

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ»

УДК 620.22:621.79.01:678.033:678.742

**АНТОНОВ**  
Александр Сергеевич

**КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ  
ТЕРМОПЛАСТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО  
РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

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

по специальности  
05.16.09 – материаловедение (химическая промышленность)

Минск 2018

Научная работа выполнена в учреждении образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы».

Научный руководитель **Струк Василий Александрович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник научно-исследовательской части учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»

Официальные оппоненты: **Шаповалов Виктор Михайлович**, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом «Композиционные материалы и рециклинг полимеров» государственного научного учреждения «Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси»

**Круль Леонид Петрович**, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой высокомолекулярных соединений Белорусского государственного университета

Оппонирующая организация Учреждение образования «Белорусский государственный университет транспорта»

Защита состоится «15» июня 2018 г. в 13.00 ч. на заседании совета по защите диссертаций Д 02.08.04 при учреждении образования «Белорусский государственный технологический университет» по адресу: 220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, зал заседаний ученого совета, ауд. 240, корп. 4.  
Тел.: 8-(017)-327-80-46, факс 8-(017)-327-62-17.  
e-mail: zholnerovich@belstu.by.

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

Автореферат разослан «11» мая 2018 г.

Ученый секретарь совета  
по защите диссертаций  
кандидат технических наук, доцент

Н. В. Жолнерович

## ВВЕДЕНИЕ

В номенклатуре функциональных полимерных композитов определяющее место занимают смесевые материалы на основе полимерных и олигомерных компонентов. Совмещение матричного связующего с полимерным или олигомерным модификатором позволяет реализовать необходимый комплекс параметров эксплуатационных характеристик, обеспечивающий заданный ресурс изделий в конкретных условиях применения.

Существенной проблемой обеспечения стабильных параметров структурных характеристик смесевых композитов, определяющих нагрузочно-скоростной и температурный диапазон применения изделий в статических и динамических конструкциях узлов и агрегатов различного назначения, является преодоление выраженной термодинамической несовместимости полимерных и олигомерных компонентов, обусловленной особенностями состава, структуры макромолекул, различием реологических, теплофизических и других характеристик. Поэтому в технологии смесевых композитов используют специальное оборудование (двухшнековые смесители, установки для механохимического совмещения, высокоэнергетического воздействия) и специальные добавки – компатибилизаторы, повышающие межфазное взаимодействие компонентов.

В этом аспекте целесообразно рассмотрение научных подходов к получению смесевых композитов с заданными параметрами эксплуатационных характеристик путем повышения термодинамической совместимости с использованием феномена наносостояния. Поэтому существенный научный и практический интерес представляют физико-химические и структурные превращения при совмещении полимерных и олигомерных компонентов, близких по молекулярному строению, с использованием наноразмерных функциональных модификаторов различного состава и строения.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Связь работы с научными программами (проектами), темами.** Работа выполнена на кафедре материаловедения и ресурсосберегающих технологий учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы» в рамках заданий государственных программ научных исследований Министерства образования Республики Беларусь и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований: «Разработать составы и технологию формирования триботехнических полимерных покрытий для транспортных агрегатов на основе алифатических полиамидов, модифицированных наноразмерными полимер-олигомерными частицами» (№ госрегистрации 20081936, срок исполнения 2008–2009), «Разработать технологию получения наномодификаторов из природных силикатов, активированных в условиях высокоэнергетического

воздействия» (№ госрегистрации 20091287, срок исполнения 01.01.2009–30.06.2010), «Разработка составов и технологий композиционных материалов на основе смесевых полимер-полимерных систем и исследование зависимости свойств композитов от их состава и фазовой структуры» (№ госрегистрации 20150134, срок исполнения 23.05.2014–31.03.2016), «Разработать составы конструкционных и триботехнических материалов на основе термомеханически совмещенных смесей регенерированных термопластов и организовать опытное производство изделий из них» (№ госрегистрации 20161454, срок исполнения 04.01.2016–31.12.2018), «Разработать составы и технологию высоконаполненных триботехнических и герметизирующих нанокоспозиционных материалов на основе политетрафторэтилена и организовать их опытное производство» (№ госрегистрации 20162035, срок исполнения 04.01.2016–31.12.2018), а также задания научно-технической программы Союзного государства «Триада» «Разработать и внедрить компьютерную технологию моделирования и оптимизации карданных передач наземного транспорта» (договор ПА 2.6.05114 от 01.04.2006, № госрегистрации 20063226, срок исполнения – 2006–2008).

Прикладные исследования по теме диссертационной работы проведены в ходе научно-технического сотрудничества с ОАО «Белкард», УП «Цветлит», ЗАО «СИПР с ОП», в том числе в рамках договора с ОАО «Белкард» № ИТМ 12–11 «Разработка импортозамещающего состава и технологии композиционных материалов для шлицевых соединений карданных валов и выпуск опытно-промышленной партии втулок с покрытием» (срок исполнения 03.10.2011–30.12.2012).

**Цель и задачи исследования.** Цель работы состояла в разработке составов конструкционных и триботехнических материалов на основе смесей термопластов с близким макромолекулярным строением для конструкций технологического оборудования и автокомпонентов повышенного ресурса.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

- 1) исследовать особенности структуры, морфологии, адгезионных и триботехнических характеристик полимер-олигомерных смесей фторсодержащих соединений, полученных методом термогазодинамического синтеза;
- 2) исследовать механизмы совмещения термопластичных компонентов при различных технологиях воздействия на компоненты;
- 3) разработать составы композиционных материалов на основе смесей алифатических полиамидов, полиолефинов и фторсодержащих соединений с повышенными параметрами деформационно-прочностных, адгезионных и триботехнических характеристик;
- 4) осуществить апробацию конструкционных и триботехнических изделий из смесевых композитов в технологическом оборудовании и автокомпонентах.

**Объект исследования** – композиционные материалы на основе термомеханически совмещенных термопластов.

**Предмет исследования:** механизмы межфазных взаимодействий при совмещении расплавов полимерных и олигомерных компонентов на основе полиамидов, полиолефинов и фторсодержащих соединений.

**Научная новизна** исследований состояла в установлении механизмов межфазных взаимодействий в смесевых композитах, образованных расплавами термопластов, модифицированных наноразмерными частицами различного состава, обеспечивающих повышение термодинамической совместимости и реализацию синергического эффекта увеличения параметров деформационно-прочностных, адгезионных, триботехнических характеристик и стойкости к термоокислительной деструкции.

**Положения, выносимые на защиту:**

1) экспериментально установленные особенности строения дисперсных продуктов термогазодинамического синтеза политетрафторэтилена, представляющих сочетание олигомерных и полимерных фракций, способных к передеформированию под действием напряжений сдвига с образованием ротапринтных композиционных покрытий, снижающих коррозионно-механический износ металлополимерных систем;

2) экспериментально установленные механизмы межфазных взаимодействий в смесевых композитах алифатических полиамидов (ПА 6, ПА 6.6, ПА 12, ПА 11), полиолефинов (ПП, ПЭВД, ПЭНД), модифицированных допинговыми добавками (0,01–0,10 мас. %) углерод- и металлсодержащих частиц (коллоидно-графитовый препарат С–1, УНТ, шихта, медь), состоящие в образовании адсорбционных межмолекулярных связей, которые приводят к увеличению в 1,1–1,2 раза параметров деформационно-прочностных, в 2,0–3,0 раза адгезионных и в 1,5–2,0 раза триботехнических характеристик по сравнению с матричными полимерами;

3) установленный эффект увеличения стойкости смесевых композитов к термоокислительной деструкции при температуре окружающей среды 373–423 К при их модифицировании наноразмерными частицами углеродсодержащих (коллоидно-графитовый препарат С–1, УНТ, шихта), металлсодержащих (медь) соединений при содержании 0,01–0,10 мас. % вследствие проявления ими свойств физического компатибилизатора и уменьшения активности полимерных макромолекул к средству кислорода;

4) разработанные составы конструкционных, триботехнических материалов на основе термомеханически совмещенных полиамидов (ПА 6, ПА 6.6, ПА 11, ПА 12) и регенерированных полиолефинов (ПП, ПЭНД, ПЭВД) с повышенными в 1,1–3,0 раза параметрами служебных характеристик для изготовления корпусных, триботехнических элементов и покрытий ленточных конвейеров для химической и горнодобывающей промышленности, автомобильных компонентов, запорной и регулирующей арматуры.

**Личный вклад соискателя ученой степени** состоял в разработке методики термомеханического совмещения расплавов термопластов с различным макромолекулярным строением и массой, проведении экспериментальных исследований, лабораторных, стендовых и эксплуатационных испытаний, творческом участии в разработке и оптимизации составов композиционных функциональных материалов и металлополимерных конструкций, патентовании разработок, обсуждении результатов на конференциях и симпозиумах.

**Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов.** Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены более чем на 20 профильных научных и научно-технических конференциях, семинарах и симпозиумах, в том числе международных: Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Института механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси «Полимерные композиты и трибология (Поликомтриб–2009)», г. Гомель, 2009 г.; Международной научно-технической конференции, посвященной 80-летию со дня рождения В.А. Скотникова «Тракторы, автомобили, мобильные энергетические средства: проблемы и перспективы развития», г. Минск, 2009 г.; 14-ой, 20-ой, 21-ой Международных конференциях «Mechanika–2009, 2015, 2016», г. Каунас, Литва, 2009 г., 2015 г., 2016 г.; 16-ой Международной конференции «Mechanics of composite materials», г. Рига, Латвия, 2010 г.; XVII Международной научно-технической конференции «Машиностроение и техносфера XXI века», г. Севастополь, Украина, 2010 г.; XVI международной научной конференции «Нано-дизайн, технологии, компьютерное моделирование», Гродно, 2015 г.; Белорусско-Китайском молодежном инновационном форуме «Новые горизонты–2015», г. Минск, 2015 г.; совмещенной Международной научно-технической конференции «Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения (INTERMATIC–2015)» и VII Всероссийской научно-технической школы-конференции молодых ученых «Молодые ученые–2015», г. Москва, Россия, 2015 г., научно-практической конференции «Инновационные решения проблем экономики знаний Беларуси и Казахстана», г. Минск, 2016 г., Китайско-Белорусском форуме в области инновационного сотрудничества по коммерциализации результатов научно-технической деятельности, г. Минск, 2016 г.

**Опубликованность результатов диссертации.** Результаты теоретических, экспериментальных и прикладных исследований, изложенные в диссертационной работе, опубликованы в 56 печатных работах (18,9 авт. лист.): 1 монографии, 6 статьях в научных изданиях, соответствующих п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, 11 статьях в других научных журналах, 24 материалах и 12 тезисах докладов научных конференций и симпозиумов. Направлены для рассмотрения 2 заявки на выдачу патента РБ на изобретение.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 5 глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Работа изложена на 180 страницах машинописного текста, содержит 74 рисунка и 20 таблиц, расположенных на 52 листах; 227 использованных источника, в том числе 56 публикаций соискателя и 3 приложений, размещенных на 20 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Первая глава** диссертационной работы содержит анализ научных, патентных и коммерческих источников, посвященных материаловедению и технологии композитов на основе полимерных и олигомерных матриц, полученных термомеханическим совмещением расплавов, механохимическим воздействием на твердофазные компоненты, прессованием с последующим спеканием (монолитизацией), перемешиванием растворов, эмульсий и суспензий, термообработкой осажденных на субстрат дисперсных частиц.

В работах отечественных и зарубежных научных школ, руководимых академиком В. А. Белым, проф. О. Р. Юркевичем, чл.-корр. А. В. Рогачевым, С. С. Песецким, Н. Р. Прокопчуком, проф. В. А. Струком, И. А. Грибовой, Е. Б. Тростянской, В. Н. Кулезневым, Дж. Мэнсоном, Л. Сперлингом, Ю. С. Липатовым, Д. Полом, С. Ньюменом и др., установлены основные механизмы формирования структуры композиционных материалов на основе термопластичных полимерных и сшивающихся (олигомерных) матриц. Показано, что независимо от состава и технологии совмещения термодинамическая несовместимость компонентов обуславливает образование гетерогенной структуры с различным характером распределения и гомогенности компонентов.

Преобладающая часть исследований в области смесевых материалов рассматривает физико-химические и структурные аспекты совмещения компонентов с различным химическим составом, молекулярным строением и массой – полиамидов и полиолефинов, полиамидов и полиацеталей, полиамидов и полиэфиров, полиамидов и стирольных пластиков. Вместе с тем, композитам на основе смесей компонентов с близкими параметрами структуры, состава и молекулярного строения уделено недостаточно внимания, что резко сужает их марочный ассортимент и потенциальные возможности применения в конструкциях машин, механизмов и технологического оборудования. В этом аспекте перспективными материалами являются продукты совмещения полиамидов, полиолефинов, фторсодержащих компонентов различной молекулярной массы и строения.

**Во второй главе** диссертации рассмотрены методики исследования межфазных процессов в системах, полученных совмещением термопластичных полимерных и олигомерных компонентов при различных технологиях воздействия, физико-химических и трибохимических превращений при переработке компози-

тов и эксплуатации изделий из них в металлополимерных конструкциях различного функционального назначения.

В качестве компонентов для получения совмещенных матриц и композитов различного назначения использовали термопластичные полимеры и олигомеры, наиболее распространенные в материаловедении и технологии полимерных материалов: алифатические полиамиды (ПА) – ПА 6–210/310 низковязкий, ПА 6.6–Л (Филиал «Завод Химволокно» ОАО «Гродно Азот»), ПА 66/6 Grilon TSS/4, ПА 12 Grilamid L20 (EMS–CHEMIE AG, Швейцария), ПА11 Rilsan (Arkema, Франция), полиолефины – полипропилен (ПП), полиэтилен высокого давления (ПЭВД), полиэтилен низкого давления (ПЭНД) (ОАО «Полимир»), полиэфиры – полиэтилентерефталат (ПЭТФ), полибутилентерефталат (ПБТФ) первичные (ОАО «Могилевхимволокно») и регенерированные (ОАО «Белвтрполимер»), фторсодержащие соединения – политетрафторэтилен (ПТФЭ) Ф4 и Ф4–М (ОАО «Галоген», Россия), фторсодержащие олигомеры «Фолеокс» (ФГУП «Научно-исследовательский институт синтетического каучука имени академика С. В. Лебедева», Россия), продукты термогазодинамического синтеза ПТФЭ (ТГДС), выпускаемые под торговой маркой «Форум» (Институт химии ДВО РАН, Россия), позиционируемые как ультрадисперсный политетрафторэтилен (УПТФЭ).

Для управления параметрами структуры и эксплуатационных характеристик композитов и изделий из них использовали дисперсные, в т. ч. наноразмерные, частицы углеродсодержащих (коллоидно-графитовый препарат С–1 (КГП С–1), шихту детонационного синтеза баллистических порохов, углеродные нанотрубки (УНТ)) (НП ЗАО «Синта», ГНУ «Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси») и металлсодержащих (формиат меди) соединений, полученные по оригинальным технологиям производителей.

Совмещение компонентов осуществляли по технологиям экструзионного смешивания на двухшнековом экструдере MPC 67/2 фирмы «Комплекс», термомеханического смешивания в материальном цилиндре литьевой машины Battenfeld серии ТМ (Wittmann Battenfeld GmbH, Германия) и осаждения дисперсных частиц из псевдооживленного слоя на твердом субстрате (установка ГНУ «ИММС им. В. А. Белого НАН Беларуси») при режимах, регламентированных производителями оборудования.

Физико-химические процессы на границе раздела фаз в смесевых композициях и металлополимерных системах исследовали с применением современных методов анализа: ИК-спектроскопии (Tensor–27), рентгеновской дифрактометрии (Дрон–3,0), дифференциально-термического анализа (ДТА) (Thermoscan–3), атомно-силовой (АСМ), электронной растровой (РЭМ) и оптической (ОМ) микроскопии с применением оригинальных приборов (Mira, Tescan, NT–206, MDS). Энергетическое состояние компонентов оценивали методом спектроскопии тер-



мостимулированных токов (ТСТ-анализа) на установке ОДО «Микротест-машины».

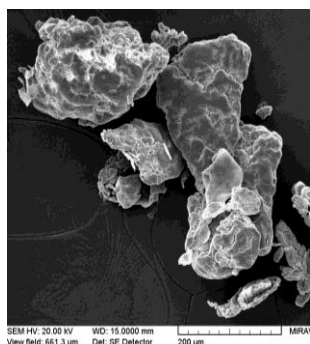
Параметры деформационно-прочностных, триботехнических, адгезионных характеристик композиционных материалов и покрытий определяли по общепринятым методикам с использованием стандартных и рекомендованных образцов по действующим стандартам Республики Беларусь или нормативной документации разработчика на специализированном оборудовании Z010 Zwick, FT-2. Реологические параметры компонентов и смесей исследовали на приборе ИИРТ-119.

Стендовые и производственные испытания изделий из разработанных композиционных материалов и покрытий проводили на ОАО «Белкард», ОАО «Белвторполимер», УП «Цветлит», ЗАО «СИПР с ОП».

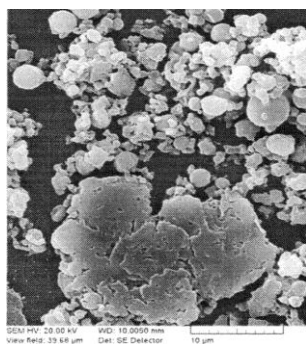
Обработку экспериментальных данных проводили с использованием программных продуктов «Statistica».

**В третьей главе** диссертационной работы рассмотрены особенности структуры, морфологии, адгезионных и триботехнических характеристик продуктов термической обработки блочного политетрафторэтилена, характеризующихся как продукты термогазодинамического синтеза (ТГДС), выпускаемых под торговой маркой «Форум».

Морфологический анализ промышленных порошкообразных продуктов ПТФЭ марки Ф-4 и УПТФЭ («Форум»), проведенный методом РЭМ (рисунок 1),



а)



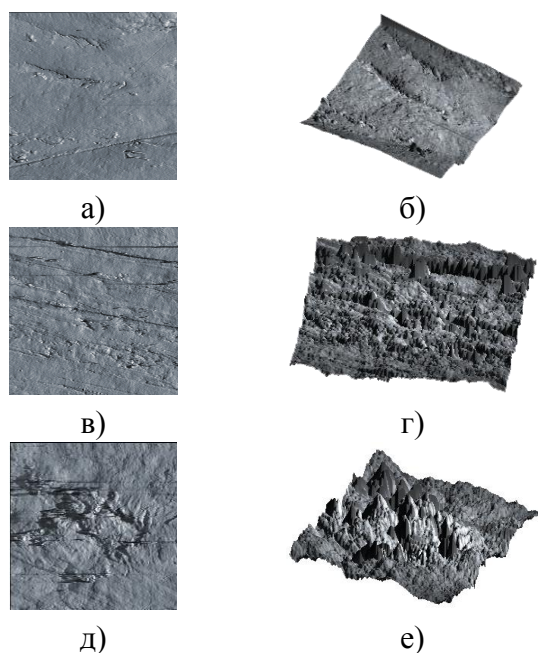
б)

**Рисунок 1. – Характерная морфология частиц промышленных марок ПТФЭ (Ф-4) (а) и УПТФЭ («Форум») (б).  
Метод РЭМ**

свидетельствует о характерных особенностях, которые предполагают различное строение частиц, полученных по технологиям промышленного синтеза и ТГДС. Выраженная сферическая форма частиц УПТФЭ и их повышенная пластическая деформативность свидетельствуют об их полифракционном строении. Результаты исследования теплофизических характеристик методом ДТА подтверждают многофазное строение с различными температурами плавления и сублимации компонентов, проявляю-

щимися в диапазоне температур 333–473 К с характерными эндоэффектами и дифференциальными эффектами потери массы на кривых дифференциальной термogrавиметрии (ДТГ) и ДТА при 333 К, 563 К, 710 К, 720 К, 730 К и 763 К. Сравнительный анализ ИК-спектров и данных ДТА модельных образцов ПТФЭ (Ф-4) и УПТФЭ («Форум») свидетельствует о существенном различии этих продуктов, полученных по различным технологиям синтеза.

Было сделано предположение о полифракционном составе УПТФЭ, включающим олигомерные (низкоплавкие) фракции с диапазоном температур плавления 333–730 К, обусловленном протеканием преимущественно процессов абляции. Анализ литературных источников, посвященных исследованиям процессов синтеза ПТФЭ и диспергирования блочных полуфабрикатов высокоэнергетическими (тепловыми, лазерными, ионизирующими) потоками, и проведенные исследования особенностей состава и структуры УПТФЭ позволили предложить модельную композиционную систему, состоящую из набора олигомерных фракций и наноразмерных полимерных частиц с различным габитусом – вискерным, пластинчатым, сферическим. Адекватность предложенной модели убедительно подтверждена исследованиями процессов передеформирования и знакопеременного переноса при относительном осевом перемещении субстратов из инертных материалов (силикатного стекла). Наличие в суммарной частице УПТФЭ олигомерной фракции, выполняющей роль матрицы, обеспечивает ее закрепление и многократное передеформирование в микронеровностях субстрата. Экспериментальным подтверждением наличия у частиц УПТФЭ олигомерной составляющей являются данные АСМ (рисунок 2), которые свидетельствуют об изменении морфологии поверхностного слоя роталпринтного покрытия толщиной 3–5 мкм на стеклянной подложке в результате сублимации олигомерных компонентов с температурой плавления 333–473 К. Благодаря наличию олигомерных составляющих обеспечивается закрепление смесового композита (УПТФЭ) на субстратах любого состава и с различными параметрами шероховатости, а также возможность образования функционального (разделительного, защитного) слоя со свойствами знакопеременного переноса при механических и температурных воздействиях. Проведенные модельные эксперименты позволили разработать методы модифицирования рабочих поверхностей элементов металлополимерных систем для придания им заданных функциональных характеристик и компонентов композиционных материалов на основе политетрафторэтилена.



**Рисунок 2. – Характерная морфология (а, в, д) и трехмерное изображение (б, г, е) поверхности слоя УПТФЭ на стеклянной подложке исходных (а, б) и после экспозиции при 473 К в течение 10 мин (в, г) и 30 мин (д, е).**

**Поле сканирования 25×25 мкм**

Разработанные представления о структуре смесовых композитов (УПТФЭ), образованных при термическом воздействии на полуфабрикат, позволили ис-

пользовать этот комплексный модификатор для получения смесевых композитов и функциональных покрытий на основе термопластичных матриц.

**Четвертая глава** диссертации содержит результаты исследований структуры и параметров эксплуатационных характеристик композиционных материалов, полученных совмещением компонентов, отличающихся молекулярным строением, при использовании различных технологических приемов.

Учитывая разнообразие функционального назначения и конструктивного исполнения элементов технологического оборудования, запорной и регулирующей арматуры и автоагрегатов, были рассмотрены особенности совмещения компонентов с различным потенциалом к межфазному взаимодействию: смеси алифатических полиамидов (ПА 6, ПА 6.6, ПА 11, ПА 12), смеси полиамидов с полиэфирами (ПЭТФ, ПБТФ), смеси полиолефинов первичных и регенерированных с термоэластопластами (ТЭП) и фторсодержащими соединениями (УПТФЭ).

При термомеханическом совмещении гранулированных фракций полиэфиров (ПЭТФ и ПБТФ) и полиамидов в материальном цилиндре литьевой машины образуются гетерофазные структуры с выраженным разделением фаз вследствие различия молекулярного строения, реологических и теплофизических характеристик использованных компонентов. Исследования сколов модельных образцов, охлажденных в жидком азоте (75 К), методами АСМ и РЭМ свидетельствуют о наличии общих закономерностей формирования структуры композитов, характерных для термодинамически несовместимых полимеров, рассмотренных в исследованиях, выполненных чл.-корр. С. С. Песецким, проф. В. А. Струком, А. Ф. Мануленко. При относительно небольшом содержании каждого компонента в матричном связующем (0,5–10 мас. %) возможно формирование гетерогенной структуры с достаточной стабильностью параметров деформационно-прочностных характеристик. Установлено, что введение в состав композита ПЭТФ (ПБТФ) 5–10 мас. % ПА 6 дисперсных частиц слоистых силикатов (слюда, талька) в количестве 5–20 мас. % способствует увеличению в 1,3–1,5 раза износостойкости и в 1,16–2,4 раза адгезионной прочности покрытий.

Исследованы особенности структуры и эксплуатационных характеристик смесевых композитов на основе компонентов с повышенной термодинамической совместимостью – алифатических полиамидов и полиолефинов.

Базовые компоненты полиамид – полиамидных смесей имеют близкое строение молекулярной цепи с различной длиной сегментов, примыкающих к амидной группе. При этом параметры деформационно-прочностных, теплофизических и реологических характеристик различных марок существенно отличаются. Указанное обстоятельство позволяет, изменяя соотношение компонентов, оптимизировать структуру композита в соответствии с эксплуатационными требованиями к изделиям из них (таблица).

Введение в состав базового полиамида (ПА 6, ПА 6.6) модификаторов (ПА 12, ПА 6) позволяет оптимально реализовать преимущества каждого из ком-

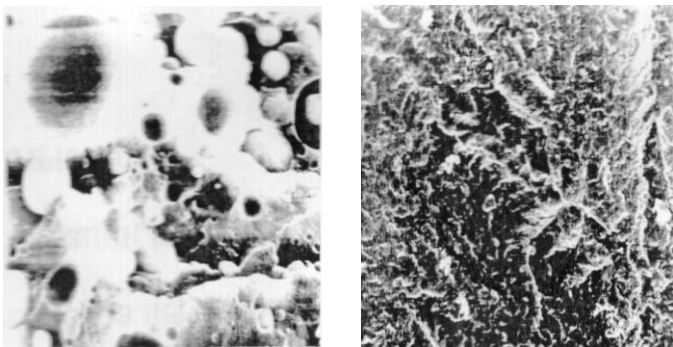
понентов смесового материала при достижении технически значимого эффекта увеличения параметров  $E_f$ ,  $\sigma_{fm}$ ,  $\sigma_m$ .

Таблица – Параметры деформационно-прочностных характеристик композиционных материалов на основе алифатических полиамидов

Материал	$E_f$ , МПа	$\sigma_{fm}$ , МПа	$\varepsilon_{fm}$ , %	$\sigma_m$ , МПа	$\varepsilon_m$ , %
ПА6-210/310	2318,1	89,18	6,1	65,19	3,8
ПА6,6-Л	2647,1	107,30	5,8	77,70	4,0
ПА66/6	2207,6	95,97	6,2	69,36	4,3
ПА12	1226,1	51,90	6,1	56,35	250,0
ПА6,6 (94%) + ПА6 (5%) + ПА12 (1%)	2571,1	99,89	4,7	77,71	4,3
ПА6,6 (90%) + ПА6 (5%) + ПА12 (5%)	2525,2	100,60	5,2	75,58	5,9
ПА6,6 (84,5%) + ПА6 (10%) + ПА12 (5%) + С1 (0,5%)	2984,7	114,70	6,7	78,84	3,9
ПА6,6 (84,5%) + ПА6 (10%) + ПА12 (5%) + УНТ (0,5%)	2797,8	109,70	6,1	54,19	2,1
ПА6,6 (84,5%) + ПА6 (10%) + ПА12 (5%) + шихта (0,5%)	2850,5	115,10	6,8	77,80	3,8

Примечание:  $E_f$  – модуль упругости при изгибе;  $\sigma_{fm}$  – предел прочности при изгибе при максимальной нагрузке;  $\sigma_m$  – прочность при растяжении;  $\varepsilon_{fm}$  – относительное удлинение при максимальной нагрузке (при изгибе);  $\varepsilon_m$  – относительное удлинение при максимальной нагрузке.

Важной особенностью смесевых композитов на основе алифатических полиамидов является высокая гомогенность структуры, обусловленная формированием межфазных слоев из макромолекул близкого строения (рисунок 3). В отличие от смесей компонентов с различным молекулярным строением компонентов (ПА 6 – ПЭТФ, ПА 6 – ПБТФ, ПА 6 – СФД) смеси алифатических полиамидов (ПА 6, ПА 6.6, ПА 12) не имеют выраженной границы раздела фаз.



а)

б)

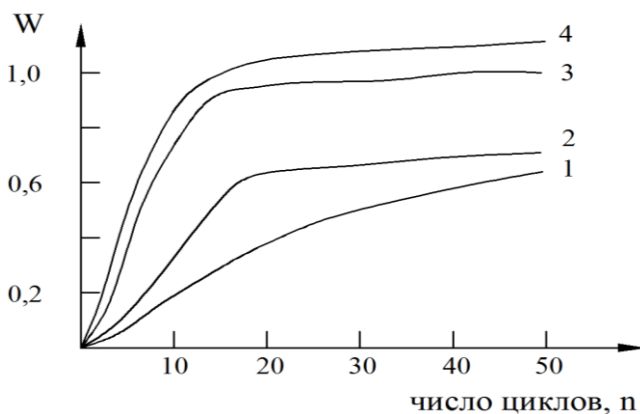
**Рисунок 3. – Характерная морфология композита сравнения ПА6 – СФД (а) и композита ПА6.6 + ПА6 (б). Сколы в азоте. Содержание компонентов 50 : 50 мас. %**

При введении в состав композита наноразмерных частиц (шихта, УНТ, КГП С–1) повышаются значения параметров  $E_f$  (от 2207,6–2647,0 МПа до 2797,8–2984,7 МПа),  $\sigma_{fm}$  (от 51,9–107,3 МПа до 109,7–115,1 МПа),  $\sigma_m$  (от 56,35–77,70 МПа до 77,80–78,84 МПа). Термомеханически совмещенные полиамиды целесообразно использовать в качестве связующих конструкционных и триботехнических материалов.

При совмещении полиолефинов (ПП, ПЭНД, ПЭВД, ТЭП) формируются композиты с высокой фазовой однородностью и регулируемыми реологическими характеристиками. Достижимый эффект проявляется и при использовании регенерированных компонентов, что позволяет получать полноценные материалы для изделий различного функционального назначения.

**В пятой главе** диссертации рассмотрены особенности структуры, деформационно-прочностных, адгезионных и триботехнических характеристик смесевых композитов, полученных по различным технологиям совмещения.

Исследованы триботехнические и защитные характеристики ротапечных фторсодержащих покрытий толщиной 5–10 мкм, сформированных на компонентах металлополимерных систем. Установлено, что наличие олигомерной составляющей в композиционном покрытии из УПТФЭ обеспечивает необходимый уровень адгезии покрытия и его способность к передеформированию, уменьшающие интенсивность коррозионно-механического изнашивания металлополимерной системы. В зоне трения формируется разделительный слой со свойствами знакопеременного переноса, который по эффективности противоизносного действия превосходит действие тонких пленок фторсодержащих олигомеров «Фолеокс», слоев фосфатов металлов, нитрида титана. Зависимость относительной величины перенесенного слоя  $W$  от числа циклов  $n$  в различных трибосистемах представлена на рисунке 4. Образующиеся продукты изнашивания закрепляются

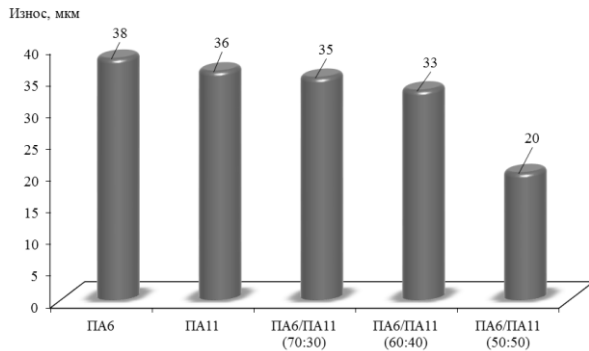


**Рисунок 4.** – Кинетика переноса при трении графитового образца по контртелу из стали 45 исходной (1), фосфатированной (2), с подслоем из олигомера Ф-1 (3), с ротапечным подслоем УПТФЭ (4)

благодаря олигомерной составляющей в зоне трения, реализуя принцип функционирования малоизнашивающейся металлополимерной системы (МИМС). Полимер-олигомерные композиты на основе УПТФЭ эффективны при применении в качестве ротапечных покрытий шлицевых соединений карданных валов (ОАО «Белкард») и уплотнительных узлов запорной и регулирующей арматуры (УП «Цветлит»).

Разработаны составы композиционных материалов на основе смесей алифатических полиамидов (ПА 6.6, ПА 6, ПА 12) и (ПА 6, ПА 11), которые использованы в качестве конструкционных и триботехнических материалов для узлов трения автокомпонентов и технологического оборудования повышенного ресурса. Легирование базовых термопластов (ПА 6.6, ПА 6) термодинамически совместимыми компонентами (ПА 12) в сочетании с наноразмерными частицами обеспечивает повышение параметров деформационно-прочностных характеристик (таблица). При этом, варьируя содержанием модифицирующего полиамида, удается управлять параметрами реологических характеристик и гидрофобности. Важным эксплуатационным параметром разработанных составов конструкционных материалов на основе смесей полиамидов является повышенная стойкость к воздействию термоокислительных сред, обусловленная действием

наноразмерных частиц в качестве нецепного стабилизатора. После экспозиции при 423 К в течение 150–300 ч потери прочности ( $\sigma_p$ ) композитов не превышали 25–30 % при 50–70 % потерях, характерных для базовых (ПА 6, ПА 6.6) и совмещенных матриц (ПА 6.6, ПА 6, ПА 12). Для формирования триботехнических покрытий наиболее эффективны композиты на основе ПА 6.6, модифицированного ПА 11. При оптимальном сочетании компонентов ПА 6/ПА 11 (60 : 40–50 : 50) достигается увеличение параметра износостойкости в 1,15–1,9 раз покрытий (рисунок 5), сформированных методом псевдооживленного слоя из порошкообразных компонентов с размерами частиц до 150 мкм, при низких значениях коэффициента трения в диапазоне 0,20–0,25 при исходных значениях, характерных для ПА 6, 0,40–0,42.



**Рисунок 5. – Величина износа покрытий из полиамидов**

Совместимость матричного (ПА 6) и легирующего (ПА 11) компонентов приводит к формированию гетерофазной структуры, реализующей синергический эффект, проявляющийся в сочетании необходимой адгезионной

прочности покрытия на подложках из углеродистых и легированных сталей (сталь 45, ХГНТР) (балл адгезии 1), высоких защитных характеристик и повышенной гидрофобности, характеризуемой значением коэффициента растекания жидкофазной среды.

Разработанные составы композиционных материалов на основе отечественного полиамида (ПА 6, ПА 6.6) являются полноценной альтернативой применяемым покрытиям из импортного аналога ПА 11 и имеют существенно более низкую стоимость при использовании отечественного технологического оборудования для получения порошкообразных полуфабрикатов и формирования покрытий.

Разработанные составы композиционных материалов на основе регенированных полиолефинов (ПП, ПЭНД, ПЭВД), производимых ОАО «Белвторполимер», по параметрам деформационно-прочностных характеристик не уступают первичным материалам (ПП «Ставролен») при более высокой ударной вязкости и морозостойкости (243–233 К). Разработанные составы композитов на основе термомеханически совмещенных полиолефинов использованы для изготовления методом экструзии или литья трубных заготовок для обечаек металлополимерных роlikоопор ленточных конвейеров, используемых на ОАО «Беларуськалий», ОАО «Гродно Азот» и элементов для обозначения подземных коммуникаций, выпускаемых ОАО «Белвторполимер».

Совместно с ЗАО «СИПР с ОП» разработана нормативная и техническая документация, регламентирующая процессы изготовления и применения метал-

лополимерных роликоопор ленточных конвейеров. Осуществлен выпуск опытной партии металлополимерных роликоопор ленточных конвейеров с комплектующими элементами (корпусом подшипника, обечайкой) из композитов на основе совмещенных полиамидов (ПА 6, ПА 6.6) и полиолефинов (ПП, ПЭНД). Испытания опытной партии металлополимерных роликоопор в технологическом оборудовании, применяемом на ОАО «Беларуськалий», показали эффективность их применения взамен металлических роликоопор из трубного проката вследствие повышенной стойкости к воздействию коррозионно-активных сред и коррозионно-механическому изнашиванию.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### **Основные научные результаты диссертации.**

Проведены исследования особенностей структуры и эксплуатационных характеристик композиционных материалов на основе смесей термопластичных полимерных и олигомерных компонентов, полученных различными технологиями совмещения. Разработаны составы композиционных материалов на основе смесей алифатических полиамидов (ПА 6, ПА 6.6, ПА 12, ПА 11), полиолефинов (ПП, ПЭНД, ПЭВД) и фторсодержащих соединений (УПТФЭ, ПТФЭ) с повышенными параметрами деформационно-прочностных, адгезионных, триботехнических характеристик для изготовления изделий и покрытий для технологического оборудования, автокомпонентов, запорной и регулирующей арматуры.

1) Исследованы особенности структуры, строения и состава продуктов термической обработки блочного политетрафторэтилена (ПТФЭ) в защитной среде в диапазоне температур 623–673 К. Методами ДТА, ИК-спектроскопии, АСМ и РЭМ установлено наличие в продуктах термообработки (УПТФЭ) олигомерных и полимерных составляющих, образующих полифракционную смесь продуктов абляции и рекомбинации газообразных фракций термодеструкции блочного полуфабриката ПТФЭ. Полимер-олигомерные смеси продуктов термообработки политетрафторэтилена обладают способностью к многократному передеформированию без разрушения и сублимации олигомерных фракций и могут быть использованы в качестве компонентов триботехнических материалов и покрытий и процессинговых добавок при переработке смесевых композитов на основе термопластичных первичных и регенерированных (ПА 6, ПА 6.6, ПЭТФ, ПБТФ, ПП, ПЭНД) матриц в изделия [1–5, 8–16, 18, 22–27, 30, 35–41, 43–48, 52, 55].

Исследованы триботехнические и защитные характеристики ротапринтных покрытий на элементах металлополимерных трибосистем с поступательным и реверсивным характером движения, сформированных из смесей фторсодержащих олигомерных и полимерных компонентов («Фолеокс», Ф–1, Ф–14, УПТФЭ) при толщине 5–10 мкм. Установлен эффект увеличения в 1,3–1,5 раза износостойкости узлов трения запорной и регулирующей арматуры и шлицевых соединений

карданных валов грузовых автомобилей с реверсивным характером движения вследствие способности олигомерного компонента смеси к многоцикловому передеформированию и формированию слоев со способностью к знакопеременному переносу. Олигомерный компонент полимер-олигомерной смеси фторсодержащих продуктов термической обработки ПТФЭ (УПТФЭ) формирует на поверхности элементов металлополимерных систем защитный слой с высокой адгезией, увеличивающей в 1,5–2,0 раза стойкость к воздействию коррозионно-активных сред при повышенных температурах (323–343 К) [2, 9, 10–16, 22–27, 30, 35, 36, 39–41, 43–48, 52].

2) Исследованы особенности структуры параметров деформационно-прочностных и триботехнических характеристик композиционных материалов, полученных по технологиям термомеханического совмещения в двухшнековом смесителе, переработки в термопластавтомате со шнековым пластикатором и осаждением порошкообразных фракций с последующей термообработкой при температурах плавления гранулированных и порошкообразных термопластичных компонентов с близким составом и строением молекулярной цепи класса полиамидов (ПА 6, ПА 6.6, ПА 12, ПА 11) и полиолефинов (ПП, ПЭНД, ПЭВД). Методами ИК-спектроскопии, ДТА, АСМ, РЭМ установлено, что в смесях гомологов, различающихся теплофизическими и реологическими характеристиками, в отличие от смесей термодинамически несовместимых полимеров (ПА 6 – ПЭТФ, ПА 6 – ПБТФ, ПА 6 – ПЭНД) формируется гетерофазная структура с повышенной гомогенностью и прочностью вследствие формирования малодефектных переходных слоев в результате взаимодиффузии макромолекул. При модифицировании смесей наноразмерными частицами углеродсодержащих соединений (КГП С–1, УНТ, шихта) в количестве 0,01–1,00 мас. % формирование граничных слоев интенсифицируется вследствие образования физических адсорбционных связей между макромолекулами совмещенных компонентов [6, 7, 17, 21, 31–34, 42, 56].

3) Экспериментально установлен эффект нецепной стабилизации композиционных материалов на основе термомеханически совмещенных смесей термопластичных полимеров (ПА 6, ПА 6.6, ПА 12) при их модифицировании наноразмерными частицами углеродсодержащих компонентов (КГП С–1, шихта, УНТ) при содержании 0,01–1,00 мас. %, обусловленный образованием адсорбционных физических связей, проявляющийся в повышении параметров прочности ( $\sigma_p$ ) в 1,5–2,0 раза по сравнению с базовыми связующими при экспозиции в термоокислительной среде при 423 К в течение 100–1000 ч [6, 53, 54].

4) На основании модельных представлений, учитывающих особенности эксплуатации металлополимерных конструкций (шлицевого соединения карданного вала, металлополимерной роликоопоры ленточного конвейера) с применением программных продуктов трехмерного моделирования и инженерного анализа Pro/ENGINEER Wildfire 5.0 Mechanical, SolidWorks Simulation 2014, прикладной программы конечно-элементного анализа LS-DYNA проведен оценочный



анализ напряженно-деформированного состояния при статическом и динамическом режимах в диапазоне нагрузок 10–50 МПа и скоростью движения 0,1–1,0 м/с. Определены базовые параметры деформационно-прочностных характеристик композиционных материалов, необходимые для обеспечения эффективной эксплуатации металлополимерных конструкций в реальных условиях применения [19–21, 28, 29, 49].

Разработаны составы конструкционных и триботехнических материалов на основе смесей первичных и регенерированных термопластов класса полиамидов (ПА 6, ПА 6.6, ПА 12), полиэфигов (ПЭТФ, ПБТФ) и полиолефинов (ПП, ПЭНД, ТЭП), содержащие наноразмерные частицы углерод- (КГП С–1, шихта, УНТ), силикат- (слюда, тальк), металлсодержащих (медь) модификаторов при допинговых (0,01–1,00 мас. %) концентрациях с параметрами деформационно-прочностных характеристик в 1,1–1,2 раза, превышающими параметры базовых термопластов. Разработанные составы смесевых композитов эффективны для изготовления конструкционных элементов металлополимерных ленточных конвейеров, применяемых в различных областях промышленности [1, 3–8, 15, 17, 18, 21, 31–34, 37, 38, 42, 44, 50, 51, 53, 54].

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

Композиционные смесевые материалы на основе алифатических полиамидов (ПА 6, ПА 6.6, ПА 12), полиэфигов и полиамидов (ПЭТФ, ПБТФ, ПА 6) как первичных, так и регенерированных целесообразно использовать для изготовления корпусных деталей металлополимерных роlikоопор ленточных конвейеров, применяемых предприятиях химической (ОАО «Гродно Азот»), строительной (ОАО «Гродненский КСМ», ОАО «Красносельскстройматериалы»), пищевой (ОАО «Скидельский сахарный завод») промышленности. Обечайка роlikоопор ленточных конвейеров, эксплуатируемых при воздействии агрессивных и абразивных сред, изготовленная из термодинамически совмещенных смесей регенерированных полиолефинов (ПП, ПЭНД, ПЭВД, ТПУ), обеспечивает в 1,2–1,3 раза увеличение ресурса по сравнению с металлической, изготовленной из трубного проката.

Триботехнические покрытия на основе совмещенных полиамидов (ПА 6, ПА 11) являются полноценной альтернативой импортному аналогу («Rilsan») при существенно более низкой стоимости и эффективны в конструкциях карданных валов грузовых автомобилей (ОАО «Белкард»).

Полимер-олигомерные смеси фторсодержащих компонентов на основе УПТФЭ эффективны при использовании в качестве процессинговой добавки при получении заготовок из политетрафторэтилена (ПТФЭ) и композиций на его основе, обеспечивая увеличение в 1,10–1,15 раз параметров прочности ( $\sigma_p$ ) и износостойкости. Введение в состав смесей регенерированных полиолефинов (ПП, ПЭВД) 0,5–10,0 мас. % УПТФЭ стабилизирует процесс экструзии трубных заго-

товок для обечаек роликоопор ленточных конвейеров. Смеси фторсодержащих компонентов (УПТФЭ, «Фолеокс») эффективны для снижения интенсивности коррозионно-механического изнашивания узлов трения запорной и регулирующей арматуры (УП «Цветлит»), герметизирующих и триботехнических сопряжений автокомпонентов (ОАО «Белкард»).

Разработана нормативная правовая документация, регламентирующая процессы изготовления композиционных материалов на основе смесей термопластичных компонентов и применения изделий и покрытий из них в конструкциях автомобильных агрегатов (карданных валов, тормозных камер), ленточных конвейеров (металлополимерные роликоопоры) – ТУ ВУ 50005585–001–2010. Осуществлен выпуск опытной партии карданных валов грузовых автомобилей (2 624 штук) и металлополимерных роликоопор ленточных конвейеров. Получен акт промышленного использования научно-технической разработки на ОАО «Белкард» (акт от 14.12.2012), представляющей собой композиционный триботехнический материал для нанесения функциональных покрытий на рабочие поверхности шлицевых втулок карданных валов. Результаты диссертационных исследований использованы в учебном процессе в рамках дисциплины «Триботехнические и композиционные материалы» (акт внедрения от 22.11.2016). Подготовлены две заявки на выдачу патента Республики Беларусь на изобретение.

## **СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ**

### **Монографии**

1. Авдейчик, С. В. Фактор наносостояния в материаловедении полимерных нанокомпозитов / С. В. Авдейчик, В. А. Струк, А. С. Антонов. – Saarbrücken : LAP LAMBERT Acad. Publ., 2017. – 468 с.

### **Статьи в научных изданиях,**

#### **соответствующих п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь**

2. Механизмы формирования ингибиторов изнашивания из фторсодержащих компонентов / Е. В. Овчинников, С. В. Авдейчик, А. С. Антонов, Ю. В. Мишук // Гор. механика и машиностроение. – 2015. – № 3. – С. 68–80.

3. Композиционные материалы на основе смесей термопластов / А. С. Антонов, М. В. Ищенко, А. Н. Бурцев, В. А. Струк // Гор. механика и машиностроение. – 2016. – № 3. – С. 48–56.

4. Структурный фактор технологии смесевых композитов / А. С. Антонов, С. В. Авдейчик, В. А. Струк, А. А. Абдуразаков // Гор. механика и машиностроение. – 2017. – № 1. – С. 65–75.

5. Методология выбора функциональных модификаторов для композитов на основе высокомолекулярных матриц / С. В. Авдейчик, В. Г. Сорокин, В. А. Струк, А. С. Антонов, А. Г. Икромов, А. А. Абдуразаков // Гор. механика и машиностроение. – 2017. – № 1. – С. 76–95.

6. Реализация принципа многоуровневого модифицирования в материаловедении и технологии полимерных композитов / С. В. Авдейчик, А. С. Антонов, В. А. Струк, А. С. Воронцов // Гор. механика и машиностроение. – 2017. – № 3. – С. 72–86.

7. Nanocomposite materials based on thermoplastic blends for the technological equipment with a long service life / A. Antonov, S. Avdeychik, V. Sarokin, V. Struk, A. Vorontsov, L. Mikhailova // Nonequilibrium phase transformations: Material science. – 2017. – Iss. 3. – P. 92–94.

### Статьи в других научных журналах

8. Триботехнические покрытия для узлов трения различных агрегатов / В. Я. Щерба, А. С. Антонов, В. А. Струк, Е. В. Овчинников, С. В. Гусев, В. А. Овсянко // Гор. механика. – 2008. – № 2. – С. 31–40.

9. Триботехнические композиции на основе олигомер-полимерных фторсодержащих матриц / А. К. Цветников, В. А. Струк, Е. В. Овчинников, А. С. Антонов, П. И. Заяш // Гор. механика. – 2008. – № 3. – С. 76–81.

10. Антонов, А. С. Структура защитных тонкопленочных покрытий из фторсодержащих компонентов / А. С. Антонов, В. В. Андрикевич, А. А. Рыскулов // Инженер. вестн. – 2009. – № 2. – С. 27–32.

11. Механохимические аспекты технологии фторпластовых композитов / А. С. Антонов, С. В. Авдейчик, Г. Н. Горбацевич, В. В. Воропаев, Л. В. Михайлова // Инженер. вестн. – 2009. – № 2. – С. 20–26.

12. Особенности структуры и триботехнических свойств наноразмерных частиц политетрафторэтилена / А. К. Цветников, В. А. Струк, В. В. Андрикевич, А. С. Антонов // Инженер. вестн. – 2009. – № 2. – С. 145–148.

13. Механохимические аспекты технологии формирования и применения фторопластовых композитов / В. А. Струк, А. К. Цветников, А. С. Антонов, С. В. Авдейчик, Е. В. Овчинников, Г. Н. Горбацевич, В. Я. Щерба // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2009. – № 3. – С. 28–35.

14. Механизм формирования перенесенных слоев из фторкомпонетов в статических и динамических сопряжениях / А. С. Антонов, П. И. Заяш, В. В. Андрикевич, Е. В. Овчинников, А. А. Рыскулов, В. В. Лышов // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, выліч. тэхніка і ўпр. Біялогія. – 2010. – № 1. – С. 53–58.

15. Структура и технология триботехнических покрытий на деталях трения металлополимерных систем / В. А. Струк, Е. В. Овчинников, Е. И. Эйсымонт,

Д. А. Прушак, А. С. Антонов, В. И. Кравченко // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та. Сер. 6, Тэхніка. – 2011. – № 1. – С. 62–68.

16. Методы модифицирования резинотехнических изделий триботехнического назначения / В. Д. Полоник, Е. В. Овчинников, В. Я. Щерба, Е. П. Усс, А. С. Антонов // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та. Сер. 6, Тэхніка. – 2013. – № 2. – С. 93–105.

17. Антонов, А. С. Влияние наполнителей на триботехнические свойства смесевых композиций на основе термопластов / А. С. Антонов, Г. С. Кондрашова, А. А. Скаскевич // Весн. Гродзен. дзярж. ун-та. Сер. 6, Тэхніка. – 2013. – № 4. – С. 36–42.

18. Особенности реализации наноразмерности в композитах на основе полимерной матрицы / С. В. Авдейчик, В. А. Струк, В. Г. Сорокин, А. С. Антонов // Наноматериалы и наноструктуры – XXI век. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 37–44.

### **Материалы научных конференций**

19. Оптимизация конструкции шарнирного узла карданной передачи / А. С. Антонов, Д. С. Антонов, А. С. Воронцов, К. В. Кравченко // Экологические и ресурсосберегающие технологии промышленного производства : сб. ст. междунар. науч.-техн. конф., Витебск, 24–25 окт. 2006 г. / Витеб. гос. технол. ун-т ; редкол.: П. А. Витязь [и др.]. – Витебск, 2006. – С. 71–73.

20. Антонов, А. С. Использование сквозных компьютерных технологий проектирования для оптимизации конструкции карданного вала / А. С. Антонов, А. В. Паньков, К. В. Кравченко // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях : материалы 7-ой ежегод. междунар. пром. конф., Славское, 12–16 февр. 2007 г. / Наука. Техника. Технология ; под ред. З. Ю. Главацкой. – Киев, 2007. – С. 255–258.

21. Триботехнические покрытия для узлов трения автомобильных агрегатов / А. С. Антонов, В. А. Струк, Е. В. Овчинников, Г. А. Костюкович, С. В. Гусев, В. А. Овсянко // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях : материалы 8-ой ежегод. междунар. пром. конф., Славское, 11–15 февр. 2008 г. / Наука. Техника. Технология ; под ред. З. Ю. Главацкой. – Киев, 2008. – С. 19–22.

22. Олигомер-полимерные композиции на основе фторсодержащих материалов / А. К. Цветников, В. А. Струк, Е. В. Овчинников, А. С. Антонов, Г. А. Костюкович // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях : материалы 8-ой ежегод. междунар. пром. конф., Славское, 11–15 февр. 2008 г. / Наука. Техника. Технология ; под ред. З. Ю. Главацкой. – Киев, 2008. – С. 22–26.

23. Механохимические аспекты технологии формирования и применения фторпластовых композитов / В. А. Струк, А. К. Цветников, А. С. Антонов, В. И. Кравченко, С. В. Авдейчик, Е. В. Овчинников, Г. Н. Горбацевич // Машино-

строение и техносфера XXI века : сб. тр. XV Междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 15–20 сент. 2008 г. : в 3 т. / Донец. нац. техн. ун-т ; редкол.: А. Н. Михайлов [и др.]. – Донецк, 2008. – Т. 3. – С. 195–202.

24. Структурные особенности полимер-олигомерных пленок, сформированных из фторсодержащих наночастиц / П. И. Заяш, А. С. Антонов, В. В. Андрикевич, Е. В. Овчинников, Г. А. Костюкович // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях : материалы 9-ой ежегод. междунар. пром. конф., Славское, 9–13 февр. 2009 г. / Наука. Техника. Технология ; под ред. З. Ю. Главацкой. – Киев, 2009. – С. 22–26.

25. Механизм формирования перенесенных слоев из фторкомпонентов в статических и динамических сопряжениях / А. С. Антонов, П. И. Заяш, В. В. Андрикевич, Е. В. Овчинников, А. А. Рыскулов, В. В. Лышов // Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях : материалы 9-ой ежегод. междунар. пром. конф., Славское, 9–13 февр. 2009 г. / Наука. Техника. Технология ; под ред. З. Ю. Главацкой. – Киев, 2009. – С. 287–294.

26. Технология фторпластовых композитов для узлов трения автотракторной техники / В. В. Андрикевич, А. В. Балеико, А. С. Антонов, Е. В. Овчинников, В. А. Струк // Тракторы, автомобили, мобильные энергетические средства: проблемы и перспективы развития : докл. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 80-летию со дня рождения В. А. Скотникова, Минск, 11–14 февр. 2009 г. / Белорус. гос. аграр. техн. ун-т ; редкол.: А. В. Кузьмицкий [и др.]. – Минск, 2009. – С. 356–361.

27. Nanocomposite functional material on base thermoplastic matrixes / A. S. Antonov, V. V. Voropaev, V. A. Struk, V. G. Sorokin // *Mechanica – 2009 : proc. of the 14th Intern. conf.*, Kaunas, 2–3 Apr. 2009 / Univ. of Technology. – Kaunas, 2009. – P. 19–22.

28. Антонов, А. С. CALS-технологии в жизненном цикле карданного вала с повышенным эксплуатационным ресурсом / А. С. Антонов // Промышленность региона: проблемы и перспективы инновационного развития : материалы Респ. науч.-техн. конф., Гродно, 19–20 мая 2011 г. / Гродн. гос. ун-т ; редкол.: В. А. Струк (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2011. – С. 187–191.

29. Адекватность результатов виртуальных и стендовых испытаний технических объектов / А. С. Антонов, А. В. Быков, В. А. Струк, Е. В. Овчинников, В. И. Кравченко // Стохастическое и компьютерное моделирование систем и процессов : сб. науч. ст. / Гродн. гос. ун-т ; редкол.: Л. В. Рудикова (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2011. – С. 13–17.

30. Методы повышения износостойкости деталей узла привода токарного патрона / В. В. Гаврилова, Е. Т. Горячева, А. А. Скаскевич, А. С. Антонов, С. А. Плескач // Промышленность региона: проблемы и перспективы инноваци-

онного развития : материалы III Респ. науч.-техн. конф., Гродно, 16–17 мая 2013 г. / Гродн. гос. ун-т ; редкол.: В. А. Струк (гл. ред.) [и др.]. – Гродно, 2013. – С. 83–85.

31. Антонов, А. С. Разработка составов и технологий смесевых композиций на основе алифатических полиамидов для функциональных покрытий трибонезов / А. С. Антонов, А. С. Воронцов, М. А. Копть // Научные стремления – 2015 : сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. молодеж. конф., Минск, 25–27 марта 2015 г. : в 3 ч. / Центр молодеж. инноваций, ООО «Лаборатория интеллекта» ; ред. группа: Ю. М. Сафонова [и др.]. – Минск, 2015. – Ч. 2 : Естественные науки: Аграрные науки. Биологические науки. Химические науки и науки о земле. Медицинские науки. Физико-технические науки. Физико-математические науки. Информационные технологии. – С. 104–107.

32. Использование полимерных покрытий на основе полиамидов в энергоаккумуляторах тормозных камер / А. С. Воронцов, А. С. Антонов, П. Л. Коленко, А. В. Ситак // Научные стремления – 2015 : сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. молодеж. конф., Минск, 25–27 марта 2015 г. : в 3 ч. / Центр молодеж. инноваций, ООО «Лаборатория интеллекта» ; ред. группа: Ю. М. Сафонова [и др.]. – Минск, 2015. – Ч. 2 : Естественные науки: Аграрные науки. Биологические науки. Химические науки и науки о земле. Медицинские науки. Физико-технические науки. Физико-математические науки. Информационные технологии. – С. 131–134.

33. Исследование влияния фазового состава на свойства композиционных материалов на основе смесевых полимер-полимерных систем / А. С. Антонов, А. С. Воронцов, В. Ю. Яроцкий, М. А. Копть // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 23–24 апр. 2015 г. / Гомел. гос. техн. ун-т ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2015. – С. 91–94.

34. Антонов, А. С. Составы композиционных материалов на основе модифицированных полиамидов для функциональных покрытий деталей узлов трения / А. С. Антонов, А. С. Воронцов, О. С. Валюкевич // Исследования и разработки в области машиностроения, энергетики и управления : материалы XV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, Гомель, 23–24 апр. 2015 г. / Гомел. гос. техн. ун-т ; под общ. ред. А. А. Бойко. – Гомель, 2015. – С. 94–97.

35. Mechanisms for the formation of anti-based coatings fluorinated polymer-oligomeric compositions / Y. Auchynnika, S. Avdeychik, A. Antonov, A. Skaskevich, V. Krauchanka // Mechanika – 2015 : proc. of the 20th Intern. scientific conf., Kaunas, 23–24 Apr. 2015 / Kaunas Univ. of Technology. – Kaunas, 2015. – P. 23–27.

36. Kinetics and formation mechanisms of nanocomposite wear inhibitors of metal-polymer systems / A. Antonov, S. Avdeychik, A. Vorontsov, G. Yuldasheva //

NDTCS'2015 : proc. of 16th Intern. workshop on new approaches to high-tech: nano-design, technology, computer simulations, Grodno, 22–25 Sept. 2015 / State Univ. of Grodno. – Grodno, 2015. – P. 104–107.

37. Методологические подходы к оптимальному выбору дисперсных модификаторов высокомолекулярных матриц / А. С. Антонов, А. С. Воронцов, С. В. Авдейчик, В. Г. Сорокин, В. А. Струк // Новые горизонты – 2015 : сб. материалов Белорус.-Кит. молодеж. инновац. форума, Минск, 26–27 нояб. 2015 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2015. – С. 180–182.

38. Энергетический фактор оценки активности модифицирующего действия дисперсных частиц при создании композитов на основе термопластов / С. В. Авдейчик, В. Г. Сорокин, А. С. Антонов, А. С. Воронцов // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения : материалы Междунар. науч.-техн. конф. «INTERMATIC – 2015», Москва, 1–5 дек. 2015 г., [и VII Всерос. науч.-техн. шк.-конф. молодых ученых, Москва, 2–5 дек. 2015 г.] : в 5 ч. / Рос. акад. Наук ; под ред. А. С. Сигова. – М., 2015. – Ч. 2. – С. 115–118.

39. Формирование высокопрочных триботехнических материалов на основе политетрафторэтилена / А. С. Антонов, А. С. Воронцов, С. В. Авдейчик, В. В. Гаврилова // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения : материалы Междунар. науч.-техн. конф. «INTERMATIC – 2015», Москва, 1–5 дек. 2015 г., [и VII Всерос. науч.-техн. шк.-конф. молодых ученых, Москва, 2–5 дек. 2015 г.] : в 5 ч. / Рос. акад. наук ; под ред. А. С. Сигова. – М., 2015. – Ч. 2. – С. 153–156.

40. Formation thin-film coatings for little wears metal-polymer systems / A. Antonov, A. Varantsou, S. Avdeychik, V. Struk, V. Sarokin // *Mechanika – 2016* : proc. of the 21th Intern. conf., Kaunas, 12–24 May 2016 / Kaunas Univ. of Technology. – Kaunas, 2016. – P. 9–11.

41. Thin film coatings for low wear metal-polymer systems / A. Antonov, A. Varantsou, Y. Auchynnika, S. Avdeychik, A. Abdurazakov // *Innovations in engineering – 2016* : proc. of the 2nd Intern. scientific congr., Varna, 2016 / Sci. Techn. Union of Mech. Eng. – Sofia, 2016. – P. 77–78.

42. Антонов, А. С. Структурные превращения в расплавах диэлектрических материалов / А. С. Антонов, В. А. Струк, Л. В. Михайлова // *Физика диэлектриков (Диэлектрики–2017)* : материалы XIV междунар. конф., Санкт-Петербург, 29 мая – 2 июня 2017 г. : в 2 т. / Рос. акад. наук [и др.] ; редкол.: Ю. А. Гороховатский (отв. ред.) [и др.]. – СПб., 2017. – Т. 2. – С. 14–16.

#### Тезисы докладов

43. Структура и триботехнические свойства полимер-олигомерных фторсодержащих продуктов / А. С. Антонов, В. А. Струк, А. В. Балейко, Е. В. Овчинников, А. К. Цветников // *Фторполимерные материалы. Научно-технические,*

производственные и коммерческие аспекты : Первая Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием : тез. докл. – Кирово-Чепецк, 2008. – С. 70.

44. Нанокomпозиционные материалы на основе полимерных матриц для узлов трения / С. В. Авдейчик, А. С. Антонов, А. В. Балейко, В. А. Струк // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 17–18 апр. 2008 г. : в 3 ч. / Беларус.-Рос. ун-т ; редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев, 2008. – Ч. 2. – С. 3–4.

45. Пильчук, В. В. Триботехнические покрытия на основе алифатических полиамидов, модифицированных наноразмерными полимер-олигомерными частицами / В. В. Пильчук, А. С. Антонов // Физика конденсированного состояния : XVI Респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 23–25 апр. 2008 г. : тез. докл. : в 2 ч. / Гродн. гос. ун-т ; редкол.: Е. А. Ровба (отв. ред.) [и др.]. – Гродно, 2008. – Ч. 2. – С. 173–174.

46. Ключникова, А. И. Композиционные смазочные материалы, модифицированные полимер-олигомерными фторсодержащими компонентами / А. И. Ключникова, А. С. Антонов, Л. Г. Мартынова // Физика конденсированного состояния : XVI Респ. науч. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 23–25 апр. 2008 г. : тез. докл. : в 2 ч. / Гродн. гос. ун-т ; редкол.: Е. А. Ровба (отв. ред.) [и др.]. – Гродно, 2008. – Ч. 2. – С. 123–125.

47. Овчинников, Е. В. Механизмы противоизносного действия фторсодержащих полимер-олигомерных компонентов / Е. В. Овчинников, А. С. Антонов, В. И. Кравченко // Полимерные композиты и трибология (ПОЛИКОМТРИБ – 2009) : междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 22–25 июня 2009 г. : тез. докл. : посвящ. 50-летию Ин-та механики металлополимер. Систем / НАН Беларуси [и др.] ; редкол.: В. Н. Адериha [и др.]. – Гомель, 2009. – С. 169–170.

48. Structure of nanophase thin-film coatings based on fluorine-containing components / E. V. Ovchinnikov, A. A. Ryskulov, A. N. Antanovich, A. S. Antonov, V. I. Kravchenko // Mechanics of composite materials : 16th Intern. conf., Riga, 24–28 May 2010 : book of abstr. / Inst. Mehaniki Polimerov. – Riga, 2010. – P. 147.

49. Реализация CALS-технологий в решении задач создания оптимизированных конструкций машиностроительных изделий на базе высокопроизводительных кластерных систем / А. С. Антонов, А. С. Воронцов, Е. И. Эйсымонт, Е. Т. Горячева // Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук : тр. 53-й науч. конф. МФТИ, Москва, 24–27 нояб. 2010 г. : в 12 ч. / Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) [и др. ] ; сост.: С. О. Рускин ; ред.: В. А. Дружинина [и др.]. – М., 2010. – Ч. 9. – С. 44–45.

50. Антонов, А. С. Нанокomпозиционные материалы на основе смесей термопластов, применяемые при производстве машиностроительной продукции и автокомпонентов / А. С. Антонов, В. А. Струк, А. С. Воронцов // Инновационные решения проблем экономики знаний Беларуси и Казахстана : сб. материалов



науч.-практ. конф., Минск, 13 окт. 2016 г. / Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2016. – С. 86–87.

51. Феномен наносостояния дисперсных частиц конденсированных сред / В. А. Струк, Г. Б. Юлдашева, А. С. Антонов, С. В. Авдейчик, Е. И. Эйсымонт // Современные проблемы науки о полимерах : сб. тез. междунар. конф., Ташкент, 14 нояб. 2016 г. / Нац. ун-т Узбекистана [и др.]. – Ташкент, 2016. – С. 9–11.

52. Структура нанокпозиционных материалов на основе политетрафторэтилена / А. С. Антонов, С. В. Авдейчик, В. А. Струк, А. А. Абдуразаков // Современные проблемы науки о полимерах : сб. тез. междунар. конф., Ташкент, 14 нояб. 2016 г. / Нац. ун-т Узбекистана [и др.]. – Ташкент, 2016. – С. 125–128.

53. Морфологический фактор наносостояния дисперсных частиц конденсированных сред / С. В. Авдейчик, А. С. Антонов, В. А. Струк, А. С. Воронцов // Scanning probe microscopy : abstr. book of Intern. conf., Ekaterinburg, 28–30 Aug. 2017 / Ural Federal Univ. – Ekaterinburg, 2017. – С. 153–154.

54. Антонов, А. С. Фазовая структура смесевых композитов, полученных совмещением термопластичных компонентов / А. С. Антонов, С. В. Авдейчик, В. А. Струк // Scanning probe microscopy : abstr. book of Intern. conf., Ekaterinburg, 28–30 Aug. 2017 / Ural Federal Univ. – Ekaterinburg, 2017. – С. 155–156.

### **Заявки на изобретения**

55. Способ нанесения триботехнических покрытий из полимерных материалов: заявка ВУ а 20160409 / А. С. Антонов, В. А. Струк, С. В. Авдейчик, А. С. Воронцов. – Оpubл. 14.11.2016.

56. Способ получения наномодификатора для полимерных материалов: заявка ВУ а 20160410 / А. С. Антонов, В. А. Струк, С. В. Авдейчик, А. С. Воронцов. – Оpubл. 14.11.2016.

Композиционные материалы на основе смесей термопластов для повышения эксплуатационного ресурса элементов технологического оборудования

**Ключевые слова:** смеси термопластов, термодинамическая совместимость, наноразмерные модификаторы, композиционные материалы.

**Цель работы:** разработка составов конструкционных и триботехнических материалов на основе смесей термопластов для конструкций технологического оборудования и автокомпонентов повышенного ресурса.

**Методы исследования:** ИК-спектроскопия, растровая электронная, атомная силовая, оптическая микроскопии, ДТА, ТСТ-анализ, рентгеноструктурный анализ, методы определения параметров деформационно-прочностных, адгезионных и триботехнических характеристик.

**Полученные результаты и их новизна.** Исследованы особенности структуры композитов, полученных совмещением термопластичных компонентов класса полиамидов (ПА 6, ПА 6.6, ПА 11, ПА 12), полиолефинов (ПП, ПЭНД, ПЭВД) и фторсодержащих соединений (УПТФЭ, ПТФЭ). Экспериментально установлены механизмы межфазных взаимодействий в смесевых композитах, содержащих допинговые добавки (0,01–0,10 мас. %) наноразмерных углерод- и металлсодержащих соединений (КГП С–1, шихта, меди), состоящие в образовании адсорбционных межмолекулярных связей, которые приводят к повышению в 1,1–1,2 раза параметров деформационно-прочностных, в 2–3 раза адгезионных и в 1,5–2,0 раза триботехнических характеристик.

Установлено полимер-олигомерное строение смеси дисперсных продуктов термической обработки политетрафторэтилена (УПТФЭ), которое позволяет использовать их в качестве процессинговых добавок и модификаторов смесевых композиционных материалов на основе термопластов (ПТФЭ, ПА 6, ПП).

Экспериментально установлен эффект нецепной стабилизации смесевых композитов на основе термопластов при введении в состав допинговых концентраций (0,01–0,10 мас. %) наноразмерных углеродсодержащих соединений (КГП С–1, УНТ, шихта), проявляющийся в увеличении стойкости к термоокислительному старению.

**Рекомендации по использованию и область применения.** Разработанные составы композиционных материалов на основе полимер-олигомерных смесей фторсодержащих компонентов и алифатических полиамидов эффективны для использования в качестве ротапринтных покрытий узлов трения автокомпонентов и запорной арматуры (ОАО «Белкард», УП «Цветлит»). Композиционные материалы на основе смесей полиолефинов (ПП, ПЭНД, ПЭВД) и полиамидов (ПА 6, ПА 6.6, ПА 12) использованы для изготовления металлополимерных роlikоопор ленточных конвейеров (ЗАО «СИПР с ОП»), обозначающих элементов (ОАО «Белвторполимер»).

Кампазіцыйныя матэрыялы на аснове сумесяў тэрмапластаў для павышэння эксплуатацыйнага рэсурсу элементаў тэхналагічнага абсталявання

**Ключавыя словы:** сумесі тэрмапластаў, тэрмадынамічная сумяшчальнасць, нанапамерныя мадыфікатары, кампазіцыйныя матэрыялы.

**Мэта працы:** распрацоўка саставаў канструкцыйных і трыбатэхнічных матэрыялаў на аснове сумясей тэрмапластаў для канструкцый тэхналагічнага абсталявання і аўтакампанентаў павышанага рэсурсу.

**Метады даследвання:** ІЧ-спектраскапія, растрвая электронная, атамная сілавая, аптычная мікраскапія, ДТА, ТСТ-аналіз, рэнтгенаструктурны аналіз, метады даследвання параметраў дэфармацыйна-трываласных, адгезійных і трыбатэхнічных характарыстык.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Даследаваны асаблівасці структуры кампазітаў, атрыманых сумяшчэннем тэрмапластычных кампанентаў класа паліамідаў (ПА 6, ПА 6.6, ПА 11, ПА 12), паліалефінаў (ПП, ПЭНЦ, ПЭВЦ) і фторутрымліваючых злучэнняў (УПТФЭ, ПТФЭ). Эксперыментальна ўстаноўлены механізмы паміжфазных узаемадзеянняў у сумесевых кампазітах, утрымліваючых допінгавыя дабаўкі (0,01–0,10 мас. %) нанапамерных вуглярод- і металутрымліваючых злучэнняў (КГП С–1, шыхты, медзі), якія праяўляюцца ва ўтварэнні адсарбцыйных паміжмалекулярных сувязей, якія прыводзяць да павышэння ў 1,1–1,2 разы параметраў дэфармацыйна-трываласных, у 2–3 разы адгезійных і ў 1,5–2,0 разы трыбатэхнічных характарыстык.

Устаноўлена палімер-алігамерная пабудова сумесі дысперсных прадуктаў тэрмічнай апрацоўкі політэтрафторэтылену (УПТФЭ), якая дазваляе выкарыстоўваць іх у якасці працэсінгавых дабавак і мадыфікатараў сумесевых кампазіцыйных матэрыялаў на аснове тэрмапластаў (ПТФЭ, ПА 6, ПП).

Эксперыментальна ўстаноўлены эфект неланцуговай стабілізацыі сумесевых кампазітаў на аснове тэрмапластаў пры ўвядзенні ў склад допінгавых канцэнтрацый (0,01–0,10 мас. %) нанапамерных вугляродутрымліваючых злучэнняў (КГП С–1, УНТ, шыхты), які выяўляецца ў павялічэнні трываласці да тэрмаакісляльнага старэння.

**Рэкамендацыі па выкарыстанні і вобласць прымянення.** Распрацаваныя саставы кампазіцыйных матэрыялаў на аснове палімер-алігамерных сумясей фторутрымліваючых кампанентаў і аліфатычных паліамідаў эфектыўны для выкарыстання ў якасці ратапрынтных пакрыццяў вузлоў трэння аўтакампанентаў і запорнай арматуры (ААТ «Белкард», УП «Цветліт»). Кампазіцыйныя матэрыялы на аснове сумясей паліалефінаў (ПП, ПЭНЦ, ПЭВЦ) і паліамідаў (ПА 6, ПА 6.6, ПА 12) выкарыстаны для вырабу металапалімерных ролікаапор лентачных канвейераў (ЗАТ «СІПР з ВВ»), абзначальных элементаў (ААТ «Белдругпалімер»).

## SUMMARY

Antonov Aleksandr Sergeevich

Composite materials based on thermoplastic blends for increase of service life of technological equipment elements

**Key words:** thermoplastic blends, thermodynamic compatibility, nanoscale modifiers, composite materials.

**The work aim:** the development of structural and tribotechnical materials based on thermoplastic blends for the technological equipment and auto parts with high service life.

**Research methods:** IR-spectroscopy, scanning electron, atomic-force, optical microscopy, difference-thermal analysis, thermostimulated current analysis, X-ray diffraction analysis, stress-strain, adhesive and tribotechnical properties determination technique.

**The obtained results and their novelty.** The structure features of composite materials, which have been obtained by compounding of the thermoplastic materials such as polyamide (PA 6, PA 6.6, PA 11, PA 12), polyolefine (PP, LDPE, HDPE) and fluorine-containing components (UPTFE, PTFE), were investigated. The phase boundary interaction mechanisms in the blend composite materials contained “doping additives” (0.01–0.10 wt. %) of nanoscale carbon and metal-containing compounds (colloidal graphite C–1, nanotubes, copper) have been found. The point of these mechanisms is creation of the adsorption intermolecular bonds to increase stress-strain properties for 1.1–1.2 times, adhesive properties – 2–3 times and tribotechnical properties – 1.5–2.0.

It has been found that the polymer-oligomer structure of UPTFE, obtained by thermal treatment of PTFE, make it possible to use UPTFE disperse particles as the processing additive and modifiers for blend composite materials based on thermoplast (PTFE, PA 6, PP).

It has been found experimentally that injection of nanoscale carbon compounds (colloidal graphite C–1, nanotubes, charge) “doping additives” (0.01–0.10 wt. %) in to the blend composite materials is promote an effect of nonchain stabilization. This effect consists in the increase of thermo-oxidative ageing resistance.

**The recommendation for use and the field of application.** The developed mixtures of composite materials based on polymer-oligomer blends of fluorine-containing components and aliphatic polyamide are effective to use for the rotaprint coatings of auto parts and stop valve friction unit (JSC “Belcard”, UE “Zwetlit”). Composite materials based on polyolefine (PP, LDPE, HDPE) and polyamide (PA 6, PA 6.6, PA 12) blends have been used for the metal-polymer carrying roller production (CJSC “SIPRS with EP”) and posts signals (JSC “Belvtorpolymer”).

Научное издание

**Антонов Александр Сергеевич**

**КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ  
ТЕРМОПЛАСТОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО  
РЕСУРСА ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук по специальности  
05.16.09 – материаловедение (химическая промышленность)

Ответственный за выпуск *А. С. Антонов*

Подписано в печать 11.05.2018. Формат 60×84 1/16.  
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.  
Усл. печ. л. 1,5. Уч.-изд. л. 1,0.  
Тираж 60 экз. Заказ

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