

На правах рукописи

Фах

Фахрутдинов Руслан Рафаилович

РАЗРАБОТКА ТРЁХСЛОЙНОГО СТЕНОВОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и
переработки древесины

АВТОРЕФЕРАТ

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

Казань – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

**Научный
руководитель:** доктор технических наук, профессор
Сафин Рушан Гареевич

**Официальные
оппоненты:** **Стородубцева Тамара Никаноровна**, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», профессор кафедры промышленного транспорта, строительства и геодезии;
Бурындин Виктор Гаврилович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет», профессор кафедры технологий целлюлозно-бумажных производств и переработки полимеров.

**Ведущая
организация:** федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный инженерно-технологический университет», г. Брянск.

Защита диссертации состоится «18» декабря 2024 года в 13 часов 30 минут на заседании диссертационного совета 24.2.312.10, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседаний Ученого совета А-330.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с подписями, заверенными печатью, просим направлять по адресу: 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 68, зал заседания Ученого совета А-330, Ученый совет.

В отзыве указывается фамилия, имя, отчество лица, предоставившего отзыв, его почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты (при наличии), наименование организации и должность с указанием структурного подразделения (п. 28 Положения о присуждении ученых степеней), специальность по защите диссертации, дата визирования отзыва, печать.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет» и на сайте <https://www.kstu.ru/servlet/contentblob?id=522180>

Автореферат разослан «__» _____ 2024 года

Ученый секретарь
диссертационного совета

Байгильдеева

Екатерина Игоревна
Байгильдеева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время остро стоит проблема утилизации отходов древесины и полимерных материалов, в том числе на основе инновационных подходов. Одним из возможных решений проблемы является создание эффективных теплоизоляционных материалов, способных существенно повысить энергоэффективность зданий и снизить экономические затраты на строительство.

На сегодняшний день однослойные теплоизоляционные материалы ограничены в своих функциональных возможностях из-за ряда факторов. Во-первых, их однородная структура не позволяет эффективно сочетать теплоизоляционные и механические свойства, что приводит к низкой теплопроводности при недостаточной прочности. Во-вторых, такие материалы не обеспечивают достаточной устойчивости к внешним воздействиям, таким как влага или механическое давление, что снижает их долговечность и эксплуатационные характеристики. В частности, стеновой материал выполняет конструкционную, теплоизоляционную и декоративную функции, поэтому актуальна задача разработки трёхслойного стенового материала, выполняющего данные функции и обеспечивающего их высокий уровень, в том числе за счёт разделения между слоями этих функций.

Разработка трёхслойного стенового материала на основе древесно-полимерных композитов (ДПК) способствует комплексному решению проблемы утилизации отходов, предлагая индустрии строительных материалов новый, экологически чистый материал, обладающий высокими эксплуатационными свойствами. Эксперты прогнозируют, что в ближайшие годы мировой рынок древесно-полимерных композитов будет расти на 9 % ежегодно, что подчеркивает перспективность данного сегмента. Общий объем рынка теплоизоляционных материалов в России по итогам 2023 г. составлял около 39,6-40,66 млн. м³. Согласно прогнозам до 2026 года, рынок теплоизоляционных материалов, вероятно, будет находиться на уровне ежегодного потребления около 41,7-44,9 млн. м³.

Трёхслойная структура разработанного композиционного стенового материала позволяет создавать конструкции с оптимальными теплофизическими и механическими свойствами, которые могут быть адаптированы к конкретным климатическим условиям.

Работа выполнена в рамках программы «ТехноСтарт» по договору №27-22 «Разработка древесно-полимерного композита из отходов древесины и полимеров» и гранта Фонда Содействия Инновациям «Студенческий стартап» по договору № 1024ГССС15-Л/84296 «Разработка многослойного древесно-полимерного композиционного материала с высокими эксплуатационными свойствами», а также в рамках гранта Академии Наук республики Татарстан на тему «Разработка древесно-полимерного композиционного материала с улучшенными эксплуатационными и теплоизоляционными свойствами».

Степень разработанности темы. В процессе диссертационного исследования проанализированы работы, посвященные проблеме рационального использования древесных отходов с получением материалов теплоизоляционного назначения. Качественные показатели этих материалов и используемое технологическое оборудование рассматривались в работах ученых А.В. Ермолиной, В.А. Салдаева, В.В. Степанова, П.В. Миронова, Е.М. Разинькова, М.И. Зайцевой, С. А. Угрюмова,

Т.Н. Стородубцевой, Л.А. Абдрахмановой, А.А. Лукаша, А.И. Бурнашева, А.Е. Шкуро, М.Е. Gomes и др. В работах данных авторов представлены исследования по созданию и технологии получения теплоизоляционных материалов, где в качестве наполнителя использовались отходы лесопромышленного комплекса.

Вопросами в области создания наполненных полимерных материалов занимались ученые С.И. Вольфсон, М. В. Филичкина, В.А. Золотухин, Е.А. Рюткянен, Н.В. Сиротинкин, В.П. Сучков, Д.Ф. Яковенко, А.А. Мольков, И.М. Галиев, В.Г. Буриндин, Т.А. Горшкова, Р.Р. Хасаншин, R.M. Johnson и др. В работах данных авторов рассматривались возможные пути введения различных наполнителей в полимерную, в частности, пенополиуретановую матрицу с целью получения материалов с заданными технологическими и эксплуатационными свойствами и снижения их стоимости.

Исследования особенностей формирования адгезионных связей между полимером и древесиной рассматривались в работах исследователей А.А. Аксомитного, В.В. Глухих, И. Н. Мусина, D.G. Dikobe и др. В этих исследованиях анализировались закономерности образования и разрушения адгезионных связей, а также пути повышения адгезионной прочности данных материалов.

Цель и задачи исследования. Цель работы заключается в создании трёхслойного стенового материала на основе ДПК и разработка технологии его производства.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- 1) проведение аналитического обзора современных методов производства древесно-полимерных композиционных материалов (ДПКМ) и существующих технологий переработки древесных отходов, а также изучение теоретических исследований в данной области;
- 2) разработка методик исследований, включающих испытания трёхслойных стеновых материалов на основе ДПК, направленных на оценку их теплопроводности, прочностных характеристик (при растяжении, сжатии, изгибе), влагостойкости, атмосферной устойчивости, водостойкости, стойкости к истиранию, огнестойкости, биостойкости, морозостойкости и анализ микроструктуры;
- 3) проведение комплексного исследования эксплуатационных и теплоизоляционных свойств трёхслойного стенового материала с целью определения рационального состава его слоёв;
- 4) разработка инженерной методики расчёта, позволяющей рекомендовать рациональные параметры изделий в зависимости от содержания древесного наполнителя и климатических зон предполагаемого применения материала;
- 5) разработка технологии получения трёхслойного стенового материала на основе древесного наполнителя и полимерных связующих.

Предмет и объект исследования. Предметом исследования является технология получения трёхслойного стенового материала на основе древесно-полимерных композитов. Объектом исследования являются древесные частицы и композиционный материал для отдельных слоёв материала.

Научная новизна:

1. Получены физико-механические (прочностные, термомеханические, структурные), эксплуатационные (гигроскопичные, износостойкие, теплофизические,

термические, биологические) характеристики ДПК в зависимости от вида и содержания древесного наполнителя, связующего полимера и технологических добавок.

2. Доказана целесообразность введения дорогостоящих модификаторов только в конструкционный поверхностный слой стенового материала.

3. Предложена методика расчёта, позволяющая рассчитать оптимальные толщины каждого слоя стенового материала, изготовленного из ДПК, в зависимости от соотношения компонентов и условий эксплуатации.

4. Разработана технология производства трёхслойного стенового материала на основе ДПК (патент РФ на изобретение № 2 800 911). Структура материала включает:

- конструкционный поверхностный слой, состоящий из полимера (30 – 35 масс.%), древесных частиц волокнистого типа размером от 1 до 2,5 мм (54 – 56 масс.%), изоцианата (7 – 10 масс.%), технологической добавки – технический углерод N330 или полиэтиленовый воск (2 – 3 масс.%), красителя – сополимер этиленвинилацетатный EVA (1 – 2 масс.%);

- декоративный поверхностный слой, состоящий из полимера (20 – 26 масс.%), древесных частиц волокнистого типа размером от 2,5 до 10 мм (70 – 76 масс.%), технологической добавки – технический углерод N330 (2 – 3 масс.%), красителя – КА-2 (1 – 2 масс.%);

- теплоизоляционный слой между поверхностными слоями, состоящий из полиола (10 – 12,5 масс. %), древесных частиц в виде древесных волокон размером от 10 до 15 мм (75 – 80 масс.%), изоцианата (10 – 12,5 масс.%).

Теоретическая значимость работы:

- раскрыто влияние свойств связующего, наполнителя и технологических добавок на характеристики трёхслойного стенового материала, состоящего из древесно-полимерного композита;

- изложены основные положения и этапы создания многослойного стенового материала для разработки новых изделий и технологий;

- проведена модернизация существующих методик расчёта и алгоритмов, обеспечивающих получение новых результатов, включающих разработку оптимального состава трёхслойного стенового материала с учетом требуемых характеристик, климатических особенностей и типов используемого сырья.

Практическая значимость работы заключается в формулировании методических рекомендаций и предложений для разработки трёхслойного стенового материала, включающих в себя этапы выбора оптимальных параметров материалов, методов обработки и улучшения эксплуатационных характеристик изделий для повышения качества и конкурентоспособности продукции; в разработке ресурсосберегающей технологии для эффективного использования древесных отходов и производства трёхслойного стенового материала на основе ДПК с высокими эксплуатационными и теплоизоляционными свойствами.

Полученные результаты исследований приняты к внедрению в ООО НПО «Политехнологии» (г. Казань) и внедрены в учебный процесс по дисциплине «Современные древесно-композиционные материалы» в ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет».

Методология и методы исследования. Методологической основой исследования послужили характеристики свойств исходных компонентов, которые выступают в качестве основных факторов, влияющих на физико-механические, теплофизические и эксплуатационные характеристики трёхслойного стенового материала на основе ДПК. Теоретическую базу исследований составили труды ученых, занимающихся вопросами использования отходов деревообрабатывающих предприятий для производства композиционных материалов, а также нормативные документы, определяющие качественные характеристики трёхслойного стенового материала на основе ДПК. Практическую основу составили результаты лабораторных испытаний физико-механических, теплофизических и эксплуатационных свойств материала и достоверность научных результатов исследований, полученных с использованием стандартных методик.

Достоверность результатов исследований обусловлена тем, что:

- в ходе экспериментальных работ результаты были получены с использованием сертифицированного оборудования, проведением калибровки приборов;

- использованы современные методики сбора и обработки исходной информации;

- инженерная методика расчёта трёхслойного стенового материала разрабатывалась на основе классических уравнений теплопереноса;

- математическое моделирование проведено с использованием программ Mathcad 15, EXCEL и языка программирования Python;

- научные результаты, полученные автором, согласуются с опубликованными ранее экспериментальными данными других исследователей и не противоречат существующим представлениям.

Личное участие автора состояло в проведении экспериментов, анализе полученных данных и интерпретации результатов, разработке экспериментальных стендов и установок для проведения необходимых испытаний и измерений, в подготовке основных публикаций по выполненной работе, включая статьи, доклады и презентации на конференциях и семинарах. Автору принадлежат основные идеи работ, опубликованных в соавторстве.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Основные результаты диссертационной работы соответствуют паспорту специальности 4.3.4. Технологии, машины и оборудование для лесного хозяйства и переработки древесины: п. 2. «Химия, физико-химия и биохимия основных компонентов биомассы дерева и иных одревесневших частей растений, композиты, продукты лесохимической переработки» (пункты 1, 2, 3 научной новизны); п. 4. «Технология и продукция в производствах: лесохозяйственном, лесозаготовительном, лесопильном, деревообрабатывающем, целлюлозно-бумажном, лесохимическом и сопутствующих им производствах» (пункт 4 научной новизны).

Положения, выносимые на защиту:

1. Зависимости физико-механических и эксплуатационных характеристик ДПК от вида и содержания древесного наполнителя, связующего полимера и технологических добавок.

2. Разработанный состав трёхслойного стенового материала на основе древесных

частиц и связующего полимера.

3. Технология изготовления трёхслойного стенового материала на основе ДПК.

4. Методика расчета, позволяющая выбрать рациональные толщины слоёв композиционного материала в зависимости от климатических условий, содержания и свойств древесного наполнителя, типа матрицы.

5. Рекомендации по промышленному внедрению разработанного трёхслойного стенового материала на основе ДПК.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались:

- на международных конференциях: «Модели и методы повышения эффективности инновационных исследований» (Воронеж, 2019 г.), «Инновационные технологии, оборудование и материалы» (Казань, 2020 г.), «Исследование путей развития научно-технического потенциала общества в стратегическом периоде» (Волгоград, 2022), «Наука и технологии в лесопромышленном комплексе» (Брянск, 2023 г.);

- на всероссийских конференциях: «Новые материалы и перспективные технологии лесопромышленного комплекса» (Воронеж, 2022 г.), «Актуальные проблемы лесного хозяйства и переработки» (Казань, 2023 г.);

- на научных сессиях ФГБОУ ВО «КНИТУ» (Казань, 2019-2023 гг.).

Результаты исследований отмечены дипломом победителя Всероссийского инженерного конкурса «ВИК 2019» в номинации «Технологии материалов», грантами Академии наук РТ (2019 - 2020 гг.), дипломом победителя научно-исследовательских проектов аспирантов КНИТУ «ТехноСтарт» (2021 г.), дипломом победителя открытого конкурса инновационных идей «Пространство инноваций-2022» в номинации «Технологическая инновация» (2022 г.), грантом фонда содействия инновациям «Студенческий старт» (2022 г.), дипломом победителя в конкурсе 50 инновационных идей для Республики Татарстан в номинации «Старт инноваций» (2023 г.), стипендией Правительства Российской Федерации по приоритетным направлениям (2023 - 2024 гг.).

Публикации. По результатам выполненных исследований автором опубликовано 11 печатных работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК, 1 статья в издании, входящем в реферативную базу Scopus, 2 патента на изобретение, 5 публикаций – в прочих изданиях.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы и приложений. Диссертационная работа изложена на 167 страницах, включает 58 рисунков и 23 таблицы. Библиографический список включает 155 наименований цитируемых работ.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечается актуальность разработки многослойного стенового материала на основе ДПК для решения проблемы утилизации отходов и создания эффективных теплоизоляционных материалов с высокими прочностными характеристиками в связи с прогнозируемым ростом рынка данных материалов и с

учётом потребностей в новых конструкциях, адаптируемых к различным климатическим условиям.

В первой главе произведен анализ современного состояния науки и технологий изготовления композиционных материалов, подробно рассмотрены особенности древесного наполнителя и полимерных связующих, их влияние на характеристики материала. Выявлена перспективность создания изделий на основе древесно-полимерных композитов с высокими эксплуатационными показателями и оптимальной ценовой характеристикой.

Во второй главе рассмотрен объект исследования – трёхслойный стеновой материал на основе ДПК, сформированный на основе древесных частиц и полимеров. Представлена технология формирования трёхслойного древесно-полимерного композиционного материала. Схематичное изображение структуры трёхслойного стенового материала на основе ДПК представлено на рисунке 1.



Рисунок 1 – Трёхслойный материал на основе ДПК

Представлены методики проведенных исследований.



Рисунок 2 – Виды исследований образцов ДПК для трёхслойного стенового материала

повышение прочности в среднем на 7,8 %.

Подробно рассмотрены основные характеристики объекта исследования. Экспериментальный комплекс, описанный в работе, позволяет провести ряд исследований (рис. 2), направленных на изучение трёхслойного стенового материала, а именно: структуры ДПК, его физико-механических свойств, теплофизических и эксплуатационных характеристик.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований, направленных на изучение качественных и эксплуатационных характеристик стенового материала в зависимости от свойств связующего полимера, его концентрации и вида наполнителя.

Обнаружено, что при испытании образцов на растяжение (см. рис. 3), образцы с древесными частицами из хвойных пород демонстрируют более высокие прочностные показатели по сравнению с образцами из березы в среднем на 19 %. При испытании на сжатие образцы с частицами из древесины березы показали

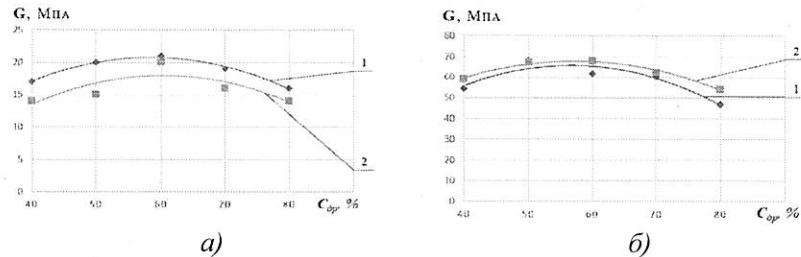


Рисунок 3 – Зависимость предела прочности на растяжение (а) и сжатие (б) от концентрации древесных частиц: 1 – хвойные породы; 2 – береза

На рисунке 4 представлены зависимости влияния видов полимеров и технологических добавок на свойства поверхностных слоёв.

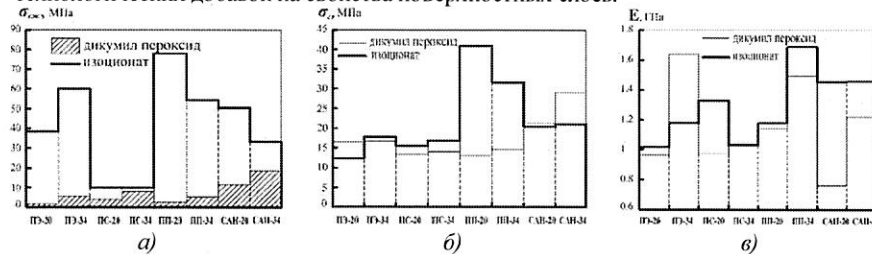


Рисунок 4 – Влияние видов полимеров и технологических добавок: а) на адгезионные свойства конструкционного поверхностного слоя; б) на модуль разрыва конструкционного поверхностного слоя; в) на модуль упругости конструкционного поверхностного слоя

Анализ данных показывает, что прочность внутреннего сцепления полимеров с изоцианатной смолой выше для всех видов полимеров, чем с дикумилпероксидом. В то же время, при использовании в качестве связующего 34 %-го полистирола (ПС-34) возможно использование в качестве технологической добавки как изоцианата, так и дикумилпероксида. При использовании дикумилпероксида в качестве технологической добавки, модули разрыва композитов выше для образцов на основе связующих полиэтилена 20 % (ПЭ-20), САП-пластика 20 и 34 % (САП-20, САП-34).

При исследовании композитов на модуль упругости с использованием дикумилпероксида максимальный результат наблюдался только у двух образцов ПЭ-34 % и ПС-34 %, во всех остальных случаях при использовании изоцианатной смолы в качестве технологической добавки модули упругости композитов выше. Поэтому в качестве технологической добавки был выбран изоцианат.

В дальнейших исследованиях при изучении свойств образцов преимущественно рассматривались хвойные породы, полиэтилен и изоцианат.

Для определения оптимального содержания изоцианата в конструкционном поверхностном слое были проведены экспериментальные исследования, направленные на изучение его воздействия на качественные параметры композита (табл. 1).

Таблица 1 – Влияние модификатора на качественные свойства композита

Параметр	Количество изоцианата						
	0 %	4 %	5,5 %	7 %	8,5 %	10 %	14 %
Водопоглощение, %	4,8	4,6	4,4	3,9	3,8	3,7	3,7
Твёрдость, Н/мм ²	100	107	115,4	134,3	138	139,2	139
Истираемость, г/см ²	4	3,5	3	2,1	2,0	1,9	1,9
Предел прочности при растяжении, МПа	20,4	22,4	24,4	29	31	32,6	32
Предел прочности при изгибе, МПа	40,5	44,5	48,5	53,3	55	55	54,4
Удельное сопротивление выдергиванию, Н/мм	116	126	139	143,5	145	146	145,5

Из представленных результатов видно, что использование модификатора приводит к повышению прочностных и эксплуатационных показателей изделия по всем параметрам, что доказывает обоснованность его применения при изготовлении

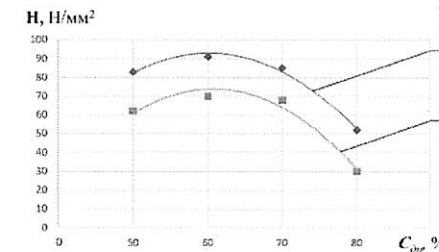


Рисунок 5 – Зависимость твёрдости поверхностных слоёв от концентрации древесного наполнителя и технологической добавки: 1 – древесные частицы, смешанные с изоцианатом (7%); 2 – древесные частицы без изоцианата

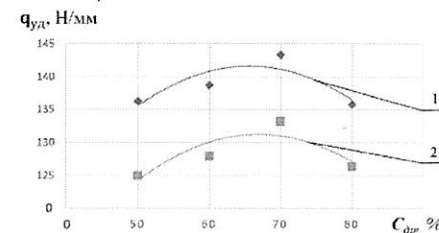


Рисунок 6 – Зависимость удельного сопротивления выдергиванию шпуров из поверхностных слоёв трёхслойного материала от вида и концентрации наполнителя: 1 – древесные частицы с изоцианатом (7%); 2 – древесные частицы без изоцианата

конструкционного поверхностного слоя из ДПК. Установлено, что использование изоцианата менее 7 % приводит к заметному ухудшению качественных характеристик изделий, а при использовании более 10 % отмечается отрицательное влияние на экономические показатели производства при незначительном улучшении качественных свойств материала, поэтому рекомендуемое количество изоцианата в композите было принято 7-10 %.

Установлено, что твёрдость ДПК при введении 7 % изоцианата (рис. 5) повышается на 35,2 %, а удельное сопротивление выдергиванию шпура (рис. 6) увеличивается примерно на 8,1 %. Эти результаты указывают на потенциальное улучшение физико-механических свойств ДПК при добавлении изоцианата к древесным частицам.

Исследования, проведенные для оценки морозостойкости поверхностных слоёв (рис. 7), демонстрируют снижение твердости древесно-полимерного композита после 200 циклов замораживание/оттаивание в случае образцов с добавлением изоцианата и

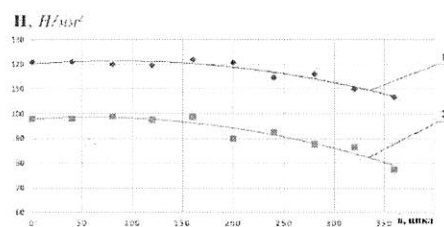


Рисунок 7 – Зависимость твёрдости поверхностных слоёв от количества циклов замораживания/оттаивания: 1 – на основе изоцианата; 2 – без добавления изоцианата

пенополиуретаном. Также важно отметить, что способность теплоизоляционного слоя подвергаться небольшим деформациям без изменения своих эксплуатационных свойств способствовало сохранению структуры трёхслойного стенового материала при многочисленных циклах замораживания/оттаивания.

С повышением температуры образца конструкционного поверхностного слоя с 10 до 40 °С (рис. 8а) прочность на сжатие снижается с 62,17 до 53,70 МПа, а предел прочности на изгиб (рис. 8б) снижается с 23,87 до 18,15 МПа, т.е. на 38 %. Это обусловлено тем, что ДПК под действием тепла теряют свою прочность из-за изменений в структуре и ухудшения адгезии между древесными частицами и полимером.

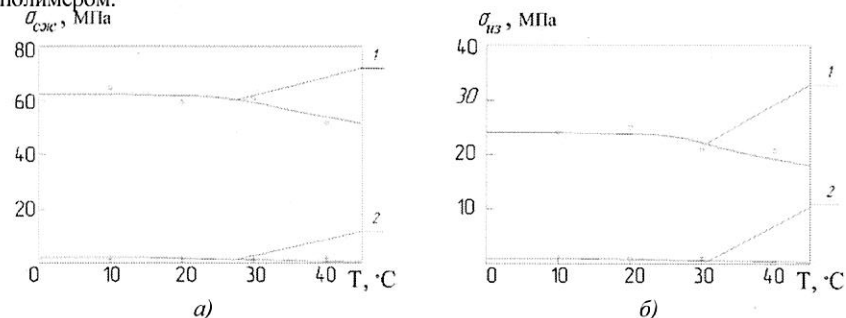


Рисунок 8 – Зависимость предела прочности на сжатие (а) и изгиб (б) от температуры: 1 – конструкционный поверхностный слой, 2 – теплоизоляционный слой

Из анализа зависимости предела прочности ДПК на сжатие и изгиб для теплоизоляционного слоя видно, что при увеличении температуры также происходит снижение предела прочности, так как в пористой структуре пенополиуретана начинают происходить процессы деформации и разрушения связей между частицами материала.

после 150 циклов для образцов без изоцианата.

После завершения циклов замораживания/оттаивания визуальный осмотр образцов выявил лишь незначительные дефекты, степень которых соответствует установленным требованиям, зависящим от области применения изделия. Следует отметить, что в трёхслойной структуре материала не было выявлено разрушений, что объясняется высокой адгезией древесно-полимерного композита с

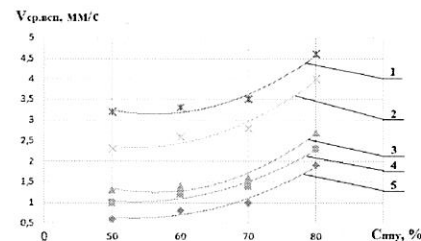


Рисунок 9 – Зависимость скорости вспенивания пенополиуретановой матрицы от концентрации ППУ и остаточного давления среды: 1 – 20 кПа; 2 – 40 кПа; 3 – 60 кПа; 4 – 80 кПа; 5 – 100 кПа

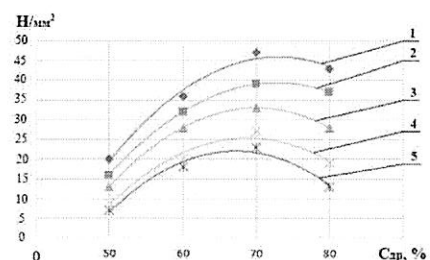


Рисунок 10 – Изменение твёрдости теплоизоляционного слоя в зависимости от концентрации наполнителя и остаточного давления среды: 1 – 60 кПа; 2 – 40 кПа; 3 – 100 кПа; 4 – 80 кПа; 5 – 20 кПа

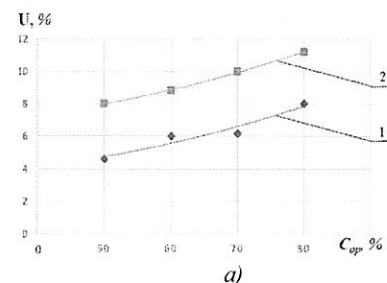


Рисунок 11 – Зависимости водопоглощения (а) и истираемости (б) от концентрации древесного наполнителя: 1 – древесные частицы с изоцианатом (7 %); 2 – древесные частицы без изоцианата

Установлено влияние концентрации древесных частиц и остаточного давления (рис. 9) на скорость вспенивания полимерной матрицы. Увеличение количества пенополиуретана в материале приводит к ускорению процесса вспенивания. Этот эффект можно уменьшить за счёт формирования материала в более плотной среде.

Увеличение концентрации наполнителя до 70 % приводит к повышению твердости образцов (рис. 10). Однако отмечается ухудшение показателя твердости при увеличении доли древесного наполнителя свыше 70 %. Кроме того, установлено влияние остаточного давления в процессе формирования на твердость материала. Наилучшие показатели твердости достигаются при значениях остаточного давления в диапазоне 40 – 60 кПа.

Представленные результаты зависимости водопоглощения и истираемости (рис. 11) указывают на то, что образцы с введением изоцианата демонстрируют уменьшение водопоглощения на 36 % и повышение устойчивости к износу на 20,5 %.

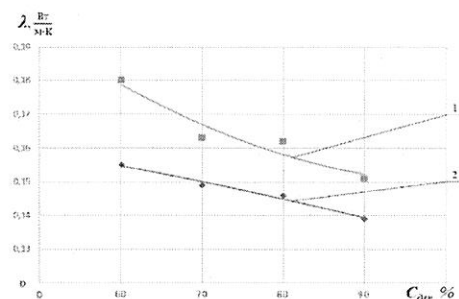


Рисунок 12 – Зависимость коэффициента теплопроводности конструкционного поверхностного слоя от концентрации древесного наполнителя: 1 – древесные частицы с изоцианатом (7%); 2 – древесные частицы без изоцианата

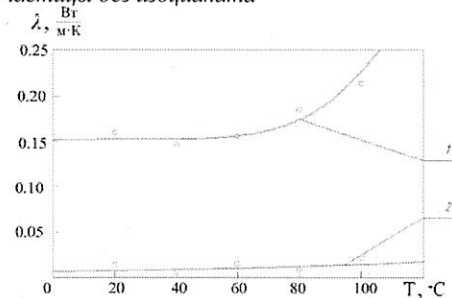


Рисунок 13 – Зависимость теплопроводности от температуры: 1 – для конструкционного поверхностного слоя; 2 – для теплоизоляционного слоя

стеневой материал на основе ДПК с рациональным распределением компонентов в слоях (патент РФ № 2 800 911).

В четвертой главе представлены рекомендации по промышленному использованию результатов исследований по разработке трёхслойного стенового материала на основе ДПК, дано описание инженерной методики расчета. Показана возможность применения аналогичной технологии для получения композитного материала из текстильных отходов и термопластичного полимера. Кроме того, представлено обоснование экономической эффективности внедрения технологического процесса производства трёхслойного древесно-полимерного композиционного материала.

На рисунке 14 представлена технологическая схема получения трёхслойного стенового материала на основе ДПК. На I-ой стадии производится сортировка древесных

Воздействие влаги приводит к частичному отверждению изоцианата и образованию мелких, твердых, абразивных кристаллов.

Увеличение концентрации наполнителя сопровождается снижением теплопроводности материала (рис. 12). Было установлено, что введение изоцианата повышает теплопроводность на 23,3 %. Образование новых связей и улучшение адгезии способствует увеличению плотности композита, повышая при этом теплопроводность.

С увеличением температуры теплопроводность конструкционного поверхностного и теплоизоляционного слоёв материала увеличивается (рис. 13). Одной из причин увеличения теплопроводности с повышением температуры является увеличение количества тепловых колебаний молекул материала. При возрастании температуры частицы начинают вибрировать с большей амплитудой, что способствует более эффективной передаче тепловой энергии между ними. Это приводит к повышению теплопроводности вещества.

На основе полученных результатов разработан трёхслойный

частиц на крупную, среднюю и мелкую фракции. На II-ой стадии производится смешивание мелкой фракции с термопластичным полимером, красителями и

технологическими добавками, включая изоцианат. Конструкционный поверхностный слой формируется, охлаждается и поступает в подпрессовочное устройство. На III-ей стадии производится смешивание средней фракции с термостабильным полимером, красителями и технологическими добавками без изоцианата, формируется декоративный поверхностный слой, охлаждается и поступает в подпрессовочное устройство. На IV-ой стадии производится смешивание крупной фракции с изоцианатом и полиолом с последующей заливкой в подпрессовочное устройство. На V-ой стадии формируется трёхслойный стеновой материал на основе древесно-полимерного композита (ТСМДПК) путём подпрессования всех слоёв с последующей обрезкой до требуемых размеров.

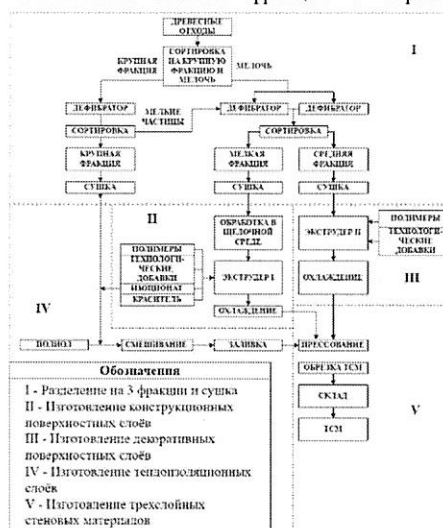


Рисунок 14 – Технологическая схема получения трёхслойного стенового материала на основе древесно-полимерных композитов

Результаты научных исследований приняты к внедрению на ООО НПО «Политехнологии» (г. Казань). При внедрении комплекса по производству трёхслойного стенового материала на основе ДПК ожидается годовой доход в размере 4,9 млн. рублей.

В приложении представлены: статистическая обработка расчетных и экспериментальных данных; расчёт ТСМДПК, как альтернативы ДСТП; расчёт технико-экономических показателей: акт внедрения; дипломы и сертификаты; патенты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен аналитический обзор современных методов производства ДПКМ и технологий переработки древесных отходов, который позволил разработать эффективные методики испытаний. Эти методики направлены на комплексную оценку механических, физических и химических свойств трёхслойного стенового материала, что позволяет выявить оптимальный состав компонентов каждого слоя, улучшить качество и конкурентоспособность конечного продукта.

2. Разработаны методики исследований, которые охватывают испытания на теплопроводность, прочностные характеристики, влагостойкость, атмосферную устойчивость, износостойкость, огнестойкость, биостойкость и морозостойкость. Это позволило определить физико-механические, теплофизические и эксплуатационные

характеристики стенового материала в зависимости от содержания древесного наполнителя и полимерной матрицы.

3. Проведено комплексное исследование эксплуатационных и теплоизоляционных свойств трёхслойного стенового материала, что позволило определить оптимальный состав его слоёв. Структура материала включает:

- конструкционный поверхностный слой, состоящий из полимера (30 – 35 масс.%), древесных частиц волокнистого типа размером от 1 до 2,5 мм (54 – 56 масс.%), изоцианата (7 – 10 масс.%), технологической добавки – технический углерод N330 или полиэтиленовый воск (2 – 3 масс.%), красителя – сополимер этиленвинилацетатный EVA (1 – 2 масс.%);

- декоративный поверхностный слой, состоящий из полимера (20 – 26 масс.%), древесных частиц волокнистого типа размером от 2,5 до 10 мм (70 – 76 масс.%), технологической добавки – технический углерод N330 (2 – 3 масс.%), красителя – КА-2 (1 – 2 масс.%);

- теплоизоляционный слой между поверхностными слоями, состоящий из полиола (10 – 12,5 масс. %), древесных частиц в виде древесных волокон размером от 10 до 15 мм (75 – 80 масс.%), изоцианата (10 – 12,5 масс.%).

4. Разработана методика и алгоритм расчета трёхслойного стенового материала, которая позволяет рекомендовать рациональные параметры изделий в зависимости от содержания древесного наполнителя и климатических условий предполагаемого применения материала. Методика использовалась для исследования и расчёта трёхслойного стенового материала, состоящего из конструкционного и декоративного поверхностных слоёв, между которыми расположен теплоизоляционный слой на основе пенополиуретана и древесных частиц.

5. Разработана опытно-промышленная линия производства трёхслойных стеновых материалов. Основные технико-экономические показатели подтверждают целесообразность внедрения производства трёхслойных стеновых материалов на основе ДПК, ожидаемый экономический эффект составляет 4,9 млн. руб/год.

Результаты исследований позволяют внедрить технологию производства ТСМДПК в промышленное производство, что подтверждается актом о принятии к внедрению.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования предполагают проведение исследований по разработке трехслойных стеновых материалов на основе древесно-полимерных композитов с целью расширения сферы их применения в строительной отрасли, включая использование модифицированных древесных отходов.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в научных журналах и изданиях, входящих в перечень ВАК Минобрнауки России:

1. Саттарова З.Г. Современное состояние технологий производства древесно-полимерных теплоизоляционных материалов / Зиятдинова Д.Ф., Ахметова Д.А., **Фахрутдинов Р.Р.**, Булгар Л.И. // Журнал деревообрабатывающая промышленность. – 2020. – № 1. – С. 62-72.

2. Саттарова З.Г. Теплоизоляционный древесно-полимерный композиционный материал / Сафин Р.Г., **Фахрутдинов Р.Р.**, Байгильдеева Е.И. // Журнал

деревообрабатывающая промышленность. – 2020. – № 4. – С. 46-54.

3. Сафин Р.Г. Влияние различных полимеров и технологических добавок на свойства древесно-полимерных композитов / Байгильдеева Е.И., **Фахрутдинов Р.Р.**, Зиятдинова Д.Ф. // Системы. Методы. Технологии. – 2022. – № 2 (54). – С. 114-118.

Статья в научном издании, сборнике научных трудов и материалов конференций, индексируемом в базах данных Scopus:

4. Сафин Р.Г. Способ получения композиционного материала на основе отходов текстильной промышленности и арабиногалактана / Сафина А.В., Валеев К.В., **Фахрутдинов Р.Р.** // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2021. – № 6 (396). – С. 297-302.

Патенты:

5. Пат. 2731598 Рос. Федерация, МПК E04C 2/24 (2006.01), E04B 1/78 (2006.01). Теплоизоляционная панель / Сафин Р.Г., Саттарова З.Г., **Фахрутдинов Р.Р.**, Сафин Р.Р., Зиятдинова Д.Ф., Тимербаева А.Л., Зиятдинов Р.Р., Ахметова Д.А.; опубл. 04.09.2020, Бюл. № 25. – 8 с.

6. Пат. 2800911 Рос. Федерация, МПК E04C 2/24 (2006.01), E04B 1/76 (2006.01). Теплоизоляционная панель / Сафин Р.Г., **Фахрутдинов Р.Р.**, Галиев И.М., Гареев М.Г.; опубл. 31.07.2023, Бюл. № 22. – 11 с.

Труды в прочих изданиях:

7. Влияние термомодифицирования древесного наполнителя на физические свойства древесно-полимерных композитов / Сафин Р.Г., **Фахрутдинов Р.Р.** // Материалы Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и студентов «Новые материалы и перспективные технологии лесопромышленного комплекса», Воронеж. – 2022. – С. 155-158.

8. Разработка многослойного древесно-полимерного композиционного материала с высокими эксплуатационными свойствами / Сафин Р.Г., **Фахрутдинов Р.Р.**, Гареев М.Г. // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2022 (МНТК "ИМТОМ - 2022"): Материалы XI-й Международной научно-технической конференции, Казань. – 2022. – С. 116-119.

9. Исследование древесно-полимерного композиционного материала из древесных отходов и пенополиуретана / **Фахрутдинов Р.Р.**, Гареев М.Г. // Всероссийская научно-практическая конференция: «Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки», Казань. 2023. – С. 265-267.

10. Древесно-полимерные композиционные материалы / Сафин Р.Г., Галиев И.М., **Фахрутдинов Р.Р.**, Гареев М.Г. // Всероссийская научно-практическая конференция: «Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки», Казань. – 2023. – С. 321-324.

11. Сафин Р.Г. Математическая модель процесса теплопроводности через многослойный древесно-полимерный композиционный материал / **Фахрутдинов Р.Р.**, Байгильдеева Е. И., Тимербаева А. Л. // Вестник технологического университета. – 2024. – Т. 27. – № 2. – С. 77-82.

Заказ №

Тираж 100 экз.

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