

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Объект авторского права

УДК 678.029:678.046.3

ПОДОБЕД
Денис Леонидович

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНЫХ
ПОЛИОЛЕФИНОВ, ИХ СМЕСЕЙ И МОДИФИЦИРОВАННОЙ
ПОЛИДИСПЕРСНОЙ БЕНТОНитОВОЙ ГЛИНЫ

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

Минск 2026

Научная работа выполнена в государственном учреждении образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь» и государственном научном учреждении «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси».

Научный
руководитель

Шаповалов Виктор Михайлович,
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела № 1 «Композиционные материалы и рециклинг полимеров» государственного научного учреждения «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси»

Официальные
оппоненты

Неверов Александр Сергеевич,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой общетехнических и специальных дисциплин учреждения образования «Белорусский государственный университет транспорта»;
Антонов Александр Сергеевич,
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры материаловедения и ресурсосберегающих технологий учреждения образования «Гродненский государственный университет имени Янки Купалы»

Оппонирующая
организация

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

Защита состоится «6» марта 2026 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, ауд. 240, корп. 4.
E-mail: uss@belstu.by, тел.: 8-(017)-379-65-62.

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

Автореферат разослан «3» февраля 2026 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций



Е.П. Усс

ВВЕДЕНИЕ

Рост производства и потребления пластических масс обуславливает увеличение объемов полимерных отходов, что приводит к существенному ухудшению экологической обстановки. Самой крупнотоннажной разновидностью полимерных отходов являются полиолефины. Их целевой рециклинг ввиду снижения уровня физико-механических характеристик имеет объективные ограничения. Кроме того, полиолефиновые отходы, как и большинство полимеров, обладают низкой стойкостью к горению. Вместе с тем, возросшие требования промышленности к проблемам ресурсосбережения диктуют необходимость нахождения новых и совершенствования уже известных технологий рециклинга полиолефиновых отходов. В этой связи научное обоснование и техническая реализация способов улучшения свойств вторичных термопластов является актуальной научно-технической задачей полимерного материаловедения, включающей формирование композиционных систем, основанной на выборе полифункциональных модификаторов, в том числе смесей дисперсных минеральных наполнителей, способных комплексно влиять на свойства композитов. Выявление закономерностей формирования структуры и регулирование технологических и эксплуатационных свойств композиционных материалов путем сочетания вторичных полиолефинов, их смесей и активированных функциональных наполнителей, а также повышение совместимости компонентов в процессе переработки являются актуальными направлениями исследований для дальнейшей практической реализации разработок. Решение этих задач посредством создания оригинальных рецептур композитов на основе полиолефиновых отходов и комплексных добавок из ряда неорганических веществ, в том числе на сырьевой базе Республики Беларусь (например, бентонитовых глин), позволит получить значимый технический результат в виде новых материалов с заданными характеристиками. Это внесет вклад в решение проблем ресурсосбережения, охраны окружающей среды и повышения безопасности жизнедеятельности человека.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами. Диссертационная работа выполнена в государственном учреждении образования «Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь» и государственном научном учреждении «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси» в рамках ряда НИР: задание 6.01 «Разработка новых методов физического модифицирования терморектопластов и их смесей активными комби-

нированными наполнителями для получения изделий технического назначения с повышенной прочностью, износо- и термостойкостью» (ГР № 20161511, 2016 г.) и задание 6.52 «Принципы создания композиционных материалов с применением вторичных полимеров с гибридной структурой и управляемой функциональностью модифицированных компонентов» (ГР № 20191315, 2019 г.) ГПНИ «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Полимерные материалы и технологии» на 2016–2020 годы; задание 4.2.2 «Научное обоснование технологий получения и рециклинга многофункциональных полимерных композитов со специальными свойствами на основе отечественного сырья для базовых отраслей промышленности» НИР 2 «Научные основы рециклинга термопластичных отходов и создания экологичных и утилизируемых многофункциональных полимерных композиционных материалов» ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Многофункциональные и композиционные материалы» на 2021–2025 годы (ГР № 20210293, 2021 г.); мероприятие 4 «Разработать и освоить технологию получения новых импортозамещающих и экспортноориентированных древеснополимерных композитов для изготовления изделий технического и бытового назначения» подпрограммы 2 «Освоение в производстве новых и высоких технологий» Государственной программы «Наукоемкие технологии и техника» на 2021–2025 годы (ГР № 20200242, 2021 г.).

Тематика диссертационной работы соответствует Указу Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 № 156 «О приоритетных направлениях научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы», направление № 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы: композиционные и многофункциональные материалы».

Цель, задачи, объект и предмет исследования. *Цель исследования* – создание новых рецептур композиционных материалов с повышенными эксплуатационными свойствами с использованием отходов полиолефинов, их смесей, модифицированной бентонитовой глины и функциональных добавок.

Для достижения поставленной цели определены следующие *задачи*:

- оптимизировать выбор высокодисперсной бентонитовой глины и модифицирующих добавок в композиционных системах на основе вторичных полиолефинов и их смесей, обеспечивающих повышение прочности композитов;
- разработать технологию получения высокодисперсных частиц из бентонитовой глины с их одновременным модифицированием в условиях механо-химического диспергирования;
- исследовать прочностные характеристики и структуру полученных при экструзии и литьевой переработке композиций на основе вторичных по-

лиолефинов и их смесей, наполненных высокодисперсной бентонитовой глиной и целевыми функциональными добавками;

– осуществить рецептурно-технологическое обеспечение получения разработанных композитов, провести их апробацию при изготовлении изделий технического и бытового назначения.

Объект исследования – композиционные материалы на основе полиолефиновых отходов, их смесей и высокодисперсной модифицированной бентонитовой глины с целевыми добавками в различных комбинациях.

Предмет исследования – свойства и структура композиций на основе вторичных полиолефинов, наполненных высокодисперсной бентонитовой глиной и целевыми добавками.

Научная новизна: впервые установлено, что модифицирование бентонитовой глины в присутствии специальных агентов (кремнийорганической жидкости или гудрона жирового) приводит к увеличению поверхностной активности частиц наполнителя и обеспечивает композитам на основе полиолефиновых отходов повышение в 1,5–2,0 раза прочности при растяжении за счет улучшения диспергирования наполнителя с реализацией в полимерной матрице комплексного воздействия полидисперсных частиц на структурообразование и усиления процесса кристаллизации.

Положения, выносимые на защиту.

1. Установленная эффективность поверхностного модифицирования частиц бентонитовой глины кремнийорганической жидкостью или гудроном жировым в количестве от 1,0 до 1,5 мас. % в процессе диспергирования, что позволяет управлять гидрофильно-гидрофобными свойствами поверхности частиц и получать бентонитовый наполнитель полидисперсного фракционного состава с преимущественным содержанием (53,2%) высокодисперсных частиц сферической формы с размерностью до 40 мкм.

2. Особенности реализации механо-химического диспергирования частиц бентонитовой глины путем совмещения процессов модифицирования и диспергирования с применением в качестве модификаторов ПМС-200 или гудрона жирового с оптимальными параметрами финишного измельчения в планетарной мельнице: временем измельчения – 12 мин и скоростью вращения несущего диска – 400 об/мин, что обеспечивает увеличение удельной поверхности частиц модифицированной бентонитовой глины в 1,5–2,3 раза, повышение их физико-химической активности на межфазной границе вследствие активирующего эффекта Ениколопова, снижение агломерирования частиц бентонитовой глины и более равномерное их распределение в полимерной матрице, в результате чего показатели прочности при сдвиге полиолефиновых образцов повышаются на 50,0–71,4%.

3. Закономерности изменения физико-механических свойств компози-

тов на основе смесей полиолефиновых отходов от содержания модифицированной полидисперсной бентонитовой глины, обусловленные реализацией в объеме композита усиливающего эффекта фракций наполнителя на разных масштабных уровнях и улучшением кристаллизационных процессов (на что указывает уменьшение энтальпии с 34,6 до 21,87 Дж/г), обеспечивающих рост в 1,5–2,0 раза прочности композитов при растяжении.

4. Рецептуры композиционных материалов на основе полиолефиновых отходов и их смесей с оптимальным содержанием модифицированной полидисперсной бентонитовой глины (в смесях вторичных полиэтилена высокого давления и полиэтилена низкого давления – 2,0–4,0 мас. %, вторичных полипропилена и полиэтилена высокого давления – 2,5–4,0 мас. %), стеарата кальция или стеарата цинка (0,20 мас. %) и полиэтиленового воска (0,10 мас. %), которые в условиях установленного интервала температур переработки 180–220 °С позволяют оптимизировать величину крутящего момента в пределах 11–14 Н·м и формировать стабильные показатели прочностных свойств при получении изделий технического, бытового и электротехнического назначения.

Личный вклад соискателя ученой степени заключается в поиске и анализе научно-технической литературы по теме диссертации, участии совместно с научным руководителем в постановке цели и задач исследования, планировании и проведении лабораторных экспериментов, разработке рецептурных составов композиционных материалов и их сравнительной оценке, разработке аппаратно-методического обеспечения экспериментов, обсуждении результатов исследований с формулировкой выводов, а также в апробации в промышленных условиях.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов. Основные результаты исследований доложены и обсуждены на Международных научно-практических конференциях «Полимерные композиты и трибология» (Гомель, 2019, 2022); XIV Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиноведения» (Гомель, 2022); XV и XVII Международных научно-практических конференциях «Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам» (Мозырь, 2023, 2025); Международной научно-практической конференции «Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов» (Гомель, 2023).

Разработанные рецептуры композиционных материалов на основе полиолефиновых отходов и полидисперсной модифицированной бентонитовой глины подтвердили свою эффективность по результатам апробации на УП «Светотехника», ООО «СКБ Защита-плюс», ООО «Иматек и К», лабораторно-технологическом участке государственного научного учреждения

«Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси», ООО «ВорлдЛэвел».

Опубликованность результатов диссертации. По результатам выполненных исследований опубликовано 19 печатных работ, включающих 8 статей (без соавторов – 3 статьи) согласно перечню научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований (4,49 авторских листа), 4 материала и 4 тезиса докладов в сборниках международных и республиканских конференций. Получены 2 патента и подана 1 заявка на выдачу патента Республики Беларусь на изобретения. Общий объем опубликованных работ составляет 6,68 авторских листа.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации составляет 175 страниц, из них 40 страниц занимают 56 иллюстраций и 41 таблица; 24 страницы – список использованных источников из 235 наименований (включая 19 публикаций соискателя) и приложения на 27 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе рассмотрены и систематизированы данные о наиболее распространенных дисперсных наполнителях, применяемых в производстве полимерных композиционных материалов. Показано, что с увеличением степени дисперсности наполнителя увеличивается площадь поверхности частиц и упорядоченность их распределения в композиционной системе, что способствует улучшению эксплуатационных свойств композитов вследствие усиления межфазных эффектов. Большой интерес среди дисперсных наполнителей вызывают природные минералы, в частности, бентонитовые глины (БГ), запасы которых в достаточном количестве имеются в Республике Беларусь. Однако к настоящему времени мало изучены процессы структурообразования композитов на основе отходов полиолефинов (ПО) и полидисперсных частиц наполнителей в условиях экструзионной переработки. Недостаточно изучено диспергирование БГ и влияние модификаторов на этот процесс. Практически отсутствуют результаты систематизированных исследований по оптимизации рецептурно-технологических параметров формирования подобных композитов с комплексными наполнителями, включающими как высокодисперсные частицы БГ, так и другие целевые добавки. На основе сделанных выводов сформулирована цель и поставлены задачи диссертационного исследования.

Во второй главе представлены объекты и методы исследований. В качестве связующих использовали вторичные полимерные матрицы по

ТУ ВУ 400051849.007-2013 (полиэтилен низкого давления (ПЭНД) и полиэтилен высокого давления (ПЭВД)), по ТУ ВУ 400051849.011-2016 (полипропилен (ПП)) и их смеси в соотношении 10÷90 – 90÷10. В качестве технологических добавок применяли полиэтиленовый воск ПВ-200 по ТУ 300041455.024-2002, стеараты цинка по ТУ 2432-011-10269039-2013 и стеараты кальция С-17 по ТУ 2232-002-57149839-07 в количестве до 0,5 мас. %, а также технический углерод П 803 по ГОСТ 7885-86. В качестве наполнителей использовали БГ месторождения «Острожанское» (Республика Беларусь), диоксид кремния А-380 по ГОСТ 14922-77, фосфогипс (ФГ) по ТУ ВУ 400069905.045-2015, золу-уноса (ЗУ) ЗУ КУК-Б-1 по ГОСТ 25818-2017, мел ММХП1 по ГОСТ 12085-88, каолин КРтШП по ГОСТ19608-84. Их подвергали измельчению с одновременным модифицированием (гудрон жировой (ГЖ) по ТУ РБ 37602662.380-99, полиметилсилоксановая жидкость ПМС-200 по ГОСТ 13032-77). В композиции вводили целевые добавки: полифосфат натрия (ПФН) по ГОСТ 20291-2019 и полифосфат аммония (ПФА) ПФА 201 по ТУ 20.13.42.130-033-67017122-2019, триоксид сурьмы по ТУ 48-14-1-88. Фракционный состав БГ и других наполнителей регулировали путем просеивания через сита с соответствующими размерами ячеек. Образцы изготавливали на двухшнековом экструдере Suplast 25/2 (SuPlast, Республика Беларусь), экструзиографе Rheochord 90 (Haake, Германия) и литьевой машине МЛТН-63 (ЧПТУП «Сифания-Экотехника», Республика Беларусь).

Физико-механические свойства (напряжение при растяжении (σ_p), модуль упругости при растяжении (E_p), прочность при сдвиге ($\sigma_{сд}$)) определяли по стандартным методикам на универсальной испытательной машине Instron 5567 (Instron, Великобритания). Структурообразование композитов и взаимодействие компонентов исследовали с помощью оптической микроскопии, дифференциально-сканирующей калориметрии, дифференциально-термического анализа. Физико-химические исследования проводили с помощью рентгеновского дифрактометра GNR APD 2000 PRO (G.N.R. S.r.l., Италия), сканирующего электронного микроскопа «VEGA II LSH» (TESCAN, Чехия) с системой энергодисперсионного микроанализа INCA ENERGY 250 ADD (OXFORD Instruments Analytical, Великобритания), ИК-спектрометра с Фурье-преобразованием NEXUS E.S.P. (Thermo Nicolet, США). Показатель текучести расплава (ПТР) определяли на приборе 5MPCA (RAY-RAN TEST EQUIPMENT LTD, Великобритания), крутящий момент ($M_{кр}$) – с помощью экструзиографа Rheochord 90 (Haake, Германия). Атмосферостойкость композитов исследовали в соответствии с нормативной документацией на данный вид испытаний. Экспериментальные данные обрабатывали методами математической статистики с использованием стандартных пакетов программ.

Третья глава посвящена исследованию параметров процессов диспергирования и модифицирования БГ и их влияния на свойства полимерных ком-

позитов на основе вторичных ПО при экструзионной и литьевой переработке.

Переработка ПО из состава твердых коммунальных отходов показала, что при измельчении ПП, ПЭВД и ПЭНД фракция частиц 1–3 мм является оптимальной для улучшения прочностных характеристик (σ_p). Экспериментально установлено, что эффективным моечным раствором для ПЭВД, ПЭНД и ПП, обеспечивающим устранение с поверхности частиц загрязнителей и получение очищенного полимерного сырья, является подогретая до 70 °С вода, что способствует росту на 20–28% прочности композитов в сравнении с исходным полимерным сырьем.

Введение наполнителей в исходном состоянии не обеспечило стабильности и значимого улучшения прочности композитов на основе вторичных ПО (ПЭВД, ПЭНД). Учитывая, что наилучший результат получен для композита с БГ месторождения «Острожанское» (на 14–20%), выбор наполнителя для вторичных ПО в пользу БГ обусловлен как лучшим σ_p , так и низкой ценой ввиду наличия в Республике Беларусь достаточной сырьевой базы. Как правило, повышение прочности с уменьшением размера частиц наполнителя обусловлено улучшением его совместимости с полимерной матрицей, в том числе вследствие усиления адгезионного сцепления частиц наполнителя со связующим. Анализ физико-химических свойств отечественных глин показывает, что БГ является оптимальным полуфабрикатом для получения высокодисперсных частиц.

Новизной в предлагаемой механо-химической технологии получения бентонитовой глины является совмещение процессов ее модифицирования и диспергирования в планетарной мельнице. В результате реализации вышеуказанных технологических операций установлена более высокая эффективность измельчения бентонитовой глины в условиях механо-химического диспергирования. Важными параметрами такого процесса являются время и скорость вращения несущего диска в планетарной мельнице с применением на финишном диспергировании в качестве модификаторов ПМС-200 или ГЖ. В особенности это сильно проявляется в присутствии модификатора ПМС-200, где оптимальные параметры диспергирования составляют 12 мин по времени, а по скорости вращения – 400 об/мин. Вследствие этого обеспечивается выход частиц БГ с размерами 40 мкм и менее – 53,2%, а при использовании в качестве модификатора ГЖ – 42,5%. Учитывая более высокие показатели выхода дисперсности БГ в присутствии ПМС-200 данный модификатор выбран в качестве основного при получении модифицированной бентонитовой глины (МБГ).

Применение выбранного модификатора обеспечивает интенсификацию диспергирования и гидрофобизацию частиц БГ, которая косвенно способствует повышению уровня физико-химической активности по отношению к полимерной матрице.

Кремнийорганические модификаторы способны к абсорбции в объеме

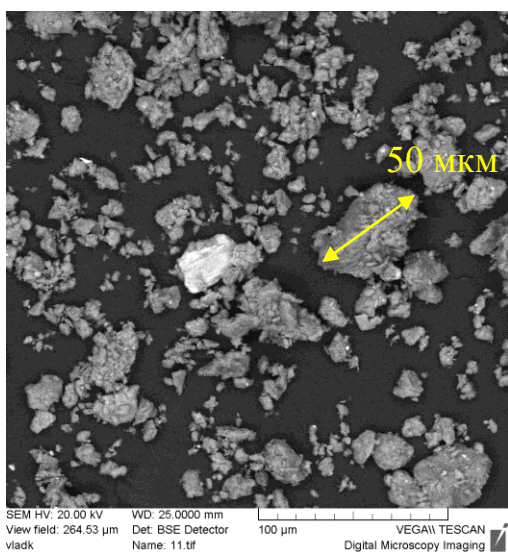
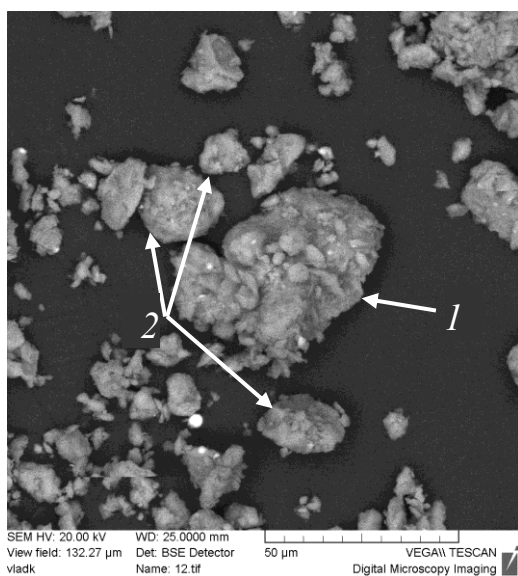


Рисунок 1 – Полидисперсность частиц бентонитовой глины после модифицирования и диспергирования

крупных частиц кремнийсодержащих неорганических веществ (ввиду взаимного химического сродства) с последующим уменьшением величины поверхностной энергии и деагрегацией. Использование предложенных функциональных добавок способствует сохранению высокого уровня поверхностной активности, о чем косвенно свидетельствуют показатели удельной поверхности частиц исходной БГ (15,1 м²/г) и МБГ (34,8 м²/г). Модифицирование улучшает гидрофобность частиц БГ на 15–32%, а также стабилизирует их размеры. При этом обеспечивается получение МБГ (рисунок 1) с преимущественным содержанием частиц размерами 40 мкм и менее – 53,2%, 40–100 мкм – 34,5%, 100–140 мкм – 9,4%.

Важным также является практическая минимизация доли агломератов в объеме МБГ, о чем свидетельствуют результаты исследований ее микроструктуры, а также наличие в ней сферообразных частиц (рисунок 2). Это обеспечивает более равномерное распределение частиц наполнителя различного фракционного состава в полимерном связующем и формирует их упаковку в объеме композиционного материала (рисунок 3).



1 – агломерат; 2 – сферы
Рисунок 2 – Микроструктура полидисперсных частиц МБГ

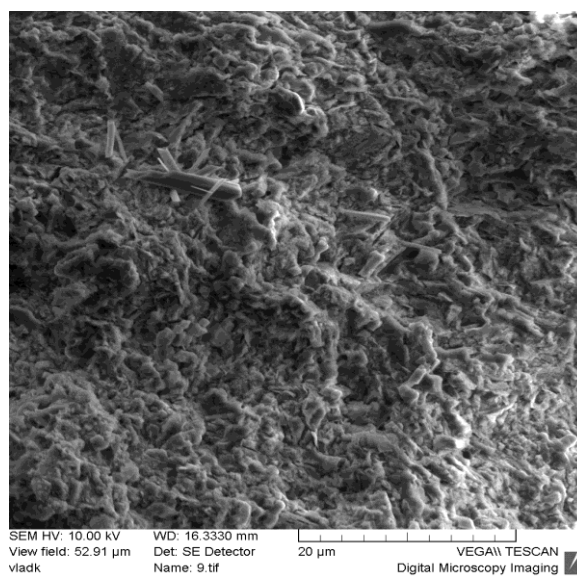
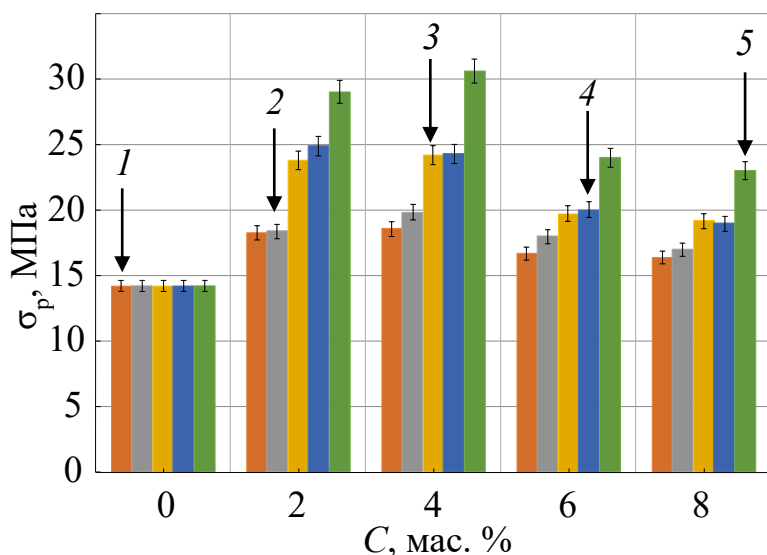


Рисунок 3 – Микроструктура полимерного композита

Установлено, что наиболее высокая σ_p достигается при температурах переработки 180–220 °С и крутящем моменте 11–14 Н·м, что способствует в условиях сдвиговых напряжений разрушению агломератов и равномерному распределению частиц МБГ в объеме композита. Для стабилизации процесса экструзии предложено вводить в композицию стеараты кальция или цинка. Экспериментально установлено оптимальное содержание технологической добавки в пределах 0,20 мас. %.

Введение МБГ во вторичные ПО позволяет в широком концентрационном



1 – мел; 2 – ФГ; 3 – каолин;
4 – SiO_2 ; 5 – МБГ

Рисунок 4 – Влияние содержания наполнителя в композите на основе ПЭНД_{вт} на напряжение при растяжении (σ_p)

диапазоне повысить σ_p (рисунок 4) в сравнении с аналогами. В то же время для исследуемых композитов характерна неоднородность прочностных свойств, о чем свидетельствует разброс значений σ_p . Для стабилизации физико-механических свойств предложено применение смесей вторичных ПО, что предполагает увеличение площади межфазных границ в композите и рост взаимодействий между матрицей и МБГ.

Четвертая глава

посвящена оптимизации

рецептурных составов для композитов на основе смесей вторичных ПО и МБГ в сочетании с комплексными добавками, а также исследованию структуры и эксплуатационных свойств.

Для вторичных ПЭНД и ПЭВД в отсутствие модификаторов при смешении характерно образование гетерогенной системы с дефектными областями. В то же время в смесях вторичных полимеров σ_p может превосходить этот показатель для смесей первичных полимеров, в частности, за счет стимулирования вторичной кристаллизации матриц активными высокодисперсными частицами наполнителей. Кроме того, в смесях вторичных ПО имеет место усиление межфазного взаимодействия вследствие накопления продуктов термоокислительной деструкции, которые концентрируются на поверхности надмолекулярных образований в полимерах, придавая им полярность за счет наличия кислородсодержащих функциональных групп. На это указывают результаты исследований прочности (таблица 1). Применение МБГ в смесях вторич-

ных полимеров (ПЭНД/ПЭВД и ПЭНД/ПП) в пределах 2,0–4,0 мас. % позволило стабилизировать и повысить их σ_p по сравнению с исходными композициями в 1,5–2,0 раза. Экспериментально обнаружено достижение при таких концентрациях наиболее однородной структуры композита. При этом оптимальная дозировка МБГ в композите составляет 2,5 мас. %.

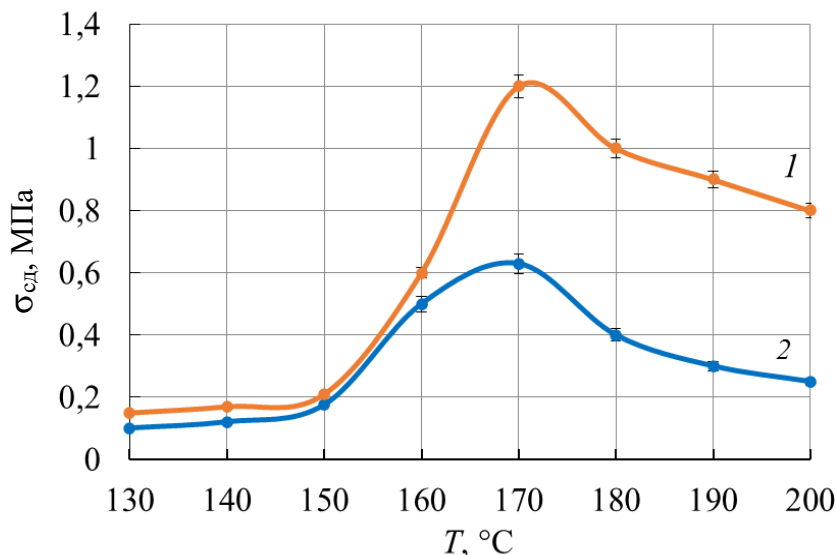
Таблица 1 – Механические характеристики композитов на основе смесей полиолефиновых отходов, БГ и МБГ

Составы композитов	σ_p , МПа	E_p , МПа
Смесь ПЭВД/ПЭНД (1:1)	16	240
2,5 мас. % МБГ + смесь ПЭНД/ПЭВД	33	291
2,5 мас. % БГ + смесь ПЭНД/ПЭВД	21	229
2,5 мас. % МБГ + смесь ПЭНД/ПП	34	384
2,5 мас. % БГ + смесь ПЭНД/ПП	24	272

Повышение σ_p основывается на реализации наполнителем усиливающего эффекта. Это предположение подтверждается исследованиями влияния фракционного состава МБГ на прочность композита. Показатель σ_p для композита как с полидисперсным наполнителем, так и с наполнителем с размерами частиц до 40 мкм на 14,9–36,0% больше, чем для композитов с другими фракциями. Усиливающий эффект полидисперсности наполнителя может быть объяснен упорядоченной упаковкой разных фракций частиц МБГ в объеме композита. При этом каждая фракция на своем масштабном уровне реализует свое воздействие на структуру композита – мелкая фракция за счет значительной площади поверхности и высокой поверхностной активности частиц перестраивает и дополнительно структурирует матрицу вторичных ПО на микроуровне, крупная фракция дает упрочнение макрообъемов композита, а промежуточные обеспечивают комбинацию этих эффектов в разных пропорциях. В итоге, эти межфазные взаимодействия предполагают гибридный характер структурообразовательных процессов в композите.

В связи с этим применение модифицированной полидисперсной бентонитовой глины (МПБ) является предпочтительным с точки зрения экономической составляющей вследствие снижения затрат на подготовку наполнителя, поскольку не предполагает дополнительных усилий по выделению только высокодисперсной фракции. Благодаря реализации активирующего эффекта сдвига под давлением (эффект Ениколопова) можно предположить физико-химическое взаимодействие между макромолекулами вторичных ПО, содержащих кислородсодержащие фрагменты, и полярной поверхностью высокодисперсных частиц МБГ. Это способствует усилению взаимного сцепления в

полимерной матрице вторичных ПО и МПБ, о чем свидетельствуют результаты исследования $\sigma_{сд}$ образцов из пластин ПЭНД_{вт}: этот показатель для образцов с МПБ составил 0,9–1,2 МПа, а для исходных – 0,6–0,7 МПа (рисунок 5), т.е. фиксируется рост на 50,0–71,4%. Сцеплению также способствует увеличение (вследствие модифицирования) площади контакта наполнителя с полимером (т.е. границ раздела фаз). Данные растровой электронной микроскопии частиц БГ представлены на рисунке 6.



1 – смесь ПЭНД и МПБ; 2 – смесь ПЭНД и исходной бентонитовой глины

Рисунок 5 – Показатель прочности при сдвиге ($\sigma_{сд}$) с исходной БГ и образцов с МПБ

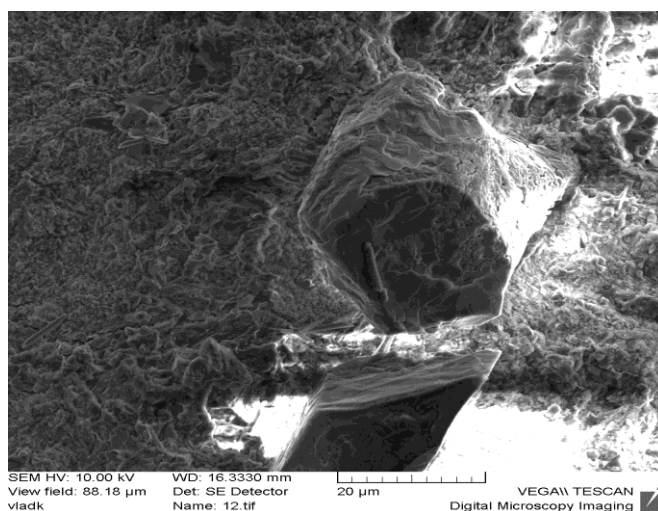
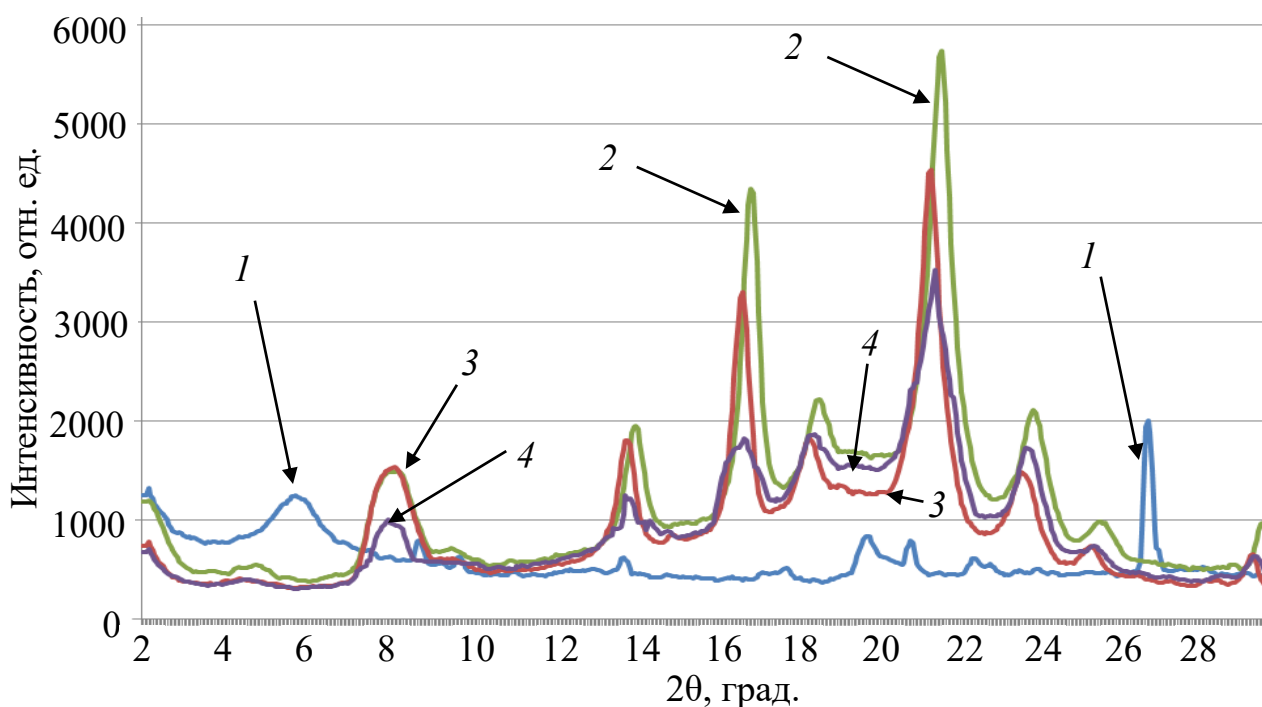


Рисунок 6 – Фрагмент частицы МБГ с ПЭНД_{вт} на ее поверхности

Дифрактограммы (рисунок 7) показывают, что интенсивность рефлексов, соответствующих ПП_{вт}, меньше почти в 2,3–2,5 раза, а для ПЭВД_{вт} в 1,5–1,8 раза. О перекристаллизации вторичных матриц также свидетельствует рост среднего

О физико-химическом взаимодействии можно судить по данным ИК-спектроскопии. На спектрах смесей вторичных ПО и МПБ регистрируются полосы поглощения в области 900–1100 см⁻¹, что может свидетельствовать об образовании функциональных групп типа С–О–С, а также в области 1400–1500 см⁻¹, что может быть соотнесено с ненасыщенными группами типа С=C. Их формирование произошло в ходе деградации ПО и вторичной сшивки окисленных фрагментов. Эти функциональные группы способны реализовывать локальные физико-химические взаимодействия (например, путем формирования вандер-ваальсовых связей) с активированной поверхностью преимущественно высокодисперсных частиц МБГ.

диаметра кристаллитов ПЭ с 90 нм для чистой смеси до 987 нм для композита с МБГ, а для ПП – с 120 нм до 1999 нм соответственно. Это доказывает, что частицы МБГ способствуют образованию мелкокристаллической фазы, обеспечивающей рост структурной однородности и стабилизацию физико-механических характеристик. На протекание процессов кристаллизации указывают также исследования ДСК, где для проанализированных рецептур при нагреве наблюдается уменьшение энтальпии с 34,6 до 21,87 Дж/г.



1 – БГ; 2 – ПП_{ВТ} + ПЭ_{ВТ} + 3 мас. % монтмориллонита;
 3 – ПП_{ВТ} + ПЭ_{ВТ} + 3 мас. % МБГ; 4 – ПП_{ВТ} + ПЭ_{ВТ}

Рисунок 7 – Дифрактограмма исследуемых полимерных композитов

С целью изучения процессов структурообразования и определения эксплуатационных характеристик исследованы композиты на основе вторичных ПО (ПЭВД и ПЭНД, ПЭНД и ПП) и их смесей с модифицированной полидисперсной бентонитовой глиной, содержащие целевые добавки (ПФН, ФГ, ЗУ) и комбинации этих добавок. Установлено, что при их соотношении 1:1 содержание комплексных добавок в пределах до 8 мас. % способствует не только стабилизации прочностных характеристик, но и обеспечивает улучшение других эксплуатационных свойств, в частности, стойкости к горению. Это обусловлено для ФГ характерным выделением связанной влаги при температурах 400–430 °С, а для ЗУ – за счет ячеистой структуры его частиц.

Предварительная обработка частиц смесей вторичных ПО (ПЭВД и ПЭНД, ПЭНД и ПП) полиэтиленовым воском (оптимально в количестве 0,10 мас. %) с последующим их смешением с частицами МПБ в течение 90 с при температурах в интервале 30–50 °С обеспечивает равномерное распреде-

ление наполнителя на поверхности частиц полимера, что снижает анизотропию свойств при формировании изделия.

Снижение σ_p образцов композиционных материалов в натуральных условиях составляет 10–17% от первоначальных показателей. Показано, что на это существенное влияние оказывает УФ-излучение вследствие инициирования и протекания термоокислительных процессов. Установлено оптимальное содержание МПБ в композитах на основе смесей вторичных ПО, при которых обеспечиваются максимальные показатели σ_p : для ПЭВД + ПЭНД – 2,0–4,0 мас. %, для ПП + ПЭНД – 2,5–4,0 мас. % соответственно.

В целом проведенные в главе исследования композиционных систем и разработанные на их основе композиты имеют улучшенные совокупные эксплуатационные свойства (прочность при растяжении и технологические показатели) (таблица 2).

Таблица 2 – Сравнительные механические и технологические характеристики материалов

Показатели	Материал на основе ТУ ВУ 400004762.001–2009	Материал по патенту РБ № 12971	Материал на основе ТУ ВУ 400051849.011–2016	Разработанные композиты
σ_p , МПа	17,0–22,0	20,0–32,2	11,0–16,0	29,0–34,0
$M_{кр}$, Н·м	6,4–7,7	6,5–9,0	6,0–8,6	11,0–14,0
ПТР, Г/10 мин	0,7–0,8	3,0–3,6	1,2–1,5	3,3–3,8

В пятой главе приведены результаты исследований по созданию новых композитов и опытно-промышленной реализации разработок (лабораторный регламент ЛР № 1-2022 от 23.03.2022, опытно-технологический регламент ТР № 115-2022 от 03.03.2022 на опытно-промышленные образцы электротехнических компонентов для изделий в устройствах электрооснастки и электрооборудования). Разработанный материал обладает высокой σ_p (до 34 МПа) и более низкой себестоимостью. Изготовлены опытные партии изделий на лабораторно-технологическом участке государственного научного учреждения «Институт механики металлополимерных систем имени В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси» для ООО «Иматек и К» (акт внедрения от 11.02.2022); опытно-промышленные образцы композиционного материала (акт изготовления от 12.11.2019) для изготовления электротехнической оснастки (БЗ10-4.0) на КУП «Светотехника» (акт апробации от 25.11.2019), которая использована на ООО «СКБ Защита-плюс» (акт о практическом использовании от 15.03.2021); трубные изделия с применением предложенных функциональных добавок на

ООО «ВорлдЛэвел» (акт внедрения от 01.03.2022), рецептурный состав литевых изделий (утвержден 24.01.2024) для системы аэрации сточных вод.

В ходе исследований разработана нормативно-техническая документация, подана заявка на изобретение и получены 2 патента Республики Беларусь. Результаты промышленной апробации подтверждают эффективность использования разработанных композитов. В расчете на условную тонну материала экономия при промышленном производстве нового композита в сравнении с применяемым в настоящее время композитом на основе вторичного полиолефина составляет 51,7 долл. США (на 01.01.2022).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Показана эффективность модифицирования полиолефиновых отходов и их смесей активированными полидисперсными частицами бентонитовой глины в широком фракционном диапазоне. Высокая удельная поверхность частиц модифицированной бентонитовой глины интенсифицирует процессы структурообразования и перекристаллизации полимерной матрицы, что способствует улучшению физико-механических свойств композитов. Установлены закономерности диспергирования и модифицирования частиц бентонитовой глины в присутствии кремнийорганической жидкости или гудрона жирового в количестве от 1,0 до 1,5 мас. %, основанные на регулировании гидрофобных свойств и поверхностной активности, что обеспечивает получение частиц преимущественно сферообразной формы с дисперсностью до 40 мкм. Показано, что для полученных диспергированных частиц бентонитовой глины характерна их выраженная полидисперсность: частицы с размерами до 40 мкм – 53,2%; от 40 до 100 мкм – 34,5%; от 100 до 140 мкм – 9,4% [1–А; 2–А; 3–А; 6–А; 7–А; 9–А; 14–А; 16–А].

2. Экспериментально установлено, что усиление физико-химической активности модифицированных частиц обусловлено особенностями реализации процесса механо-химического диспергирования частиц бентонитовой глины, включающими совмещение процесса модифицирования и диспергирования БГ с применением в качестве модификаторов ПМС-200 или ГЖ с оптимальными параметрами процесса финишного измельчения в планетарной мельнице: временем измельчения – 12 мин и скоростью вращения несущего диска – 400 об/мин, обеспечивающими увеличение удельной поверхности частиц модифицированной бентонитовой глины в 1,5–2,3 раза. Показано, что формирование прочного адгезионного взаимодействия на границе раздела «полимер – модифицированная бентонитовая глина» обусловлено реализацией при

переработке совместных воздействий на композиционную систему нормальных и касательных напряжений (эффект Ениколопова), о чем свидетельствует рост сцепления полимера и частиц бентонитовой глины на 50,0–71,4%. Модифицирование наполнителя приводит к увеличению площади контакта частиц с полимером (т.е. границ раздела фаз), на что указывают микроскопические исследования, фиксирующие, что фрагменты полиолефиновой матрицы адгезионно связаны с наполнителем и концентрируются на поверхности его частиц. При этом совокупное воздействие напряжений на композиционную систему обеспечивает минимизацию образования в композиции агломератов частиц бентонитовой глины и более равномерное их распределение в полимерной матрице [2–А; 6–А; 8–А; 9–А; 10–А; 13–А; 15–А; 16–А; 17–А; 18–А].

3. Установлено, что при упорядоченной упаковке полидисперсных частиц бентонитовой глины в объеме композита на разных масштабных уровнях присутствие преобладающего количества высокодисперсных частиц (до 40 мкм) представляется решающим для улучшения прочности при растяжении композитов в 1,5–2,0 раза. Механизм упрочнения основывается на комплексном воздействии полидисперсных частиц на полимерную матрицу: мелкодисперсная фракция обеспечивает увеличение площади активной поверхности с дополнительным структурированием матрицы вторичных полиолефинов на микроуровне, а крупная и промежуточные фракции в разных пропорциях способствуют упрочнению композита в макрообъеме. Показана роль частиц модифицированной бентонитовой глины в качестве центров кристаллизации, обеспечивающих формирование более высокой структурной однородности композита, что подтверждается результатами анализа дифрактограмм с отсутствующими аморфными гало и данными дифференциальной сканирующей калориметрии при уменьшении энтальпии с 34,6 до 21,87 Дж/г [1–А; 2–А; 10–А].

4. Разработаны и оптимизированы рецептуры композиционных материалов на основе полиолефиновых отходов и их смесей, содержащие модифицированную полидисперсную бентонитовую глину с концентрацией в смесях вторичных полиэтилена высокого давления и полиэтилена низкого давления – 2,0–4,0 мас. %, вторичных полипропилена и полиэтилена высокого давления – 2,5–4,0 мас. %. Установлен оптимальный (от 180 до 220 °С) интервал температур переработки композитов с использованием оптимального содержания стеарата кальция или стеарата цинка в пределах 0,20 мас. % и полиэтиленового воска в пределах 0,10 мас. %, что обеспечивает улучшение технологических параметров (оптимальная величина крутящего момента 11–14 Н·м), снижение вероятности формирования поверхностных дефектов и получение изделий технического, бытового и электротехнического назначения со стабильными показателями свойств. Экспериментально установлены оптимальные параметры подготовки вторичных полиолефинов, включающие получение фракции в

пределах 1–3 мм и их очистку подогретой до 70 °С водой, что обеспечивает улучшение прочности на 20–28% в сравнении с исходным полимерным сырьем. Установлено, что потеря прочности разработанных композитов при воздействии на них атмосферных факторов составляет 10–17% [1–А; 2–А; 3–А; 4–А; 5–А; 7–А; 9–А; 10–А; 11–А; 12–А; 14–А; 17–А; 18–А; 19–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанные составы композиционных материалов на основе вторичных полиолефинов и модифицированной полидисперсной бентонитовой глины и соответствующая регламентирующая нормативно-техническая документация (лабораторный регламент ЛР № 1-2022 от 23.03.2022, опытно-технологический регламент от ТР № 115-2022 от 03.03.2022) могут быть рекомендованы для использования при изготовлении строительных и бытовых изделий, электротехнических деталей, а также для других производственно-технических целей.

Реализация разработок подтверждена на УП «Светотехника» (акт апробации от 25.11.2019) и ООО «СКБ Защита-плюс» (акт о практическом использовании от 15.03.2021) (опытно-промышленные образцы электротехнических компонентов для изделий в устройствах электрооснастки и электрооборудования), на ООО «Иматек и К» (акт внедрения от 11.02.2022), лабораторно-технологическом участке ИММС НАН Беларуси (акт использования разработки от 26.02.2021, акт выпуска от 03.04.2024), ООО «ВорлдЛэвел» (акт внедрения от 01.03.2022) (изделия для электротехники, ЖКХ, строительства).

Результаты исследований перспективны для внедрения на предприятиях, занимающихся рециклингом вторичных полимеров (КУП «Спецкоммунтранс», ИП «РеПласт-М», ООО «Скар», ОАО «Белвторполимер» и др.), и могут быть использованы в образовательном процессе (акт внедрения от 29.11.2019). Композиционные материалы относятся к группе трудновоспламеняемых горючих материалов (протокол испытаний от 15.03.2016). Предполагаемый экономический эффект на условную тонну материала при сравнении с композитом на основе вторичного полиолефина составляет 51,7 долл. США (на 01.01.2022). Получены патенты Республики Беларусь на полимерную композицию [17–А] и древесно-полимерную композицию для изделий декоративно-строительного назначения и способ ее получения [18–А]. Подана патентная заявка на вариант полимерной композиции [19–А].

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в журналах, входящих в перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований

1–А. Подобед, Д. Л. Улучшение эксплуатационных свойств композиционных материалов на основе вторичных полиолефинов с использованием дисперсных наполнителей и антипиреновых добавок / Д. Л. Подобед, В. М. Шаповалов // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка. – 2020. – Т. 10, № 2. – С. 6–13.

2–А. Подобед, Д. Л. Исследование процесса модифицирования и диспергирования бентонитовых глин в условиях механо-химической активации / Д. Л. Подобед // Горная механика и машиностроение. – 2020. – № 4. – С. 93–100.

3–А. Подобед, Д. Л. Влияние функциональных добавок на специальные свойства термопластов / Д. Л. Подобед // Горная механика и машиностроение. – 2021. – № 3. – С. 99–105.

4–А. Подобед, Д. Л. Физико-механические и технологические свойства полимерных композитов на основе вторичных полимеров и бентонитовой глины / Д. Л. Подобед, С. В. Зотов, В. М. Шаповалов // Полимерные материалы и технологии. – 2022. – Т. 8, № 4. – С. 69–76.

5–А. Подобед, Д. Л. Изучение молекулярного взаимодействия в полимерных смесях на основе вторичных полимеров / Д. Л. Подобед, И. И. Злотников, В. М. Шаповалов // Горная механика и машиностроение. – 2022. – № 4. – С. 95–100.

6–А. О механизме упрочнения смесей вторичных полиолефинов в присутствии модифицированной бентонитовой глины / В. М. Шаповалов, Д. Л. Подобед, С. В. Зотов, А. А. Бойко // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 5. – С. 433–440.

7–А. Подобед, Д. Л. Влияние модифицированных бентонитовых глин на структуру и свойства композиционных материалов на основе смесей вторичных полиолефинов / Д. Л. Подобед // Горная механика и машиностроение. – 2023. – № 4. – С. 95–102.

8–А. Древесно-полимерные композиты на основе термопластов для строительной отрасли и ЖКХ / Р. И. Борщун, К. В. Овчинников, А. В. Шаповалов, Д. Л. Подобед // Горная механика и машиностроение. – 2024. – № 3. – С. 82–89.

Материалы конференций

9–А. Подобед, Д. Л. Полимерные композиционные материалы на основе смесей вторичных полиолефинов и модифицированного бентонита / Д. Л. Подобед, В. М. Шаповалов // Современные проблемы машиноведения : сб. науч. тр. XIV Междунар. науч.-техн. конф., г. Гомель, 27–28 окт. 2022 г. : в 2 ч. / ГГТУ им. П. О. Сухого ; редкол.: А. А. Бойко [и др.]. – Гомель, 2023. – Ч. 1. – С. 111–114.

10–А. Шаповалов, В. М. Влияние частиц золы-уноса на свойства композиционных материалов на основе смесей вторичных термопластов и модифицированного полидисперсного бентонита / В. М. Шаповалов, Д. Л. Подобед // Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам : материалы XV Междунар. науч.-практич. конф., г. Мозырь, 24 марта 2023 г. / УО МГПУ им. И. П. Шамякина ; редкол.: И. Н. Ковальчук (отв. ред.) [и др.]. – Мозырь, 2023. – С. 285–287.

11–А. Подобед, Д. Л. Исследование влияния атмосферных факторов на свойства смесей вторичных полиолефинов и модифицированного бентонита / Д. Л. Подобед // Инновационное развитие транспортного и строительного комплексов : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию БелИИЖТа – БелГУТа, г. Гомель, 16–17 нояб. 2023 г. : в 2 ч. / Белорус. гос. ун-т. трансп. ; редкол.: Ю. И. Кулаженко (отв. ред.) [и др.]. – Гомель, 2023. – Ч. 1. – С. 261–262.

12–А. Подобед, Д. Л. Влияние технологических воздействий при подготовке полиолефиновых отходов на их физико-механические и технологические характеристики / Д. Л. Подобед, В. П. Дубодел // Инновационные технологии обучения физико-математическим и профессионально-техническим дисциплинам : сб. науч. тр. XVII Междунар. науч.-практич. конф., г. Мозырь, 15 мая 2025 г. / УО МГПУ им. И. П. Шамякина ; редкол.: В. В. Давыдовская (отв. ред.) [и др.]. – Мозырь, 2025. – С. 271–273.

Тезисы докладов

13–А. Композиционные материалы на основе смесей гидроксидов металлов и бентонитовых глин / К. В. Овчинников, Д. Л. Подобед, А. А. Давыдов, А. А. Тимофеев // Полимерные композиты и трибология (ПОЛИКОМТРИБ-2019) : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., 25–28 июн. 2019 г., г. Гомель / ИММС НАН Беларуси ; редкол.: В. Н. Адериша [и др.]. – Гомель, 2019. – С. 116.

14–А. Роль молекулярного взаимодействия в композиционных материалах на основе полимеров / И. И. Злотников, В. М. Шаповалов, И. Н. Ковалева,

Д. Л. Подобед // Полимерные композиты и трибология (ПОЛИКОМТРИБ-2022) : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения академика В. А. Белого, г. Гомель, 28–30 июн. 2022 г. / ИММС НАН Беларуси ; редкол.: В. Н. Адериha [и др.]. – Гомель, 2022. – С. 80.

15–А. Древесно-полимерные композиты на основе термопластичных отходов для профилльно-погонажных изделий / К. В. Овчинников, С. Ф. Мельников, А. В. Шаповалов, Д. Л. Подобед, С. Н. Бобрышева // Полимерные композиты и трибология (ПОЛИКОМТРИБ-2022) : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения академика В. А. Белого, г. Гомель, 28–30 июн. 2022 г. / ИММС НАН Беларуси ; редкол.: В. Н. Адериha [и др.]. – Гомель, 2022. – С. 93.

16–А. Композиционные материалы на основе вторичных термопластов и дисперсных наполнителей / В. М. Шаповалов, В. Д. Джафаров, А. А. Тимофеенко, Д. Л. Подобед, С. В. Зотов // Полимерные композиты и трибология (ПОЛИКОМТРИБ-2022) : тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения академика В. А. Белого, г. Гомель, 28–30 июн. 2022 г. / ИММС НАН Беларуси ; редкол.: В. Н. Адериha [и др.]. – Гомель, 2022. – С. 104.

Патенты и заявка на патент Республики Беларусь

17–А. Патент ВУ 23888, МПК С08L 23/00 (2006.01), С08К 3/016 (2006.01). Полимерная композиция : № а 20200313 : заявлено 09.11.2020 : опубл. 30.12.2022 / Подобед Д. Л., Шаповалов В. М. ; заявитель УГЗ // Афіцыйны бюл. / Нац. Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2022. – № 6 (149). – С. 53–54.

18–А. Патент ВУ 24426, МПК С08L 97/02 (2006.01), С08L 23/06 (2006.01), С08L 23/12 (2006.01). Древесно-полимерная композиция для изделий декоративно-строительного назначения и способ ее получения : № а 20210310 : заявлено 04.11.2021 : опубл. 20.11.2024 / Шаповалов В. М., Овчинников К. В., Зотов С. В., Мельников С. Ф., Напреев Р. С., Подобед Д. Л. ; заявитель ИММС НАН Беларуси. – URL: <https://search.ncip.by/database/index.php?pref=inv&lng=ru&page=3&target=43415> (дата обращения: 20.12.2024).

19–А. Заявка ВУ 20230183, МПК С08L23/06 (2006.01), С08L23/04 (2006.01). Полимерная композиция : заявлено 31.07.2023 : опубл. 05.03.2025 / Шаповалов В. М., Овчинников К. В., Подобед Д. Л., Шаповалов А. В., Коваленко М. А. ; заявитель ИММС НАН Беларуси. – URL: <https://search.ncip.by/database/?page=3&target=44033> (дата обращения: 10.04.2025).

РЭЗІЮМЭ

Падабед Дзяніс Леанідавіч

Кампазіцыйныя матэрыялы на аснове другасных поліалефінаў, іх сумесей і мадыфікаванай полідысперснай бентанітавай гліны

Ключавыя словы: палімерны кампазіцыйны матэрыял, другасны поліалефін, мадыфікаванне, бентанітавая гліна, рэцыклінг

Мэта даследавання – стварэнне новых рэцэптур кампазіцыйных матэрыялаў з павышанымі эксплуатацыйнымі ўласцівасцямі з выкарыстаннем адходаў поліалефінаў, іх сумесей, мадыфікаванай бентанітавай гліны і функцыянальных дабавак.

Метады даследавання: стандартызаваныя метады вызначэння фізіка-механічных характарыстык узораў, метады аптычнай і растравай мікраскапіі, рэнтгенаструктурнага аналіза, тэрмічнага аналіза, ІЧ-Фур'е-спектраскапіі, фізічнай сорбцыі, матэматычнай статыстыкі.

Атрыманыя вынікі і іх навізна. Абгрунтаваны матэрыялазнаўчы падыход прымянення ў кампазіцыйнай сістэме на аснове другасных поліалефінаў і іх сумесей мадыфікаваных полідысперсных часціц бентанітавай гліны і функцыянальных дабавак, які забяспечвае павышэнне трываласці кампазітаў з прычыны аптымальнага выбару ўдзельнай паверхні часціц. Устаноўлены заканамернасці мадыфікацыйнага дыспергавання бентанітавых глін пры іх апрацоўцы крэмнійарганічнай вадкасцю і гудронам тлушчавым. Устаноўлена ўзмацненне счаплення палімера і часціц бентанітавай гліны, абумоўленае павелічэннем фізіка-хімічнай актыўнасці мадыфікаваных часціц на міжфазнай мяжы шляхам рэалізацыі актыўуючага ефекту пры сумесным уздзеянні нармальных і датычных высілкаў. Паказана эфектыўнасць выкарыстання часціц мадыфікаванай бентанітавай гліны ў якасці цэнтраў крышталізацыі ў кампазіцыйнай сістэме, якія забяспечваюць фарміраванне больш высокай структурнай аднастайнасці кампазіта. Даследаваны заканамернасці павышэння ў 1,5–2,0 разы трываласці кампазітаў, абумоўленыя дадатковым дыспергаваннем бентанітавых глін ў прысутнасці мадыфікавальнага агента.

Рэкамендацыі па выкарыстанні. Палімерныя кампазіцыі могуць прымяняцца для вырабаў тэхнічнага, электратэхнічнага і бытавога прызначэння, што эксплуатуецца ва ўмовах звычайных і павышаных механічных і тэрмічных нагрузак.

Галіна выкарыстання: прадпрыемствы, якія займаюцца перапрацоўкай і рэцыклінгам палімерных матэрыялаў.

РЕЗЮМЕ

Подобед Денис Леонидович

Композиционные материалы на основе вторичных полиолефинов, их смесей и модифицированной полидисперсной бентонитовой глины

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, вторичный полиолефин, модифицирование, бентонитовая глина, рециклинг

Цель исследования – создание новых рецептур композиционных материалов с повышенными эксплуатационными свойствами с использованием отходов полиолефинов, их смесей, модифицированной бентонитовой глины и функциональных добавок.

Методы исследования: стандартизованные методы определения физико-механических характеристик образцов, методы оптической и растровой микроскопии, рентгеноструктурного анализа, термического анализа, ИК-Фурье спектроскопии, физической сорбции, математической статистики.

Полученные результаты и их новизна. Обоснован материаловедческий подход применения в композиционной системе на основе вторичных полиолефинов и их смесей модифицированных полидисперсных частиц бентонитовой глины и функциональных добавок, обеспечивающий повышение прочности композитов вследствие оптимального выбора удельной поверхности частиц. Установлены закономерности модифицирующего диспергирования бентонитовой глины при их обработке кремнийорганической жидкостью и гудроном жировым. Установлено усиление сцепления полимера и частиц бентонитовой глины, обусловленное увеличением физико-химической активности модифицированных частиц на межфазной границе за счет реализации активирующего эффекта при совместном воздействии нормальных и касательных напряжений. Показана эффективность использования частиц модифицированной бентонитовой глины в качестве центров кристаллизации в композиционной системе, обеспечивающих формирование более высокой структурной однородности композита. Исследованы закономерности повышения в 1,5–2,0 раза прочности композитов, обусловленные дополнительным диспергированием бентонитовой глины в присутствии модифицирующего агента.

Рекомендации по использованию. Разработанные полимерные композиции могут применяться для изделий технического, электротехнического и бытового назначения, эксплуатируемых в условиях обычных и повышенных механических и термических нагрузок.

Область применения: предприятия, занимающиеся переработкой и рециклингом полимерных материалов.

SUMMARY

Denis L. Podobed

Composite materials based on waste polyolefins, their mixtures and modified polydispersed bentonite clay

Keywords: polymer composite material, waste polyolefin, modification, bentonite clay, recycling

The purpose of the study: to create new formulations of composite materials with improved performance properties using waste polyolefins, their mixtures and modified bentonite clay and functional additives.

Research methods: standardized methods for determining the physical and mechanical characteristics of samples, methods for optical and scanning microscopy, X-ray diffraction analysis, thermal analysis, FT-IR spectroscopy, physical sorption, mathematical statistics.

The results obtained and their novelty. The material science approach of application of waste polyolefins and their mixtures in a composite system based on modified polydisperse particles of bentonite clay and functional additives, which provides increased strength of composites due to the optimal choice of the specific surface of particles. The regularities of modifying dispergation of bentonite clay during their treatment with organosilicon liquid and fat tar have been established. An increase in the adhesion of the polymer and bentonite clay particles was established, caused by an increase in the physicochemical activity of the modified particles on the interphase boundary by implementing an activating effect with combined action of normal and tangential stresses. The efficiency of using particles of modified bentonite clay as crystallization centers in a composite system, ensuring the formation of higher structural homogeneity of the composite, is shown. The regularities of increasing the strength of composites by 1.5–2.0 times caused by additional dispersion of bentonite clay in the presence of a modifying agent.

Recommendations for use. Developed polymer compositions can be used for technical and household products operated under normal and increased mechanical and thermal loads.

Application area: enterprises engaged in procession and recycling of polymer materials.

Научное издание

Подобед Денис Леонидович

**КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНЫХ
ПОЛИОЛЕФИНОВ, ИХ СМЕСЕЙ И МОДИФИЦИРОВАННОЙ
ПОЛИДИСПЕРСНОЙ БЕНТОНитОВОЙ ГЛИНЫ**

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

Ответственный за выпуск Д. Л. Подобед

Подписано в печать 02.02.2026. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.
Усл. печ. л. 1,3. Уч.-изд. л. 1,0.
Тираж 60 экз. Заказ 49.

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