

На правах рукописи



ГОРБАЧЕВ АЛЕКСАНДР ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

**ВЛИЯНИЕ МОДИФИКАЦИИ РИСОВОЙ ШЕЛУХИ В УСЛОВИЯХ
ВЫСОКОСДВИГОВОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА ФИЗИКО МЕХАНИЧЕСКИЕ И
ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
НА ОСНОВЕ ПОЛИПРОПИЛЕНА**

2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань –2026

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО «КНИТУ»)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Вольфсон Светослав Исаакович

Официальные оппоненты: **Шкуро Алексей Евгеньевич**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет», профессор кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров;

Кузьмин Антон Михайлович, кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва», доцент кафедры механизации переработки сельскохозяйственной продукции.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа.

Защита диссертации состоится «17» июня 2026 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.312.09, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, каб. А-330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте <https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=583398>.

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

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

Автореферат разослан «___» апреля 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.312.09, доктор химических наук, профессор



Черезова Елена Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из перспективных направлений в области химической технологии является разработка композиционного материала на основе термопласта, таких как полипропилен, используемых в качестве связующего для получения строительных материалов, с применением дешевых и доступных отходов растительного происхождения, в частности рисовой шелухи. В России ежегодно образуется 360 тыс. тонн таких отходов, что делает их использование не только экономически выгодным, но и экологически значимым. Это способствует решению проблемы утилизации крупнотоннажных отходов и снижению нагрузки на окружающую среду.

Актуальность разработки полимерных композиционных материалов на основе полипропилена с рисовой шелухой обусловлена рядом факторов. Во-первых, это возможность создания материалов с улучшенными механическими, термическими и эксплуатационными характеристиками, что расширяет их применение в различных отраслях промышленности, включая строительство, автомобилестроение и производство упаковки. Во-вторых, использование возобновляемых растительных ресурсов позволяет снизить зависимость от ископаемого сырья, что соответствует принципам устойчивого развития и экологической безопасности. В-третьих, внедрение таких материалов способствует решению проблемы утилизации отходов сельскохозяйственного производства, что особенно важно для регионов с развитым аграрным сектором.

Тем не менее, создание композиционных материалов с растительными наполнителями связано с рядом ключевых проблем, требующих решения. Одной из них является низкая совместимость гидрофильных растительных наполнителей с гидрофобными полимерными матрицами, что приводит к слабой адгезии на границе раздела фаз и снижению физико-механических свойств композитов. Для улучшения адгезии необходимо использование совмещающих добавок или компатибилизаторов, а также различные виды обработки растительных наполнителей.

Степень разработанности. Эффективность введения рисовой шелухи в полимерную матрицу определяется совокупностью взаимосвязанных свойств, ключевыми из которых являются морфология частиц наполнителя, их размер, степень дисперсности, химический состав и характеристики поверхностной энергии. Указанные параметры оказывают существенное влияние на процессы формирования структуры и комплекса физико-механических свойств полимерных композиционных материалов, что подтверждается результатами экспериментальных исследований, представленных в отечественной и зарубежной научной литературе.

Вместе с тем анализ опубликованных данных показывает, что информация о взаимосвязи между параметрами рисовой шелухи и функциональными характеристиками композитов носит фрагментарный характер и недостаточно систематизирована. В частности, в литературе ограничено представлены исследования, посвященные комплексному анализу корреляций между морфологическими и поверхностными характеристиками рисовой шелухи и эксплуатационными свойствами получаемых композиционных материалов.

Особый научный и практический интерес представляет изучение возможности применения высокосдвиговой деформации в сочетании с различными методами поверхностной модификации рисовой шелухи, включая биологические (ферментативная модификация) и химические (щелочная модификация). Целью таких исследований является установление влияния интенсивных механических воздействий

на кинетику и эффективность протекания ферментативной и щелочной модификации растительного наполнителя.

При этом важной задачей является оценка роли высокосдвиговых деформаций в интенсификации взаимодействия реагентов с волокнистой структурой рисовой шелухи, изменении морфологии ее поверхности и, как следствие, в управлении структурой и свойствами модифицированных наполнителей и композиционных материалов на их основе.

Т. о., реализация данного подхода позволит не только расширить сырьевую базу для производства полимерных композиционных материалов, но и разработать новые эффективные гибридные технологии модификации, сочетающие преимущества механических, биологических и химических методов воздействия.

Цель работы: разработка полимерного композиционного материала на основе полипропилена и модифицированной рисовой шелухи в условиях высокосдвиговых деформаций, с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками.

Для достижения поставленной цели были сформулированы и решались следующие задачи:

Исследовать влияние размера частиц и дозировки рисовой шелухи на реологические, физико-механические и эксплуатационные свойства композитов системы «полипропилен/рисовая шелуха».

Изучить механизмы влияния высокосдвиговых деформаций на изменение структуры и морфологии лигнин-кремнеземного комплекса рисовой шелухи.

Оценить эффективность методов модификации рисовой шелухи (ферментативной и щелочной) в условиях высокосдвиговых деформаций и их влияние на свойства наполнителя и полимерных композиционных материалов на его основе.

Исследовать влияние технологических добавок (совместителей, смазок) на процессы переработки, а также на комплекс физико-механических и эксплуатационных характеристик модифицированных композитов.

Провести оценку физико-механических и эксплуатационных характеристик разработанных композиционных материалов и осуществить оптимизацию их рецептурно-технологических параметров.

Соответствие паспорту специальности. Выполненная диссертационная работа соответствует паспорту специальности 2.6.11. Технология и переработка синтетических и природных полимеров и композитов (П.2, 6).

Научная новизна работы. Установлено, что обработка рисовой шелухи в условиях высокосдвиговой деформации обуславливает механический процесс интенсифицированного изменения природной лигноцеллюлозной матрицы, сопровождающийся разрушением органоминерального поверхностного слоя, включающего лигнин и аморфный диоксид кремния, и формированием развитой пористой структуры поверхности рисовой шелухи.

Показано, что высокосдвиговая деформация интенсифицирует ферментативные и щелочные процессы модификации за счет формирования дефектов структуры и облегчения проникновения щелочных реагентов и ферментных препаратов во внутренние области волокна, что способствует увеличению доступности функциональных групп и обуславливает повышение адгезионного взаимодействия на границе раздела фаз полипропилен/рисовая шелуха.

Установлено, что проведение ферментативной модификации в условиях высокосдвиговой деформации приводит к механохимической интенсификации биокаталитических реакций, сопровождающейся переходом процесса из

диффузионно-ограниченного в кинетически контролируемый режим и сокращением продолжительности обработки при сохранении целостности целлюлозного каркаса наполнителя.

Получена количественная корреляционная зависимость между полярной составляющей поверхностной энергии композитов полипропилен/рисовая шелуха и их физико-механическими характеристиками, позволяющая использовать параметры поверхностной энергии в качестве критерия оценки межфазного взаимодействия и научно обоснованного подхода к рецептуростроению композитов.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в разработке рецептурно-технологических решений получения полимерных композиционных материалов на основе полипропилена с высоким содержанием модифицированной рисовой шелухи, пригодных для переработки экструзионным и литьевым методами и обладающих улучшенными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками.

Разработан композиционный материал на основе полипропилена, содержащий до 50 мас.% ферментативно модифицированной рисовой шелухи, обработанной в условиях высокосдвиговых деформаций, обеспечивающей повышение межфазной адгезии и улучшение прочностных и эксплуатационных свойств композита. Сопоставление характеристик показало повышение прочности при растяжении на 24 %, прочности при изгибе на 21 %, ударной вязкости до 108 %, относительного удлинения на 48 % и показателя текучести расплава на 22 % при практически неизменных значениях модуля упругости и плотности.

Определен оптимальный состав композиционного материала, включающий совместитель, смазку и стабилизирующие добавки, обеспечивающий стабильные реологические характеристики расплава и воспроизводимость процессов экструзии и литья под давлением. Материал может быть использован для изготовления строительных профилей, облицовочных панелей, настилов и других изделий наружного применения.

Применение разработанного материала позволяет частично заместить полимерную матрицу возобновляемым растительным наполнителем и повысить их долговечность за счет улучшенных ударных и прочностных характеристик, что подтверждает целесообразность промышленного внедрения. Практическая значимость полученных результатов подтверждается наличием патента РФ на изобретение «Состав полимерного композиционного материала» (патент РФ № 2835429).

Результаты работы прошли опытно-промышленную апробацию на базе ООО «Строительные Инновации Групп». Полученные изделия строительного назначения соответствуют требованиям ГОСТ Р 59555-2021, что подтверждено техническим актом (исх. № 191 от 12.03.2026).

Положения, выносимые на защиту.

1. Влияние размера частиц и дозировки рисовой шелухи на термоокислительную стабильность, степень кристалличности, а также физико-механические и реологические свойства композитов системы полипропилен/рисовая шелуха.

2. Режимы высокосдвиговой деформации рисовой шелухи, обеспечивающие повышение степени диспергирования наполнителя и улучшение адгезионного взаимодействия с полимерной матрицей.

3. Закономерности влияния щелочной и ферментативной модификации рисовой шелухи, реализуемой в условиях высокосдвиговых деформаций, на морфологию поверхности наполнителя, его совместимость с полипропиленовой матрицей и физико-механические свойства получаемых композиционных материалов.

4. Влияние технологических добавок (совместителей, смазок и стабилизирующих компонентов) на процессы переработки, а также на реологические, физико-механические и эксплуатационные характеристики композитов системы полипропилен/рисовая шелуха.

5. Комплексная оценка взаимосвязи структуры и свойств композитов системы полипропилен/рисовая шелуха в зависимости от метода модификации растительного наполнителя в условиях высокосдвиговой деформации, позволяющая управлять их целенаправленно эксплуатационными характеристиками.

Методология и методы исследования. Методологической основой диссертационного исследования являются современные представления о структуре, свойствах и закономерностях формирования полимерных композиционных материалов, в том числе композитов на основе термопластичных полимеров, наполненных растительными дисперсными наполнителями. В работе использован системный подход, предусматривающий комплексное изучение взаимосвязи состава, структуры, условий переработки и эксплуатационных свойств полимерных композитов.

Исследование основных физико-механических, реологических и эксплуатационных характеристик композиционных материалов выполнено с применением современных стандартных методов испытаний, а также с обоснованным привлечением физико-химических и структурных методов анализа, обеспечивающих достоверную оценку влияния модификации растительного наполнителя и режимов высокосдвиговой деформации на свойства разрабатываемых материалов.

Степень достоверности результатов. Достоверность результатов диссертационного исследования обеспечивается воспроизводимостью экспериментальных данных, применением сертифицированных и взаимодополняющих методов анализа, использованием современного аналитического, испытательного и технологического оборудования, а также корректной статистической обработкой результатов измерений.

В ходе выполнения работы применялись стандартные и апробированные методы физико-химического, термического, реологического, физико-механического и структурного анализа с использованием современного лабораторного и полупромышленного оборудования. Подготовка композиционных материалов осуществлялись в контролируемых условиях с применением двухроторного смесителя закрытого типа Measuring Mixer 350E и двухшнекового экструдера KraussMaffei ZE 25×60, а формование образцов - на термопластавтомате Cronplex Zeres V 900/210.

Экспериментальные данные получены методом многократных измерений с последующей статистической обработкой, что обеспечивает надежность и воспроизводимость полученных результатов. Установленные закономерности находятся в хорошем согласии с данными отечественных и зарубежных научных публикаций, посвященных исследованию полимерных композиционных материалов с растительными наполнителями.

Для проведения исследований использовались: Фурье-ИК-спектрометр Spectrum 100 с приставкой ATR (PerkinElmer, США); дифференциальный сканирующий калориметр DSC 204 F1 Phoenix (Netzsch, Германия); синхронный термический анализатор STA 6000 (PerkinElmer, США); прибор для определения показателя текучести расплава MFI 2322S (ООО «Смартгест», Россия); капиллярный реометр Smart RHEO 1000 (CEAST, Италия); универсальная испытательная машина ТРМ-П 50 С1 (ООО «Тестпрессмаш», Россия); маятниковый копер ТМК-1 50Р-Ц (АО «Точприбор», Россия); дюрометр ТВР-АЦ (АО «Точприбор», Россия); оптический микроскоп Jenaval

(Carl Zeiss, Германия); сканирующий электронный микроскоп REM-100U (Россия); весовой анализатор влажности АВГ-60 (ООО «Вибротех», Россия); катетометр КМ-8 (АО «Красногвардеец», Россия).

Личный вклад автора. Личное участие автора заключается в сборе и анализе литературных данных, участии в постановке задач, в проведении экспериментальных исследований, обсуждении результатов, в формулировании выводов по работе, подготовке материалов публикаций.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы апробированы и обсуждены на междунар. и всерос. науч. конф., в т.ч.: XV Междунар. конф. молодых ученых, студ. и асп. «Кирпичниковские чтения. Синтез и исследование свойств, модификация и переработка высокомолекулярных соединений» (Казань, 2022); 86-й, 87-й и 88-й науч.-техн. конф. профессорско-преподавательского состава, науч. сотр. и асп. Белорусского государственного технологического университета (Минск, 2022-2024); Межд. конф. «Проблемы и инновационные решения в химической технологии» (Воронеж); Всерос. науч. конф. «Актуальные проблемы науки о полимерах» (Казань, 2023); Межд. науч. студ. конф. «Наука. Наследие. Университет» (Чебоксары, 2022-2023).

Результаты исследований отмечены наградой на региональном конкурсе на соискание премии им. Арбузовых за выдающиеся исследования в области фундаментальной и прикладной химии среди молодых ученых (2022 г.), Фонда содействия инновациям (2023 г.).

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 3 статьи в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, 2 статьи в научных журналах, индексируемых в международных базах данных (Scopus), 14 публикаций в сборниках трудов всероссийских и международных научных конференций.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения, списка литературы, включающего 125 наименований. Работа изложена на 145 страницах машинописного текста, содержит 45 табл. и 34 рис.

Автор выражает глубокую благодарность сотрудникам ФГБОУ ВО «КНИТУ»: доценту, к.т.н. И. З. Файзуллину - за ценные советы при планировании исследования и участие в обсуждении полученных результатов, а также профессору А. В. Канарскому - за помощь в обсуждении плана работы при исследовании ферментных препаратов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, представлена научная новизна и практическая значимость, а также приведены положения, выносимые на защиту.

В главе 1 представлен аналитический обзор полимерных композиционных материалов на основе термопластов и растительных наполнителей. Рассмотрены классификация, области применения, ключевые проблемы практического использования таких композитов, а также свойства рисовой шелухи и полимерных матриц. Проанализированы методы модификации растительных наполнителей (физические, химические, биологические) и влияние технологических добавок на свойства композитов. На основании обзора обосновано направление диссертационного исследования.

В главе 2 Приведена характеристика объектов и методов исследования. В качестве полимерной матрицы использовали полипропилен марки ПП 250 GP/3, в качестве наполнителя — рисовую шелуху с размером частиц 1–2 мм. Для

модификации наполнителя применяли ферментные препараты (Allzyme Vegpro, Ронозим VP) и щелочной агент (NaOH). В работе использованы совместители, смазывающие и стабилизирующие добавки (Fusabond P 353, Bondyram 1101, Struktol RP 11, Exad 19B, Exad 6B, стеариновая кислота, Irganox 1010). Структуру и свойства композитов исследовали комплексом физико-химических и механических методов, включая ИК-спектроскопию, дифференциальную сканирующую калориметрию, синхронный термический анализ, сканирующую электронную микроскопию, определение свободной поверхностной энергии, показателя текучести расплава, реологических свойств, водопоглощения, а также стандартные испытания физико-механических характеристик. Описана методика получения композитов в условиях контролируемых параметров переработки.

В главе 3 представлены результаты исследования влияния гранулометрического состава и дозировки рисовой шелухи на формирование структуры, физико-механические, реологические и эксплуатационные свойства композитов ПП/РШ. Проведение данных исследований было направлено на обоснование рациональных параметров наполнения и выбор контрольного состава, обеспечивающего оптимальное сочетание прочностных характеристик и перерабатываемости материала.

На первом этапе изучено влияние размера частиц рисовой шелухи (<200–1250 мкм) на физико-механические свойства композитов при фиксированной дозировке 50 мас.% (табл. 1).

Таблица 1 – Физико-механические свойства полимерных композитов ПП/РШ при фиксированной дозировке наполнителя 50 мас.%

Показатель, ед. изм.	ПП	Размер частиц РШ, мкм						
		<200	200-250	250-355	355-560	560-630	630-1250	
Предел прочности при разрыве, МПа	33,1	15,7	16,6	17,3	16,0	15,4	15,1	
Относительное удлинение при разрыве, %	13,2	2,3	2,3	3,3	3,2	3,2	3,2	
Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²	при 23 °С	111,8	8,2	7,9	7,7	7,5	7,3	7,3
	при –40 °С	17,3	6,3	6,2	6,0	6,0	5,7	5,7
Модуль упругости при растяжении, МПа	1100	2060	2060	2060	2000	1980	1780	
Модуль упругости при изгибе, МПа	1380	2970	2980	2980	3080	3090	3170	
Напряжение изгиба при макс. нагрузке, МПа	47,4	33,7	35,6	35,7	35,8	35,8	36,0	
Твердость, усл. ед.	63	75	76	76	76	76	77	
Плотность, г/см ³	0,91	1,14	1,14	1,14	1,13	1,13	1,12	
ПТР (190 °С, 5 кг), г/10 мин	49,2	13,39	8,94	8,45	4,41	4,26	4,0	
Процентное содержание остатка после экстракции, мас.%	0,75	51,90	50,3	50,20	50,60	50,70	51,00	
Степень кристалличности, %	68,8	56,2	64,1	66,5	63,7	59,2	54	

Выбор дозировки обусловлен оптимальным соотношением себестоимости и эксплуатационных характеристик согласно литературным данным. Установлено, что введение рисовой шелухи в полипропилен приводит к снижению прочности при разрыве, относительного удлинения и ударной вязкости вследствие формирования границы раздела фаз и наличия концентраторов напряжений, но сопровождается

увеличением модуля упругости, твердости и плотности за счет введения жесткого наполнителя. Наилучшие значения ударной вязкости и прочности при разрыве достигнуты при использовании фракции до 355 мкм. Увеличение размера частиц снижает показатель текучести расплава из-за роста вязкости; наибольшее значение ПТР получено для фракции менее 200 мкм.

При дозировке 50 мас.% содержание остатка после экстракции составляет 50,2–51,9 мас.% независимо от фракционного состава, что свидетельствует о стабильности состава материалов. Введение наполнителя снижает степень кристалличности ПП с 68,8% до 54,0–66,5%. Таким образом, оптимальной является фракция менее 200 мкм.

На следующем этапе исследовано влияние содержания рисовой шелухи на физико-механические свойства композитов (табл. 2). Увеличение дозировки наполнителя сопровождается ростом модуля упругости вследствие формирования пространственно-связанной структуры в полимерной матрице, но приводит к снижению прочности при растяжении и относительного удлинения при разрыве из-за ограничения подвижности макромолекулярных цепей ПП.

Таблица 2 – Физико-механические свойства композитов ПП/РШ с различной дозировкой наполнителя и фиксированным размером частиц <200 мкм

Показатель, ед. изм.	ПП	Дозировка рисовой шелухи, %мас.					
		10	20	30	40	50	
Предел прочности при разрыве, МПа	33,1	23,9	21,4	20,3	18,6	15,7	
Относительное удлинение при разрыве, %	13,2	9,2	6,2	4,9	4,5	2,3	
Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²	при 23 °С	111,8	22,0	20,1	18,9	10,6	10,6
	при –40 °С	17,3	9,0	8,9	8,5	6,6	6,6
Модуль упругости при растяжении, МПа	1100	1100	1200	1560	1680	2060	
Модуль упругости при изгибе, МПа	1380	1430	1750	2110	2300	2970	
Напряжение изгиба при макс. нагрузке, МПа	47,4	42,7	38,8	38,9	37,7	33,7	
Твердость, усл. ед.	63	66	67	70	73	75	
Плотность, г/см ³	0,91	0,92	0,98	1,03	1,05	1,14	
ПТР (190 °С, 5 кг), г/10 мин	49,2	40,08	31,93	23,84	20,59	13,39	
Процентное содержание остатка после экстракции, мас.%	0,75	10,28	21,57	30,86	41,08	51,90	
Степень кристалличности, %	68,8	63,6	63,4	60,9	60,3	56,2	

Экстракционный анализ показал, что массовая доля остатка (10,28–51,90 мас.%) пропорциональна дозировке РШ, что подтверждает корректность введения наполнителя и отсутствие его потерь при смешении. Увеличение содержания РШ снижает степень кристалличности ПП матрицы с 63,6 до 56,2% по сравнению с контролем. Снижение степени кристалличности компенсируется формированием жесткого пространственного каркаса наполнителя, обеспечивающего рост модулей упругости композитов.

Реологические свойства исследовали в режиме непрерывного сдвигового деформирования при 190 °С в диапазоне скоростей сдвига 20–1000 с⁻¹ (рис. 1).

Установлено, что размер частиц рисовой шелухи не оказывает существенного влияния на эффективную вязкость композитов. Увеличение содержания наполнителя закономерно повышает вязкость расплава вследствие усиления межчастичного взаимодействия, однако при наполнении 50 мас.% композиты сохраняют технологичность для переработки экструзией и литьем под давлением.

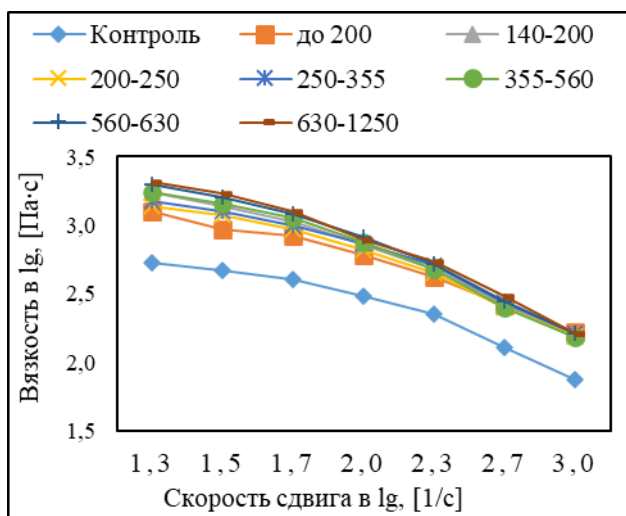


Рисунок 1 – Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига образцов с различными размерами частиц при фиксированной дозировке 50 мас.%

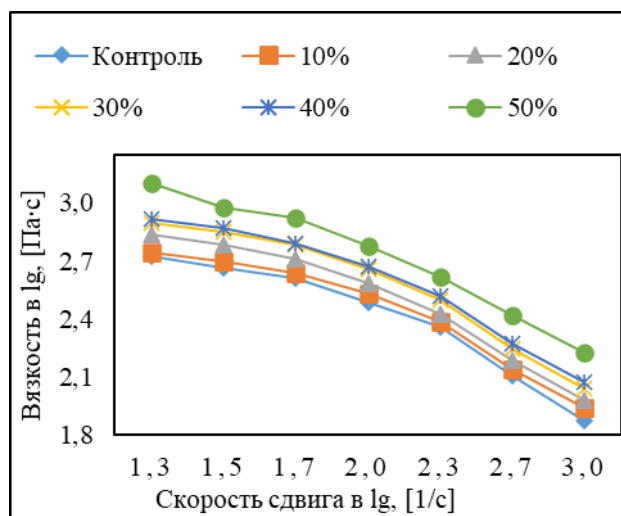


Рисунок 2 – Зависимость эффективной вязкости от скорости сдвига образцов с различными дозировками при фиксированном размере частиц <200 мкм

Исследование водопоглощения показало, что увеличение дозировки рисовой шелухи сопровождается ростом водопоглощающей способности композитов ввиду гидрофильной природы наполнителя. Использование фракции <200 мкм позволяет снизить темпы проникновения воды за счет более плотной упаковки частиц. При содержании РШ 50 мас.% водопоглощение за 24 часа не превышает 1,5 %, что соответствует требованиям к материалам строительного назначения.

На основании комплекса физико-механических, реологических и эксплуатационных характеристик установлено, что использование рисовой шелухи с размером частиц <200 мкм при наполнении 50 мас.% обеспечивает формирование жесткого пространственного каркаса и технологически обоснованный компромисс между модулем упругости, прочностью и перерабатываемостью. Данный состав принят в качестве контрольного для последующих исследований по модификации наполнителя в условиях высокосдвиговой деформации с целью улучшения физико-механических характеристик.

Глава 4 посвящена исследованию влияния высокосдвиговых деформаций (ВСД) на структуру, физико-механические и эксплуатационные свойства рисовой шелухи, а также анализу эффективности ферментной и щелочной обработки РШ, модифицируемой в условиях ВСД.

4.1. Влияние высокосдвиговой деформации

На первом этапе исследовано ВСД при скорости обработки 30, 60, 90 и 120 об/мин. на структуру и физико-механические свойства рисовой шелухи. Схема обработки рисовой шелухи в условиях высокосдвиговых деформаций представлена на рис. 3.

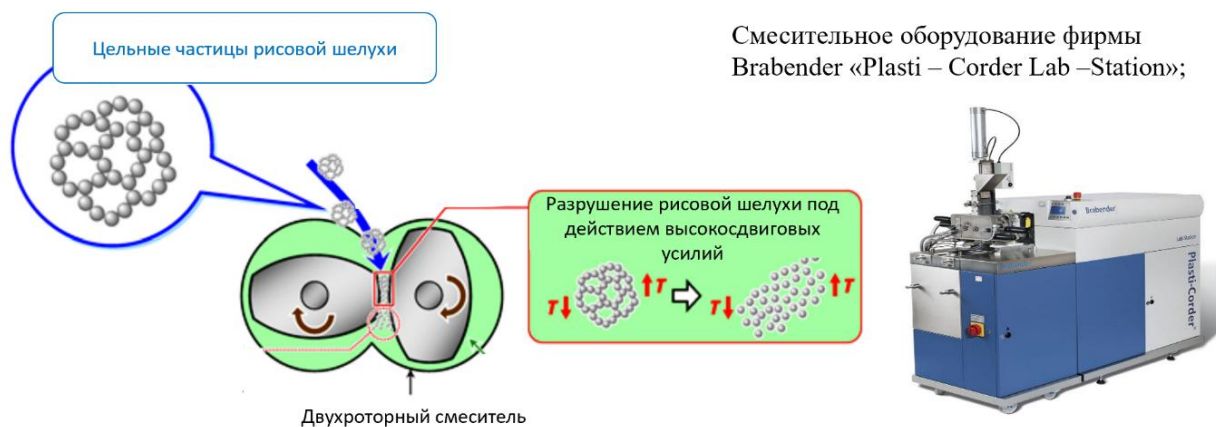


Рисунок 3 – Модификация РШ в условиях ВСД

Установлено, что воздействие ВСД приводит не только к механическому измельчению частиц наполнителя, но и к существенным изменениям характера поверхности, степени агрегации и диспергирования частиц.

Визуальное подтверждение выявленных закономерностей представлено на фотографиях поверхности частиц рисовой шелухи (рис. 4). Увеличение скорости обработки в условиях ВСД приводит к изменению микрорельефа частиц: росту шероховатости поверхности, формированию деформационных борозд и развитию микродефектов. Анализ фракционного состава (табл. 3) показал, что с увеличением скорости обработки от 30 до 120 об/мин монотонно снижаются медианный и средний размеры частиц РШ. Указанные структурные изменения увеличивают удельную поверхность наполнителя и улучшают условия межфазного взаимодействия с полимерной матрицей.

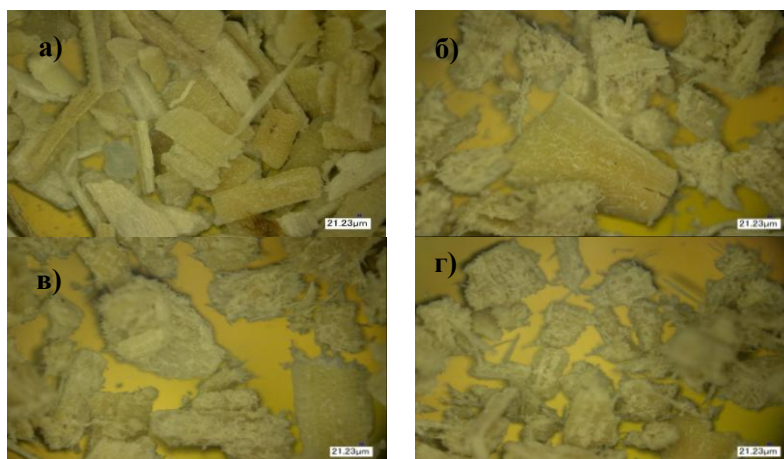


Рисунок 4 – Фотографии поверхности рисовой шелухи, $\times 100$, а) 30 об/мин; б) 60 об/мин; в) 90 об/мин; г) 120 об/мин.

Таблица 3 – Данные по распределению размеров частиц РШ в условиях ВСД при различных скоростях

Параметры	30 об/мин	60 об/мин	90 об/мин	120 об/мин
Медианный размер	178,23	164,62	153,92	146,62
Средний размер	259,52	251,28	240,48	234,3

Скорость сдвига в зазоре между ротором и стенкой смесителя оценивалась расчетным путем. Установлено, что при частоте вращения 30–120 об/мин диапазон скоростей сдвига составляет 10^2 – 10^3 с⁻¹, что соответствует области интенсивного механохимического воздействия на поверхность частиц. Критерием выбора оптимального режима являлось достижение максимальной степени диспергирования при ограничении температуры процесса не выше 60 °С, что принципиально для последующей ферментативной модификации.

Из рис. 5 видно, что при скорости 90 об/мин достигается снижение крутящего момента с выходом на стабильное плато, что свидетельствует о завершении дезинтеграции структуры рисовой шелухи и формировании устойчивого дисперсного состояния. При этом, температура обработки не должна превышать 60 °С. Обработка при 120 об/мин сопровождается нагревом системы до ~100 °С, что исключает использование данного режима. Таким образом, оптимальная интенсивность ВСД соответствует частоте вращения 90 об/мин, обеспечивающей эффективное диспергирование РШ без термической деградации.

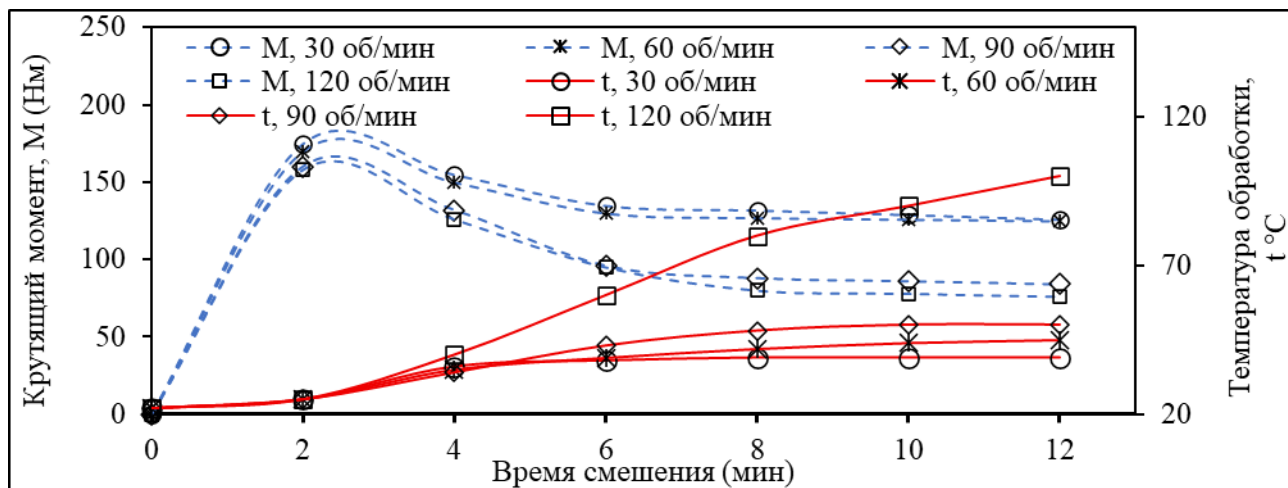


Рисунок 5 – Зависимость крутящего момента и температуры от времени смешения РШ в условиях ВСД

Введение рисовой шелухи, обработанной в условиях ВСД, в композиты на основе ПП улучшает физико-механические свойства. Как показано в табл.е 4, возрастают прочность и модуль упругости при изгибе, а также ударная вязкость по сравнению с композитами, содержащими необработанную высокосдвиговыми деформациями РШ.

Таблица 4 – Физико-механические свойства композита с обработанной РШ в условиях ВСД при различных скоростях

Показатель, ед. изм.	Без предварительной обработки	60 об/мин	90 об/мин	120 об/мин
Предел прочности при растяжении, МПа	15,7	16,2	16,6	16,4
Относительное удлинение при разрыве, %	2,3	2,3	2,4	2,3
Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²	при 23 °С	10,6	11,3	11,5
	при -40 °С	6,6	7,2	8
Прочность при изгибе, МПа	33,7	34,0	35,1	34,5
Модуль упругости при изгибе, ГПа	2970	3010	3031	3088
Твердость, усл. ед.	75	76	78	77
Плотность материала, г/см ³	1,14	1,14	1,14	1,14
ПТР (190 °С, 5 кг), г/10 мин	13,4	13,2	12,7	12,0

Данные изменения обусловлены повышением степени диспергирования наполнителя и снижением концентрации дефектов на границе раздела фаз. Таким образом, ВСД при частоте вращения 90 об/мин является эффективным методом механо-физической активации поверхности РШ, улучшающим адгезионное

взаимодействие в полимерных композитах и создающим основу для интенсификации последующей модификации.

4.2. Ферментативная модификация рисовой шелухи в условиях высокосдвиговой деформации

Рассмотрено влияние ферментативной модификации рисовой шелухи в условиях ВСД на структуру наполнителя и физико-механические и эксплуатационные свойства композитов на основе ПП. Используются ферментные препараты Allzyme Vegpro и Ронозим VP в дозировке 0,01–0,5 мас.%. Обнаружено, что при дозировке 0,1 мас.% температура модификации достигала 59 °С, что находится в пределах термостабильности препаратов и обеспечивает максимальную ферментативную активность. При этой дозировке достигается наиболее продолжительное смешение в температурном интервале <60 °С.

Сочетание ВСД с ферментативной обработкой интенсифицирует биохимические процессы за счет повышения доступности субстратов. ВСД формирует микродефекты и раскрывает волокнистые элементы, облегчая проникновение ферментов во внутренние области РШ и обеспечивая равномерную модификацию поверхности при режимах, исключая термическую инактивацию ферментов. Оптимальная дозировка составила 0,1 мас.%.

Исследование влияния ферментных препаратов (0,1 мас.%) показало, что ферментативная модификация РШ повышает физико-механические и эксплуатационные характеристики композитов (табл. 5).

Таблица 5 – Физико-механические свойства композитов ПП/РШ, модифицированной ферментными препаратами

Показатель, ед. изм	Контроль (ПП/РШ без ВСД)	Композит ПП/РШ с обработкой РШ в условиях ВСД		
		ПП/РШ + ВСД	ПП/РШ + ВСД + Allzyme Vegpro (0,1 %мас)	ПП/РШ + ВСД + Ронозим VP (0,1 %мас)
Предел прочности при растяжении, МПа	15,7	16,6	20,5	20,0
Относительное удлинение при разрыве, %	2,3	2,4	2,4	2,4
Прочность при изгибе, МПа	33,7	35,1	38,8	37,9
Модуль упругости при изгибе, МПа	2970	3031	3030	3030
Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²	при 23 °С	75	78	84
	при –40 °С	1,14	1,14	1,15
Твердость, усл. ед.	75	13,4	12,7	12,7
Плотность материала, г/см ³	1,14	1,14	1,07	1,07
ПТР (190 °С, 5 кг), г/10 мин	13,4	12,7	12,7	13,5

Наиболее выраженный эффект достигнут при использовании ферментного препарата Allzyme Vegpro. Повышение физико-механических свойств композитов обусловлено селективным воздействием ферментов на аморфные компоненты лигнина

и гемицеллюлозы, локализованные в поверхностном слое частиц рисовой шелухи. В результате снижается полярная составляющая свободной поверхностной энергии наполнителя, сближая ее со значением для ПП, что уменьшает различие на границе фаз и улучшает межфазное взаимодействие (табл. 6). Таким образом, обработка РШ Allzyme Vegpro в дозировке 0,1 мас.% способствует повышению межфазной адгезии в системе ПП/РШ, что выражается в улучшении физико-механических характеристик композитов.

Таблица 6 – Поверхностные энергетические характеристики

Образец	Полярная составляющая СПЭ, мН/м	Дисперсионная составляющая СПЭ, мН/м	Полная СПЭ, мН/м
ПП	1,50	27,10	28,60
ПП/РШ без ВСД	27,00	25,73	52,73
ПП/РШ + ВСД	17,18	17,07	34,25
ПП/РШ + ВСД Ронозим VP	8,52	16,23	24,75
ПП/РШ + ВСД Allzyme Vegpro	7,90	15,40	23,30

По результатам элементного анализа и оптической микроскопии поверхности скола композитов (рис. 6) установлено, что обработка РШ в условиях ВСД и последующая ферментативная модификация изменяют состав поверхностного слоя наполнителя. Содержание SiO₂ снижается с 14,90 до 13,40 мас.% после ВСД и до 12,94–13,21 мас.% после ферментативной обработки, тогда как содержание K₂O (0,11–0,14 мас.%) и MgO (0,10–

0,11 мас.%) изменяется незначительно. Это свидетельствует о механическом нарушении кремнеземсодержащего эпидермального слоя и селективном воздействии ферментов на органическую составляющую лигноцеллюлозной структуры.

Микроструктурный анализ подтверждает уменьшение межфазных зазоров и более плотное покрытие частиц полимерной матрицей, что указывает на улучшение адгезионного взаимодействия в системе ПП/РШ.

4.3. Щелочная модификация рисовой шелухи в условиях высокосдвиговой деформации

Исследовано влияние щелочной модификации рисовой шелухи в условиях ВСД на структуру наполнителя и физико-механические и эксплуатационные свойства композитов ПП/РШ. В качестве щелочного агента использованы водные растворы NaOH концентрацией 2–10 мас.%.

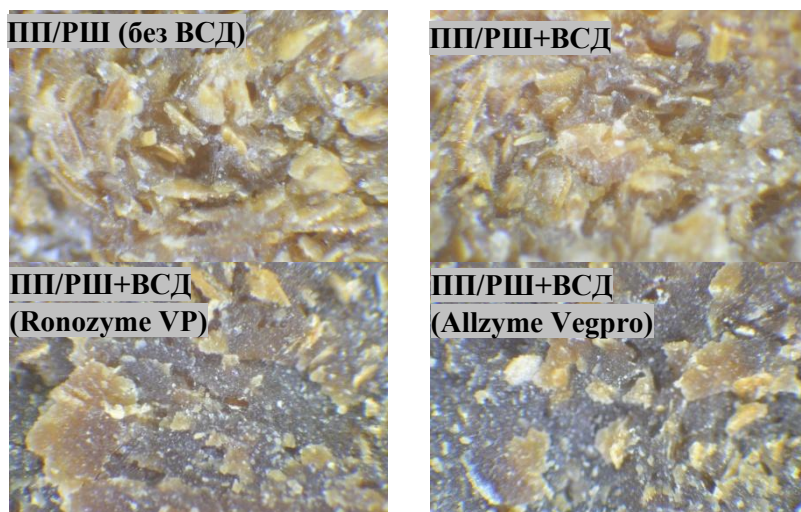


Рисунок 6 – Поверхность скола композитов ПП/РШ до и после ферментативной модификации

По данным элементного анализа и оптической микроскопии (рис. 7), щелочная обработка РШ в условиях ВСД изменяет элементный состав поверхностного слоя: содержание SiO_2 снижается с 14,95 до 1,15 мас.%, доля K_2O возрастает с 0,11 до 1,43 мас.%, содержание MgO изменяется незначительно (0,10–0,24 мас.%). Указанные изменения свидетельствуют об удалении минеральных и аморфных лигноцеллюлозных компонентов, разрушении защитных структур и облегчении проникновения щелочного раствора в волокнистую матрицу, повышая эффективность химической модификации.

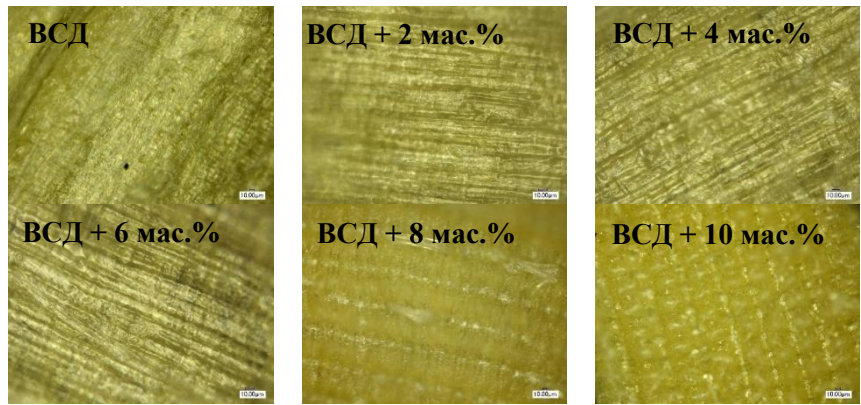


Рисунок 7 – Поверхность частиц РШ до и после щелочной обработки

По результатам исследования физико-механических свойств оптимальной концентрацией щелочного агента является 6 мас.% NaOH (табл. 7), при которой достигается максимальное улучшение характеристик композитов без признаков деградации волокнистой структуры наполнителя.

Таблица 7 – Физико-механические свойства композита на основе ПП и модифицированной РШ в условиях ВСД

Показатель, ед, изм,	ПП/РШ + ВСД	Концентрация щелочи при обработке, мас.%					
		2	4	6	8	10	
Предел прочности при растяжении, МПа	16,6	19,2	19,5	20,7	20,2	19,8	
Относительное удлинение при разрыве, %	2,4	2,4	2,4	2,4	2,4	2,3	
Прочность при изгибе, МПа	35,1	36,3	37,9	39,8	39,1	38,5	
Модуль упругости при изгибе, МПа	3031	3030	3039	3050	3062	3084	
Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²	+23 °С	11,3	11,8	12,7	13,6	13,2	12,9
	-40 °С	7,2	7,6	8,3	9,1	8,7	8,4
Твердость, усл. ед.	78	79	81	83	83	83	
Плотность материала, г/см ³	1,14	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	
ПТР (190 °С, 5 кг), г/10 мин	12,7	12,5	12,0	11,3	11,3	11,2	

Анализ данных по свободной поверхностной энергии (табл. 8) показал, что щелочная модификация сопровождается значительным уменьшением полярной составляющей поверхностной энергии, что улучшает взаимодействие наполнителя с матрицей ПП и усиливает адгезию на границе раздела фаз. В отличие от ферментативной обработки, щелочная оказывает более глубокое и менее селективное воздействие, приводя к интенсивному удалению не только аморфных лигноцеллюлозных компонентов, но и частичному разрушению структурных элементов волокнистой матрицы.

Таблица 8 – Параметры свободной поверхностной энергии композитов ПП/РШ до и после щелочной обработки

Образец	Полярная составляющая СПЭ, мН/м	Дисперсионная составляющая СПЭ, мН/м	Полная СПЭ, мН/м
ПП	1,5	27,1	28,6
ПП / РШ + ВСД (контроль)	27	25,73	52,73
ПП / РШ + ВСД 2% щелочи	20,21	23,31	43,52
ПП / РШ + ВСД 4% щелочи	8,78	20,20	29,00
ПП / РШ + ВСД 6% щелочи	8,52	19,05	27,57
ПП / РШ + ВСД 8% щелочи	7,66	18,81	26,47
ПП / РШ + ВСД 10% щелочи	7,40	18,8	26,20

При выборе метода модификации приоритет отдавался не только физико-механическим характеристикам, но и экологической безопасности и технологической реализации. Несмотря на некоторое превышение свойств композитов, щелочная модификация требует стадии многократного промывания и нейтрализации, сопровождается образованием щелочных сточных вод и повышенным расходом реагентов, что ограничивает ее практическое применение. Поэтому для дальнейших исследований выбран ферментный препарат Allzyme Vegpro в дозировке 0,1 мас. %.

Глава 5 посвящена разработке и экспериментальному обоснованию рецептуры композиционного материала на основе ПП с 50 мас. % и размером частиц <200 мкм модифицированной рисовой шелухой (РШ_{ферм}), обладающего оптимальным сочетанием технологических, физико-механических и эксплуатационных характеристик и пригодного для переработки промышленными методами экструзии и литья под давлением.

В качестве способа модификации наполнителя применена ферментативная обработка в условиях ВСД. Для оценки влияния ферментативной модификации проведены сравнительные физико-механические испытания композитов ПП/РШ без обработки и ПП/РШ_{ферм} с применением совместителя Bondyram 1101 в различных дозировках (табл. 9)

Таблица 9 – Физико-механические характеристики композитов на основе ПП наполненный необработанной РШ с совместителем.

Показатель, ед. изм,	ПП/ РШ без обр.	ПП/РШ (не обработанный) + Bondyram, мас. %				
		1	2	3	5	
Прочность при растяжении, МПа	15,7	20,2	22,9	24,4	23,9	
Относительное удлинение при разрыве, %	2,3	3,1	3,5	3,9	3,6	
Прочность при изгибе, МПа	33,7	38,4	39,1	44,2	45,3	
Модуль упругости при изгибе, МПа	2970	3040	3054	3060	3066	
Уд. вязк. по Шарпи, кДж/м ²	при +23 °С	10,6	12,2	12,7	13,4	13,3
	при -40 °С	6,6	7,1	7,6	7,9	8,1
Твердость по Шору D	75	79	80	80	81	
Плотность материала, г/см ³	1,14	1,14	1,14	1,15	1,15	
ПТР (190 °С, 5 кг), г/10 мин	13,4	10,5	10,1	9,2	8,2	

Для повышения совместимости растительного наполнителя с ПП матрицей и стабилизации структуры композита в состав композиции введен совместитель Fusabond P 353 и Bondyram 1101 (табл. 10).

Показано, что введение совместителя Bondyram 1101 (3 мас.%) повышает физико-механические характеристики композитов. При этом использование ферментативно модифицированной рисовой шелухи (РШ_{ферм}) в сочетании с совместителями (Bondyram 1101, Fusabond P 353) обеспечивает дополнительное улучшение свойств: возрастают прочность при растяжении и изгибе, относительное удлинение при разрыве и ударная вязкость. Указанный эффект обусловлен улучшением межфазного взаимодействия в системе ПП/РШ, снижением концентрации напряжений на границе фаз и более равномерным распределением частиц наполнителя.

Таблица 10 – Физико-механические характеристики композитов на основе ПП наполненный модифицированной РШ с различными совместителями

Показатель, ед. изм,	ПП/ РШ ферм	ПП/РШ _{ферм} + Fusabond, дозировка, %мас				ПП/РШ _{ферм} + Bondyram, дозировка, мас.%				
		1	2	3	5	1	2	3	5	
Прочность при растяжении, МПа	20,5	24,1	24,9	25,3	25,4	25	26,2	29,4	27,9	
Относительное удлинение при разрыве, %	2,4	3,5	4,2	4,9	4,3	3,5	4,3	5	4,7	
Прочность при изгибе, МПа	38,8	44,4	49,1	54,9	57,1	46,6	55,6	60,1	61,4	
Модуль упругости при изгибе, МПа	3030	3070	3073	3078	3076	3140	3188	3238	3170	
Уд. вязк. по Шарпи, кДж/м ²	при +23 °С	11,5	13,1	13,5	14,4	14,3	12,2	13,4	14,5	14,8
	при -40 °С	8	8,5	8,8	9,2	9	8,9	9,3	10	9,8
Твердость по Шору D	84	83	84	85	85	84	85	86	86	
Плотность материала, г/см ³	1,14	1,14	1,14	1,15	1,15	1,14	1,15	1,15	1,15	
ПТР (190 °С, 5 кг), г/10 мин	12,7	11,8	10,5	9,4	7,7	12,5	11,7	10,7	8	

С целью улучшения перерабатываемости и снижения энергоемкости смешения в состав композиции вводили технологические смазки Struktol RP11, Exad 19B, Exad 6B и стеариновую кислоту в дозировке 0,5 мас.% (рис. 8). Наибольшее снижение вязкости расплава обеспечивает смазка Struktol RP11. Для дальнейшего исследования в диапазоне дозировок 0,3–1,0 мас.% отобраны две смазки: Struktol RP11 — как наиболее эффективная по снижению вязкости и крутящего момента, и Exad 6B — как коммерчески доступный отечественный аналог (рис. 9).

Обе технологические смазки проявляют пластифицирующий эффект (рис. 9). Наиболее эффективной является Struktol RP11; добавка Exad 6B также увеличивает текучесть, но в меньшей степени. Оптимальным решением выбрана смазка Struktol RP11 в дозировке 0,3 мас.%, обеспечивающей рост показателя текучести расплава при сохранении физико-механических характеристик, близких к контролю. Увеличение дозировки до 0,5–1,0 мас.% снижает вязкость, но приводит к более выраженному падению свойств, что делает повышенные дозировки менее целесообразными.

Таким образом, разработанный композит на основе ПП, содержащий 50 мас.% ферментативно модифицированной РШ (<200 мкм), 3 мас.% совместителя Bondyram 1101 и 0,3 мас.% смазки Struktol RP11, обладает сбалансированным комплексом физико-механических и эксплуатационных характеристик по сравнению полимерными композитами других производителей (табл. 11).

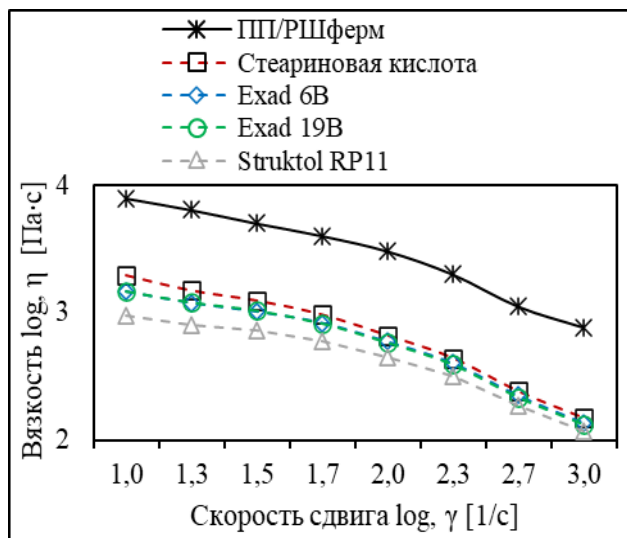


Рисунок 8 – Зависимость вязкости от скорости сдвига композитов ПП/РШ_{ферм} с совместителем при добавлении 0,5 мас.% различных технологических смазок при 190 °С

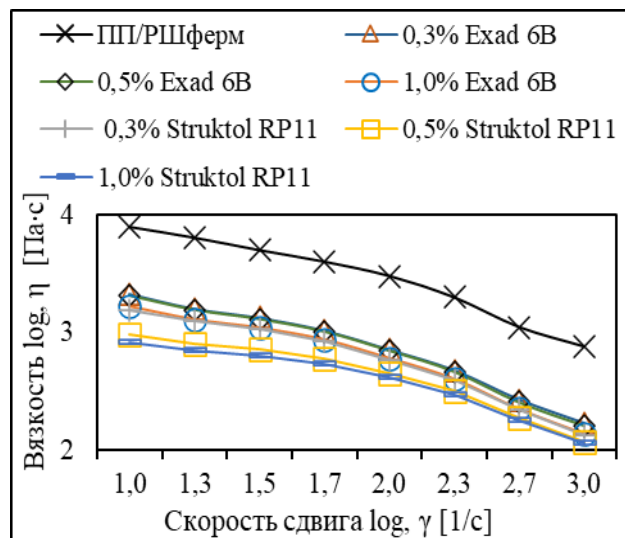


Рисунок 9 – Зависимость вязкости от скорости сдвига композитов ПП/РШ_{ферм} с совместителем модифицированных смазками Struktol RP11 и Exad 6B в различных дозировках при 190 °С

Таблица 11 – Сравнительный анализ физико-механических характеристик разработанных композитов

Показатель, ед. изм	Savewood (Россия)	Doukas S.A. (Греция)	International Tensile & Business (Оман)	ПП/РШ (без обработки) *	ПП/РШ _{ферм} (с ферментной модификацией) **
Прочность при растяжении, МПа	16,7	18,9	-	22,6	28,1
Относительное удлинение при разрыве, %	-	-	-	3,1	4,6
Прочность при изгибе, МПа	-	33,8	36,3	45,6	55,3
Модуль упругости при изгибе, МПа	2260	2840	2420	2866	3076
Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²	при 23 °С	7,74	5,3	-	9,1
	при -40 °С	-	-	-	5,9
Твердость, усл. ед.	-	-	-	83	85
Плотность материала, г/см ³	-	-	1,19	1,14	1,15
ПТР (190 °С, 5 кг), г/10 мин	-	-	-	17,8	21,8

*ПП/РШ (без обработки) — композит ПП/РШ без модификации рисовой шелухи с оптимальной рецептурой (3 мас.% Bondyram 1101, 0,3 мас.% Struktol RP11;

**ПП/РШ_{ферм} (с ферментативной модификацией) — композит ПП/РШ_{ферм} с ферментной модификацией рисовой шелухи и оптимальной рецептурой (3 мас.% Bondyram 1101, 0,3 мас.% Struktol RP11.

Разработанный композит соответствует требованиям ГОСТ Р 59555-2021 для материалов строительного назначения. По сравнению с базовым составом достигнуто повышение прочности при растяжении на 24 %, прочности при изгибе на 21 %, ударной вязкости до 108 %, относительного удлинения на 48 % и показателя текучести расплава на 22 % при практически неизменных модуле упругости и плотности.

Композит превосходит промышленные древесно-полимерные материалы по прочности при изгибе и ударной вязкости, сопоставим с ними по прочности при растяжении и модулю упругости, что обеспечивает переработку стандартными методами формования и повышенную эксплуатационную устойчивость изделий.

Результаты диссертационной работы прошли опытно промышленную апробацию на базе ООО «Строительные Инновации Групп». Изготовлена опытная партия композиционного материала с использованием РШ, прошедшей ферментную модификацию в условиях ВСД. Полученные изделия строительного назначения соответствуют требованиям ГОСТ Р 59555-2021, что подтверждено техническим актом (исх. № 191 от 12.03.2026).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан полимерный композиционный материал на основе полипропилена и модифицированной ферментным препаратом рисовой шелухи в условиях высокосдвиговых деформаций с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками.

1. Установлено влияние размера частиц и дозировки рисовой шелухи на формирование структуры и свойств композитов системы полипропилен/рисовая шелуха.

Показано, что уменьшение размера частиц наполнителя до <200 мкм при степени наполнения 50 мас.% обеспечивает формирование жесткого пространственного каркаса композита за счет более равномерного распределения дисперсной фазы и увеличения площади межфазного контакта. В результате модуль упругости при изгибе композитов возрастает на 115 %, а выбранная степень наполнения является технологически обоснованным компромиссом между прочностными характеристиками и перерабатываемостью материала.

2. Доказано, что обработка рисовой шелухи в условиях высокосдвиговой деформации является механофизическим фактором модификации растительного наполнителя. Показано, что высокосдвиговая деформация приводит не только к механическому разрушению частиц рисовой шелухи, но и к изменению их физического состояния, включая морфологию поверхности, степень диспергирования и характер межфазного взаимодействия с полимерной матрицей.

Установлено, что проведение высокосдвиговой обработки при оптимальном режиме (90 об/мин) обеспечивает увеличение прочности при изгибе, модуля упругости при изгибе и ударной вязкости композитов по сравнению с композитами, содержащими рисовую шелуху без обработки высокосдвиговой деформацией, что обусловлено усилением адгезионного взаимодействия на границе раздела фаз полимер/наполнитель.

3. Показано, что ферментативная модификация рисовой шелухи в условиях контролируемой высокосдвиговой деформации приводит к повышению физико-механических характеристик композитов. Установлено, что применение ферментного препарата Allzyme Vegpro в сочетании с высокосдвиговой деформацией обеспечивает увеличение прочности при изгибе на 15,1 %, модуля упругости при изгибе на 13,6 %, а также ударной вязкости на 17,9 % при 23 °С и на 21,2 % при -40 °С по сравнению с композитами, содержащими немодифицированную рисовую шелуху.

4. Установлено, что щелочная модификация рисовой шелухи в условиях высокосдвиговой деформации сопровождается увеличением физико-механических характеристик композитов. При оптимальной концентрации щелочи (NaOH 6 %) прочность при изгибе возрастает на 18,1 %, модуль упругости при изгибе – на 17,5 %, а

ударная вязкость при $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ – на 37,9 % по сравнению с композитами, содержащими немодифицированную рисовую шелуху. Улучшение свойств связано с частичным удалением аморфных компонентов поверхностного слоя и изменением морфологии поверхности наполнителя, что способствует повышению эффективности межфазного взаимодействия с полипропиленовой матрицей.

5. Разработана и экспериментально обоснована итоговая рецептура композиционного материала на основе полипропилена с модифицированной рисовой шелухой.

Установлено, что композиция на основе полипропилена, содержащая 50 мас.% ферментативно модифицированной рисовой шелухи, совместитель Bondyram 1101 (3,0 мас.%), смазку Struktol RP11 (0,3 мас.%), характеризуется следующим комплексом свойств: прочность при растяжении – 28,1 МПа, относительное удлинение при разрыве – 4,6 %, прочность при изгибе – 55,3 МПа, модуль упругости при изгибе – 3076 МПа, ударная вязкость по Шарпи – 12,7 кДж/м² при 23 °С и 6,3 кДж/м² при $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, твердость – 85 усл. ед., плотность – 1,15 г/см³, показатель текучести расплава (190 °С, 5 кг) – 21,8 г/10 мин.

Полученные значения находятся на уровне или превышают характеристики промышленно выпускаемых древесно-полимерных композитов, что подтверждает эффективность проведенной модификации наполнителя и практическую применимость разработанного материала. Повышенные прочностные и реологические характеристики обеспечивают перерабатываемость материала стандартными методами формования, снижение технологических потерь при переработке и повышение устойчивости изделий к эксплуатационным нагрузкам.

Практическая значимость полученных результатов подтверждена патентом Российской Федерации на изобретение № 2835429 «Состав полимерного композиционного материала», в котором закреплена разработанная рецептура композиционного материала.

6. Результаты диссертационной работы прошли опытно промышленную апробацию на базе ООО «Строительные Инновации Групп». Изготовлена опытная партия композиционного материала с использованием рисовой шелухи, прошедшей ферментную модификацию в условиях высокосдвиговой деформации. Полученные изделия строительного назначения соответствуют требованиям ГОСТ Р 59555-2021, что подтверждено техническим актом (исх. № 191 от 12.03.2026).

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением области применения разработанных композиционных материалов на основе полипропилена и модифицированных лигноцеллюлозных наполнителей, а также с оптимизацией технологий модификации растительного сырья в условиях высокосдвиговых деформаций. Представляется целесообразным проведение дальнейших исследований, направленных на изучение влияния различных ферментных систем и комбинированных методов химикомеханической обработки на структуру и межфазное взаимодействие компонентов композита. Дополнительный интерес представляет разработка композиционных материалов с регулируемыми эксплуатационными характеристиками для изделий строительного, транспортного и технического назначения, а также масштабирование предложенной технологии модификации растительных наполнителей в условиях промышленного производства.

**Список работ, опубликованных автором по теме диссертации
Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК
Минобрнауки России**

1. **Горбачев, А.В.** Применение термоанализа для изучения полимерных композиционных материалов на основе полипропилена и рисовой шелухи / **А.В. Горбачев**, И.З. Файзуллин, С.И. Вольфсон, А.М. Губайдуллина // Вестник технологического университета. – 2024. – Т. 27, № 12. – С. 54–58. (K2).

2. **Горбачев, А.В.** Композиционный материал на основе полиолефинов и модифицированных растительных наполнителей / **А.В. Горбачев**, И.З. Файзуллин, С.И. Вольфсон, А.В. Канарский, И.В. Захаров, Ю.М. Казаков // Пластические массы. – 2023. – Т. 1, № 1–2. – С. 48–52. (K1).

3. **Горбачев, А.В.** Лигноцеллюлозные наполнители и методы их модификации / **А.В. Горбачев**, И.З. Файзуллин, С.И. Вольфсон, Ю.М. Казаков // Вестник технологического университета. – 2022. – Т. 25, № 8. – С. 148–157. (K3).

Статьи в научных изданиях, индексируемых в международных базах данных

4. Fayzullin, I. Composite material based on polypropylene and modified natural fillers / I. Fayzullin, **A.V. Gorbachev**, S. Volfson, Y. Serikbayev, A. Nakyp, N. Akylbekov // Polymers. – 2024. – Vol. 16, No. 12. – Article 1703. (Q1).

5. Fayzullin, I. Influence of different dosages of rice husk particles on thermal, physical, mechanical and rheological properties of polypropylene-based composites / I. Fayzullin, **A.V. Gorbachev**, S. Volfson, G. Zhakupova, S. Uderbayev, A. Nakyp, N. Akylbekov // Journal of Composites Science. – 2025. – Vol. 9, No. 8. – Article 443. (Q2).

Объекты интеллектуальной собственности

6. **Патент РФ № 2835429.** Состав полимерного композиционного материала / Горбачев, А. В., Файзуллин, И. З., Вольфсон, С. И. — Опубликовано 25 февраля 2025 г.

Статьи и материалы, опубликованные в научных изданиях и сборниках материалов международных и всероссийских конференций

7. **Горбачев, А.В.** Влияние условий биохимической модификации на кинетику смешения древесной муки и модификатора / **А.В. Горбачев**, И.З. Файзуллин, С.И. Вольфсон // Наука. Наследие. Университет: сб. материалов Межд. 56-й научной студ. конференции. – 2022. – С. 360–364.

8. **Горбачев, А.В.** Разработка новых полимерных композиционных материалов на основе полипропилена и модифицированных лигноцеллюлозных наполнителей / **А.В. Горбачев**, И.З. Файзуллин, С.И. Вольфсон, Ю.М. Казаков, А.Ф. Петрушеня // Нефтегазохимия — 2022: материалы V Междунар. науч.-техн. форума по хим. технологиям и нефтегазоперераб. – Минск: БГТУ, 2022. – С. 137–140.

9. **Горбачев, А.В.** Разработка метода биохимической модификации древесной муки для полимерных композитов / **А.В. Горбачев**, С.И. Вольфсон, И.З. Файзуллин // Технология орг. веществ: материалы 86-й науч.-техн. конф. ППС, науч. сотрудников и аспирантов. – Минск: БГТУ, 2022. – С. 312–314.

10. **Горбачев, А.В.** Механобиохимическая модификация подсолнечной шелухи для полимерных композитов / **А.В. Горбачев**, И.З. Файзуллин, С.И. Вольфсон // Наука. Наследие. Университет: сб. материалов Междунар. 56-й науч. студ. конф. – 2022. – С. 365–368.

11. **Горбачев, А.В.** Биохимическая модификация растительного наполнителя и разработка полимерного композиционного материала на основе полипропилена и модифицированного наполнителя / **А.В. Горбачев**, И.З. Файзуллин, С.И. Вольфсон, А.В. Канарский, И.В. Захаров // Технология орг. веществ: материалы 85-й науч.-техн. конф. ППС, науч. сотрудников и аспирантов. – Минск: БГТУ, 2021. – С. 225–226.

12. **Горбачев, А.В.** Исследование физико-механических свойств полимерных композитов, армированных растительными наполнителями / **А.В. Горбачев**, И.З. Файзуллин, С.И. Вольфсон // Всерос. фестиваль студентов и молодежи «Человек. Гражданин. Ученый»: сб. науч. тр. молодых ученых и специалистов, Ч. 2. – 2023. – С. 47–52.

13. **Горбачев, А.В.** Физико-механические свойства полимерного композиционного материала на основе полипропилена и модифицированной рисовой шелухи / **А.В. Горбачев, И.З. Файзуллин, Ю.М. Казаков, С.И. Вольфсон, А.В. Касперович** // Технология орг. веществ: материалы 88-й науч.-техн. конф. ППС, науч. сотрудников и аспирантов. – Минск: БГТУ, 2024. – С. 20–22.

14. **Горбачев, А.В.** Влияние размера частиц и дозировок рисовой шелухи на свойства композиции на основе полипропилена / **А.В. Горбачев, С.И. Вольфсон, И.З. Файзуллин** // Актуал. проблемы науки о полимерах: материалы IV Всерос. науч. конф. преподавателей и студентов вузов – Казань: КНИТУ, 2024. – С. 401–403.

15. **Горбачев, А.В.** Разработка полимерного композиционного материала на основе полипропилена и модифицированной рисовой шелухи / **А.В. Горбачев, С.И. Вольфсон, И.З. Файзуллин, Ю.М. Казаков, А.В. Касперович, В.В. Боброва** // Технология орг. веществ: материалы 87-й науч.-техн. конф. ППС, науч. сотрудников и аспирантов. – Минск: БГТУ, 2023. – С. 298–300.

16. **Горбачев, А.В.** Разработка метода биохимической модификации рисовой шелухи для полимерных композитов / **А.В. Горбачев, И.З. Файзуллин, С.И. Вольфсон, Ю.М. Казаков, А.В. Касперович** // Нефтегазохимия – 2023: материалы VI Междунар. науч.-техн. форума по хим. технологиям и нефтегазоперераб. – Минск: БГТУ, 2023. – С. 77–80.

17. **Горбачев, А.В.** Исследование эксплуатационных свойств полимерных композиций с целлюлозным волокнистым наполнителем / **А.В. Горбачев, И.З. Файзуллин** // Актуал. проблемы науки о полимерах: сб. тр. Всерос. науч. конф. (с междунар. участием) преподавателей и студентов вузов – Казань: КНИТУ, 2020. – С. 141.

18. **Горбачев, А.В.** Влияние компатибилизатора на физико-механические свойства композиций на основе полипропилена и целлюлозного наполнителя / **А.В. Горбачев, И.З. Файзуллин, С.И. Вольфсон, А.З. Файзуллин** // Проблемы теорет. и эксперим. химии: тез. докл. XXX Росс. молодеж. науч. конф. с междунар. Участием. – Екатеринбург, 2020. – С. 10.

19. **Горбачев, А.В.** Перспектива использования гидролизного лигнина в качестве наполнителя в композиционных материалах на основе полиолефинов / **А.В. Горбачев,**

И.З. Файзуллин, С.И. Вольфсон // Эколого-экономические и технологические аспекты устойчивого развития РБ и РФ: сб. статей III Междунар. науч.-техн. конф. «Минские научные чтения-2020» – Минск: БГТУ, 2021. – Т. 2. – С. 119–122.

20. **Горбачев, А.В.** Разработка полимерных композитов на основе полипропилена и модифицированной рисовой лузги для строительной отрасли / **А.В. Горбачев, И.З. Файзуллин, С.И. Вольфсон** // Полимеры в строительстве: науч. интернет-журн. – 2024. – № 1 (12). – С. 125–128.

Заказ №

Тираж 100 экз.

Офсетная лаборатория КНИТУ 420015, г. Казань, ул. К. Маркса д. 68