 июня 2012г., Ялта. – Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2012. – С. 65-68.

22. Воропаев, В.В. Структурно-морфологические закономерности получения высокопрочных композиционных материалов на основе политетрафторэтилена / В.В. Воропаев // Механика композиционных материалов и конструкций. Сб. тр. IV-го Всероссийск. симп. в 2-х томах. Том 1. Москва, 4-6 декабря 2012г. – М.: ИПРИМ РАН, 2012. – С. 45–52.

23. Технологическая парадигма изготовления изделий из фторкомпозитов / В.А. Струк, В.В. Воропаев, А.А. Скаскевич, С.В. Авдейчик // Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития : материалы III междунар. науч.-техн. конф., Гродно, 16–17 мая / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; редкол.: В.А. Струк (гл. ред.) [и др.]. – Гродно :ГрГУ 2013. – С. 28–32.

24. Воропаев, В.В. Оптимизирующий подход к формированию малодефектной структуры функциональных фторкомпозитов / В.В. Воропаев, Г.Н. Горбацевич, Г.Б. Юлдашева // Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития : материалы III междунар. науч.-техн. конф., Гродно, 16–17 мая / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; редкол.: В.А. Струк (гл. ред.) [и др.]. – Гродно :ГрГУ 2013. – С. 129–131.

25. Воропаев, В.В. Технология высоконаполненных фторкомпозитов с повышенными деформационно-прочностными и триботехническими характеристиками / В.В. Воропаев, А.С. Воронцов // Перспективные полимерные композиционные материалы. Альтернативные технологии. Переработка. Применение. Экология : докл. междунар. конф. «Композит-2013», Саратов, 25–27 июня. – Саратов, 2013. – С. 11–12.

26. Изменение технологической парадигмы как условие получения фторкомпозитов с улучшенными эксплуатационными характеристиками / В.В. Воропаев, В.А. Струк, А.А. Скаскевич, С.В. Авдейчик // Композиционные материалы в промышленности. Материалы Тридцать третьей междунар. конф. 27–31 мая 2013г., Ялта, Гурзуф. – Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2013. – С. 22–26.

### **Тезисы докладов научных конференций**

27. Воропаев, В.В. Триботехнические фторкомпозиты для герметизирующих статических и динамических систем / В.В. Воропаев, Г.Н. Горбачевич // Поликомтриб-2009: Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., г. Гомель, 22 – 25 июня 2009г. – Гомель, 2009. – С.53-54.

28. Структура и триботехнические характеристики фторсодержащих ингибиторов изнашивания / Е.В. Овчинников, А.К. Цветников, В.В. Воропаев, А.А. Рыскулов // Поликомтриб-2009: Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., г. Гомель, 22 – 25 июня 2009г. – Гомель, 2009. – С.170.

29. Nanocomposites based on polytetrafluoroethylene with different modification hierarchy/ A.N. Antanovich, V.I. Kravchenko, G.N. Gorbachevich, V.A. Struk, V.V. Voropaev // Фізика и технологія тонких плівок та наносистем : Матеріали XIII Міжнародної конференції. Т.1. под ред. д.х.н проф. Фрейка Д.М., м. Івано-Франківськ, 16-21 травня 2011. – Івано-Франківск : Изд-во Прикарпатского нац. у-та, 2011. - С.179.

30. Воропаев, В.В. Структурные аспекты технологии высоконаполненных фторкомпозитов / В.В. Воропаев // Новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования: Тез. докл. II респ. науч.-техн. конф. молодых ученых, г. Гомель, 2-4 октября 2012 г. – Гомель, 2012. – С. 22–24.

31. Смена технологической парадигмы в производстве высокопрочных триботехнических фторкомпозитов / В.В. Воропаев, С.В. Авдейчик, А.А. Скаскевич, В.А. Струк, Г.Н. Горбачевич // Поликомтриб-2013 : Тез. докл. междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 24–27 июня. – Гомель, 2013. – С.108.

### **Патенты на изобретения**

32. Способ изготовления изделия из композиционного материала на

основе высоковязкого полимера : пат. 14355 Респ. Беларусь, МПК C08J 5/00 В 29С 43/32 / В.В. Воропаев, В.Ф. Воропаев ; заявитель В.В. Воропаев, В.Ф. Воропаев. – № а 20080140 ; заявл. 2008.02.08 ; опубл. 2011.04.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 2. – С. 95.

33. Композиционный триботехнический материал для подвижных уплотнений : пат. 14817 Респ. Беларусь, МПК C08L 27/18, C08J 5/16 / Н.А. Антанович, В.В. Воропаев, Е.В. Овчинников, Д.А. Прушак, С.В. Авдейчик, Л.В. Конопляник, Р.В. Ищенко; заявитель ЗАО «Солигорский институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством». – № а 20100800 ; заявл. 2010.05.24 ; опубл. 2011.10.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2011. – № 5. – С. 125.

34. Способ изготовления заготовки из композиционного материала на основе политетрафторэтилена : пат. 18089 Респ. Беларусь, МПК C08J 5/00, В29С 43/56, В29К 27/18 / В.А. Струк, В.В. Воропаев, Г.Н. Горбачевич, С.В. Авдейчик, В.И. Кравченко, Е.В. Овчинников, Г.А. Костюкович; заявитель Учреждение образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купаль». – № а 20120738 ; заявл. 2012.05.10 ; опубл. 2014.04.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 2. – С. 82–83.



## РЕЗЮМЕ

Воропаев Виктор Викторович

Разработка составов и технологии наноконпозиционных материалов на основе полимер-олигомерных фторсодержащих матриц

**Ключевые слова:** политетрафторэтилен, высоконаполненные композиты, углеродные наполнители, дефекты гетерогенной структуры, технологии упрочнения.

**Цель работы:** разработка составов и технологии производства высоконаполненных фторкомползитов, содержащих углеродные модификаторы, для изделий с повышенными параметрами деформационно-прочностных и триботехнических характеристик.

**Объект исследования:** композиционные материалы на основе полигетрафторэтилена, модифицированные углеродсодержащими компонентами различного состава, дисперсности и технологии получения, при их содержании 20–35% масс.

**Предмет исследования:** механизмы межфазного взаимодействия политетрафторэтилена и углеродсодержащих частиц при производстве композиционных материалов и монолитизации изделий.

**Методы исследований:** ИК-спектроскопия, растровая электронная (РЭМ) и атомная силовая (АСМ) микроскопия, ГСТ-анализ, рентгеноструктурный анализ, методы определения деформационно-прочностных, триботехнических и теплофизических характеристик, стендовые и натурные испытания.

**Полученные результаты и их новизна:** Проведены комплексные исследования особенностей формирования гетерофазной структуры композиционных материалов на основе политетрафторэтилена с повышенным содержанием углеродсодержащих наполнителей различного состава, строения и технологии получения (25–35% масс.). На основе концепции многоуровневого модифицирования разработана технология получения малодефектных структур, основанная на механохимическом воздействии на компоненты (технология МА), обеспечении устойчивой адгезионной связи на границе раздела «матрица-наполнитель» за счет различия в тепловом расширении компонентов (технология ВС), и ликвидации макродефектов за счет холодного течения матрицы (технология ХМ), которые обеспечивают повышение показателей деформационно-прочностных и триботехнических характеристик изделий не менее чем в 1,5–2,0 раза. Разработаны составы композитов с комплексным модификатором, которые обеспечивают полноценную замену промышленных материалов типа Флубон (Флувис) при меньшей материало- и энергоемкости производства. Новизна результатов защищена 3 патентами РБ на изобретение.

**Рекомендации по использованию и область применения:** разработанные технологии рекомендованы для внедрения на отечественных предприятиях по производству изделий из композитов типа Флубон (Флувис) с целью увеличения их характеристик и снижения материало- и энергоемкости. Изделия из композитов с повышенными показателями деформационно-прочностных и триботехнических характеристик предназначены для увеличения служебного ресурса узлов трения химического оборудования, арматуры, автомобильных агрегатов на ОАО «Белкард», ОАО «ГродноАзот» и ЧУП «Цветлит».



## РЭЗЮМЭ

Варапаеў Віктар Віктаравіч

Распрацоўка складаў і тэхналогіі нанакампазіцыйных матэрыялаў на аснове палімер-алігамэрных фторутрымліваючых матрыц

**Ключавыя словы:** політэтрафторэтылен, высокананоўненыя кампазіты, вугляродныя напаяльнікі, дэфекты гетэрагеннай структуры, тэхналогіі ўзмацнення.

**Мэта работы:** распрацоўка складаў і тэхналогіі вытворчасці высокананоўненых фторкампазітаў, змяшчаючых вугляродныя мадыфікатары і вырабаў з іх з падвышанымі параметрамі дэфармацыйна-трываласных і трыбатэхнічных характарыстык.

**Аб'ект даследавання:** кампазіцыйныя матэрыялы на аснове політэтрафторэтылену, мадыфікаваныя вугляродзмяшчаючымі кампанентамі рознага складу, дысперснасці і тэхналогіі вырабу з утрыманнем 20–35% мас.

**Прадмет даследавання:** механізмы межфазнага ўзаемадзеяння політэтрафторэтылену і вугляродзмяшчаючых часцінак пры вытворчасці кампазіцыйных матэрыялаў і маналітызацыі вырабаў.

**Метады даследаванняў:** ІЧ-спектраскапія, растравая электронная (РЭМ) і атамная сілавая (АСМ) мікраскапія, ТСТ-спектраскапія, рэнтгенаструктурны аналіз, метадыкі вызначэння дэфармацыйна-трываласных, трыбатэхнічных і цеплафізічных характарыстык, стэндавыя і натурныя выпрабаванні.

**Атрыманя вынікі і іх навізна:** Праведзены комплексныя даследаванні асаблівасцяў фарміравання гетэрафазнай структуры кампазіцыйных матэрыялаў на аснове політэтрафторэтылену з павышаным зместам вугляродзмяшчаючых напаяльнікаў рознага складу, пабудовы і тэхналогіі атрымання (25–35% мас.). На падставе канцэпцыі шматузроўневага мадыфікавання распрацавана тэхналогія атрымання маладэфектных структур, заснаваная на механімічным уздзеянні на кампаненты (тэхналогія МА), забяспечэнні трывалай адгезійнай сувязі на мяжы падзелу «матрыца-напаяльнік» за кошт адрознення ў цеплавым пашырэнні кампанентаў (тэхналогія ВС), і ліквідацыі макрадэфектаў за кошт халоднага цяжэння матрыцы (тэхналогія ХМ), якія забяспечваюць павышэнне паказчыкаў дэфармацыйна-трываласных і трыбатэхнічных характарыстык вырабаў не менш чым у 1,5–2,0 разы. Распрацаваны склады кампазітаў з комплексным мадыфікатарам, якія забяспечваюць паўнавартасную замену прамысловых матэрыялаў тыпу Флубон (Флувіс) пры меншай матэрыяла-і энергаёмнасці вытворчасці. Навізна вынікаў абаронена 3 патэнтамі РБ на вынаходніцтва.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць ужывання:** распрацаваныя тэхналогіі рэкамендаваны для ўкаранення на айчынных прадпрыемствах па вытворчасці вырабаў з кампазітаў тыпу Флубон (Флувіс) з мэтай павелічэння іх характарыстык і зніжэння матэрыяла-і энергаёмнасці. Вырабы з кампазітаў з падвышанымі паказчыкамі дэфармацыйна-трываласных і трыбатэхнічных характарыстык прызначаны для павелічэння службовага рэсурсу вузлоў трэння хімічнага абсталавання, арматуры, аўтамабільных агрэгатаў на ААТ «Белкард», ААТ «ГроднаАзот» і АУП «Цветліт».

## SUMMARY

Voropaev Viktor Victorovich

Development of formulations and technologies of nanocomposite materials based on polymer-oligomeric fluorinated matrixes.

**Keywords:** polytetrafluoroethylene, highly filled composites, carbon fillers, defects of heterogeneous structure, technology of hardening.

**Objective:** To develop formulations and production technologies of fluorocomposites containing carbon modifiers and their products with improved deformation and strength parameters and tribological characteristics.

**The object of research:** composite materials based on polytetrafluoroethylene modified by carbon-containing components of different composition, dispersion and technology for the content of 20–35% by weight.

**The subject of research:** mechanisms of interfacial interaction between PTFE and carbon particles during the manufacturing process of composite materials and consolidation of products.

**Research methods:** infrared spectroscopy, scanning electron (SEM) and atomic force microscopy (AFM), TSC-analysis, X-ray analysis, methods for determining the deformation and strength, tribological and thermal characteristics, bench and field tests.

**These results and their novelty:** comprehensive studies are conducted about the formation of a heterophase structure of composite materials based on polytetrafluoroethylene with high content of carbon fillers of different composition, structure and technology of (25–35% wt.). The technologies based on the concept of multilevel modifying are developed for production of composites with fault-free structure: 1) based on mechanochemical effect on the components (MA technology), 2) providing a stable adhesive bond at the interface of the "matrix-fill" due to the difference in thermal expansion (AT technology), and 3) eliminating the expense of macrodefects due to the cold flow of the matrix (CC technology). These technologies provide increased performance of deformation and strength and tribological characteristics of the products of at least 1.5–2.0 times. Formulations of composites with a complex modifier, which provide a complete replacement of industrial materials such as Flubon (Fluvis) at lower rates of material and energy resources used in production, are developed. The novelty of the results is protected by three patents for the invention of Republic of Belarus.

**Recommendations for the use and application:** developed technologies are recommended for implementation at the domestic enterprises producing products like composites Flubon (Fluvis) in order to increase their performance and reduce material and energy consumption. Products made of composites with higher rates of deformation, strength and tribological properties are designed to maximize the service life of friction units of chemical equipment, fixtures, motor units at JSC "Belcard", JSC "GrodnoAzot" and "Tsvetlit" enterprise.

Научное издание

**Воропаев Виктор Викторович**

**РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ И ТЕХНОЛОГИИ  
НАНОКОМПОЗИЦИОННЫХ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ  
НА ОСНОВЕ ПОЛИМЕР-ОЛИГОМЕРНЫХ ФТОРСОДЕРЖАЩИХ  
МАТРИЦ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук  
по специальности 05.17.06 - технология и переработка  
полимеров и композитов

Ответственный за выпуск В.В. Воропаев

Подписано в печать 13.10.2014. Формат бумаги 60 x 84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>.  
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1,4.  
Тираж 60 экз. Заказ 449.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
УО «Белорусский государственный технологический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/227 от 20.03.2014.  
ЛП № 02330/12 от 30.12.2013.  
Ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск.