



ТЕХНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ
ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСИНЫ И ПРОИЗВОДСТВО
ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ

Научная статья

УДК 691.11

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-4-147-158

**Эксплуатационные характеристики
древесно-полимерных композитов
на основе ацетилированного древесного наполнителя**

А.А. Прокопьев[✉], аспирант; *ResearcherID: [HTM-4658-2023](https://orcid.org/0009-0008-8106-364X)*,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8106-364X>

Н.Р. Галяветдинов, канд. техн. наук, доц.; *ResearcherID: [H-8681-2016](https://orcid.org/0000-0003-4360-7112)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4360-7112>

Р.Р. Сафин, д-р техн. наук, проф.; *ResearcherID: [O-9355-2015](https://orcid.org/0000-0002-0226-4232)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0226-4232>

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
ул. Карла Маркса, д. 68, г. Казань, Россия, 420015; prokopenv.anatolij@mail.ru[✉],
nour777@mail.ru, cfaby@mail.ru

Поступила в редакцию 10.11.23 / Одобрена после рецензирования 12.02.24 / Принята к печати 15.02.24

Аннотация. Спрос на композиционные материалы растет с каждым годом. В связи с этим конкурентоспособность конкретного продукта определяется прежде всего соотношением цены и качества. Самым рациональным вариантом производства древесно-наполненных композитов является использование материалов с повышенными эксплуатационными свойствами. На сегодняшний день именно эксплуатационные качества композиционных материалов наиболее значимы не только для конечных потребителей, но и для производителей. В связи с этим в производстве древесно-наполненных композитов для повышения их эксплуатационных характеристик применяются различные способы предварительной обработки древесины – термомодифицирование, ацетилирование, фурфулирование, сверхвысокочастотная обработка, обработка щелочами, использование различных добавок и т. д. Перспективным способом улучшения физико-механических свойств древесно-наполненных материалов является ацетилирование, механизм которого заключается в образовании ацетильных групп в древесине в процессе обработки. Для уменьшения издержек производства и стоимости конечного продукта возможно использование более дешевого прекурсора (например, ледяной уксусной кислоты вместо уксусного ангидрида) с возможностью интенсификации процесса пропитки. В данной статье представлены результаты получения древесно-наполненных композитов на основе ацетилированной древесной муки березы с ее различной долей в составе. Влияние введения в состав композиции ацетилированного древесного наполнителя на эксплуатационные свойства композитов (стираемость, морозостойкость, прочность на изгиб) оценивали по сравнению с контрольными образцами из

необработанной древесной муки березы. Влияние на структуру древесной муки березы ацетилирования ледяной уксусной кислотой характеризовали с помощью ИК-Фурье-спектроскопии. ИК-спектры контрольного и ацетилированного образцов содержат полосы поглощения, относящиеся к соответствующим группам целлюлозы и лигнина лиственных пород. Коэффициенты истираемости и морозостойкости для древесно-наполненного композита на основе ацетилированной древесной муки березы меньше в среднем в 1,5–2 раза применительно ко всем составам по сравнению с контрольными образцами. Результаты исследования позволяют сделать вывод, что ацетилирование древесной муки как способ предварительной обработки наполнителя с целью повышения эксплуатационных свойств конечной продукции перспективен при реализации на производстве древесно-наполненных материалов.

Ключевые слова: древесная мука, ацетилирование, ледяная уксусная кислота, древесно-наполненный композит, ИК-Фурье-спектроскопия, предел прочности при изгибе, истираемость, морозостойкость

Благодарности: Исследование проведено с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Наноматериалы и нанотехнологии» КНИТУ при финансовой поддержке проекта Минобрнауки России в рамках гранта № 075-15-2021-699.

Для цитирования: Прокопьев А.А., Галяветдинов Н.Р., Сафин Р.Р. Эксплуатационные характеристики древесно-полимерных композитов на основе ацетилированного древесного наполнителя // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 4. С. 147–158. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-147-158>

Original article

Performance Characteristics of Wood-Polymer Composites Based on Acetylated Wood Filler

Anatoliy A. Prokopiev[✉], Postgraduate Student; ResearcherID: [HTM-4658-2023](https://orcid.org/0009-0008-8106-364X),

ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8106-364X>

Nour R. Galyavetdinov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [H-8681-2016](https://orcid.org/0000-0003-4360-7112), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4360-7112>

Ruslan R. Safin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [O-9355-2015](https://orcid.org/0000-0002-0226-4232),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0226-4232>

Kazan National Research Technological University, ul. K. Marksa, 68, Kazan, 420015, Russian Federation; prokopev.anatolij@mail.ru[✉], nour777@mail.ru, cfaby@mail.ru

Received on November 10, 2023 / Approved after reviewing on February 12, 2024 / Accepted on February 15, 2024

Abstract. The demand for composite materials is growing every year. In this regard, the competitiveness of a particular product is determined primarily by the price-quality ratio. The most rational option for the production of wood-filled composites is using the materials with the increased performance characteristics. To date, it is the performance characteristics of modern composite materials that are the most significant, not only for final consumers, but also for manufacturers. In this regard, to improve performance characteristics in the production of wood-filled composites, various methods of pre-treatment of wood are used – thermal modification, acetylation, furfulation, ultra-high-frequency processing, alkali treatment, the use of various additives, etc. A promising way to improve the physical and mechanical properties of wood-filled materials is acetylation, whose mechanism consists in



the formation of acetyl groups in wood during processing. To reduce production costs and the cost of the final product, it is possible to use a cheaper precursor (for example, icy acetic acid instead of acetic anhydride) with the possibility of intensifying the impregnation process. This article presents the results of obtaining wood-filled composites based on acetylated birch wood flour with its various proportions in the composition. The effect of introducing acetylated wood filler into the composition on the performance properties of composites (abrasability, frost-resistance, flexural strength) has been evaluated in comparison with control samples made from untreated birch wood flour. The effect of acetylation with glacial acetic acid on the structure of birch wood flour has been characterized using Fourier-transform infrared spectroscopy. The IR-spectra of the control and acetylated samples contain absorption bands belonging to the corresponding groups of cellulose and lignin of hardwoods. The abrasability and frost-resistance coefficients for a wood-filled composite based on acetylated birch wood flour are on average 1.5–2 times lower for all compositions compared to control samples. The results of the research allow us to conclude that acetylation of wood flour as a method of pre-treatment of the filler in order to improve the performance characteristics of the final product is promising for implementation in the production of wood-filled materials.

Keywords: wood flour, acetylation, glacial acetic acid, wood-filled composite, IR-Fourier spectroscopy, ultimate flexural strength, abrasability, frost-resistance

Acknowledgements: The research was carried out using the equipment of the Center for Collective Use “Nanomaterials and Nanotechnology” of Kazan National Research Technological University with the financial support of the project from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the grant no. 075-15-2021-699.

For citation: Prokopiev A.A., Galyavetdinov N.R., Safin R.R. Performance Characteristics of Wood-Polymer Composites Based on Acetylated Wood Filler. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2024, no. 4, pp. 147–158. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-4-147-158>

Введение

Необходимость использования экологически чистых ресурсов возникла в связи с концепцией рационального природопользования. С ростом спроса на пластмассы и древесные материалы увеличилось загрязнение окружающей среды. Следовательно, в строительной отрасли быстро повышается интерес к полимерным композитам, армированным натуральными волокнами, главным образом для замены композитов из синтетических волокон. Особый интерес представляет производство экологически чистых композиционных материалов. Современные материалы, используемые для изготовления композитов на основе древесины, имеют недостатки, такие как низкое межфазное сцепление и, соответственно, более быстрый износ [13]. Для решения данной проблемы существуют химические способы предварительной обработки древесины, одним из которых является ацетилирование.

Большинство авторов [2–6, 8–11, 14–20, 22–24] относят ацетилирование древесного наполнителя и цельной древесины как самостоятельного строительного материала к наиболее эффективным методам обработки. Это не только позволяет улучшить физико-механические свойства материалов, но и придает им биостойкость, защищая композит и цельную древесину от различных насекомых-вредителей, а также от гниения из-за заражения грибами.

В статьях зарубежных исследователей поставлен вопрос использования предварительно ацетилированной древесины как в качестве самостоятельного материала, так и при получении древесно-наполненных композитов.

Авторы [12] рассматривали ацетилирование как один из распространенных процессов модификации древесины. Предлагали использование модифицированного шпона для компонентов транспортных средств, изучая при этом устойчивость ацетилированного шпона из сосны к автомобильным химикатам (дистиллированная вода, ацетон, дизельное топливо, бензин, антифриз). Образцы подвергали воздействию химических веществ с последующим испытанием на растяжение, чтобы оценить влияние этих химических веществ на механические свойства шпона. Наибольшее увеличение массы образца наблюдалось при погружении в дистиллированную воду. При этом статистически значимого действия химических веществ на прочность при растяжении не отмечено.

В работе [21] древесную муку подвергали реакции с малеиновым ангидридом. Обработанный образец смешивали с диаллилфталатом перед горячим прессованием. Все модифицированные образцы показали хорошие результаты при испытаниях на водопоглощение. Они имели большую стабильность в воде, чем необработанные. ИК-спектроскопия позволила установить, что ненасыщенные малеатные компоненты вступили в реакцию с диаллилфталатом, что, в свою очередь, могло повлиять на конечные свойства композита.

В статье [7] проанализированы механические свойства различных композитов на основе древесины сосны, дуба, рапсовой соломы и изотактического полипропилена. Поверхность наполнителя была ацетилирована уксусным ангидридом для улучшения совместимости гидрофильных лигноцеллюлозных компонентов с гидрофобной полипропиленовой матрицей. Наполнитель в количестве 30 мас. ч. смешивали с полипропиленом, полученную смесь экструдировали и формовали под давлением. Химическая модификация оказалась успешной в повышении прочности композитов на основе ацетилированного наполнителя. Результаты, касающиеся механических свойств композитов, их эстетического качества и возможности применения в различных областях, указывают на рентабельность производства лигноцеллюлозных композитов со связующим из полипропилена. Композиты с древесиной или рапсовой соломой имеют сходные прочность при разрыве и твердость. Тип лигноцеллюлозных компонентов и используемая химическая обработка не влияют на эти механические параметры.

Обзор существующих исследований доказывает эффективность ацетилирования как способа предварительной обработки, однако возможность использования ледяной уксусной кислоты в качестве реагирующего агента изучена в недостаточной степени.

Цель работы – рассмотрение влияния ацетилирования в среде ледяной уксусной кислоты на химическую структуру древесного наполнителя, а также сравнительная характеристика эксплуатационных свойств различных составов древесно-наполненного композиционного материала, изготовленного из обычного и модифицированного древесного наполнителя.

Объекты и методы исследования

Объектами исследования служили древесная мука березы, ацетилюрованная в среде ледяной уксусной кислоты по ГОСТ 61–75 при комнатной температуре в течение 72 ч и высушенная до постоянной массы в вакуумно-сушильном шкафу Memmert 400 при температуре 100 °С, а также образцы композитов в форме балочек длиной 80 мм, шириной 10 мм и толщиной 5 мм, полученных как из обычного, так и из ацетилюрованного древесного наполнителя (см. таблицу).

Состав исследованных древесно-наполненных композитов**The composition of the wood-filled composites under study**

Древесная мука	Состав, мас. ч.	
	ПВД	Наполнитель
Ацетилюванная (72 ч)	80	20
	70	30
	60	40
	50	50
	40	60
Необработанная	80	20
	70	30
	60	40
	50	50
	40	60

ИК-спектры контрольного и ацетилюванного образцов (рис. 1) древесной муки березы снимали на отечественном ИК-Фурье-спектрометре ФСМ 1202 с помощью приставки многократного нарушенного полного внутреннего отражения в диапазоне измерений 650–4000 см⁻¹ при разрешении 4,0 см⁻¹.

В качестве полимерного связующего для получения композитов использовали полиэтилен высокого давления (ПВД) марки 10803-020 по ГОСТ 16337–2022.

Смешение древесной муки и ПВД осуществляли в камере смесителя Brabender при температуре 145 °С и скорости вращения роторов 100 об./мин. В течение 5 мин после получения смешанной массы композит был пропущен через лабораторные вальцы с зазором 3 мм.

Далее с целью исследования эксплуатационных свойств древесно-наполненных композитов методом литья под давлением в инжекционной литьевой машине для пробоподготовки при температуре 145 °С с давлением впрыска 8 бар были получены стандартные образцы в виде полосок и определены предел прочности при растяжении по ГОСТ 11262–2017, истираемость по ГОСТ 11012–2017 и морозостойкость по ГОСТ 22346–2017.

Результаты исследования и их обсуждение

Для выявления влияния ацетилирования на структуру древесной муки были изучены ИК-спектры контрольного и ацетилированного образцов муки березы (рис. 1).

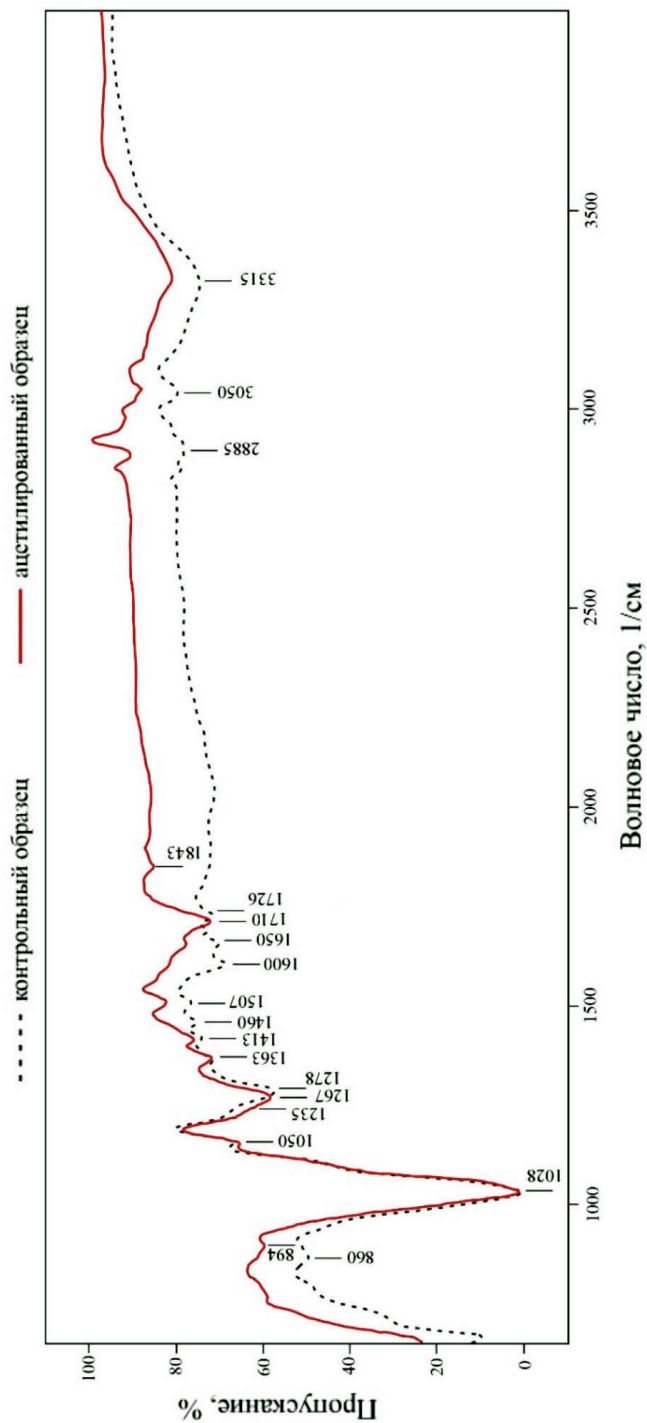
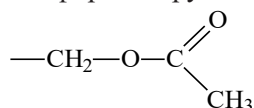


Рис. 1. ИК-спектры образцов древесной муки из березы
Fig. 1. The IR-spectra of birch wood flour samples

ИК-спектры контрольного и ацетилизованного образцов содержат характеристические полосы поглощения, относящиеся к группам целлюлозы и лигнина листовых пород. Широкая полоса поглощения с максимумом в области 3315 см^{-1} маркирует валентные колебания гидроксильных групп фенолов, связанных межмолекулярными водородными связями. Деформационные колебания гидроксильных групп фенолов проявляются в области 1363 см^{-1} . В области $2885\text{--}3050\text{ см}^{-1}$ присутствуют валентные колебания связей С–Н в метильных и метиленовых группах.

Валентные колебания связей С=О в сложноэфирных группах, согласно литературным данным [1], проявляются в областях $1740\text{--}1710\text{ см}^{-1}$. В ИК-спектре контрольного образца этому диапазону соответствует полоса поглощения в области 1726 см^{-1} . Также в литературе отмечается [1], что валентные колебания группы С=О кетонов и альдегидов наблюдаемы в широком диапазоне частот: $1540\text{--}1870\text{ см}^{-1}$. Так, в ИК-спектре ацетилизованного образца появляется широкая полоса поглощения с максимумом в области 1710 см^{-1} . Вероятно, в результате взаимодействия ледяной уксусной кислоты с $\text{--CH}_2\text{OH}$ -группами лигнина происходит образование сложноэфирных групп:



Это взаимодействие подтверждается появлением пика малой интенсивности в области 1843 см^{-1} в ИК-спектре ацетилизованного образца и отсутствием пика в области 1460 см^{-1} , отвечающего за деформационные колебания связи С–Н в CH_2OH -группах мономерных звеньев лигнина [1]. Малая интенсивность пика 1843 см^{-1} , предположительно, связана с тем, что реакция по гидроксильным группам глюкозы с ледяной уксусной кислотой затруднена.

Обращает на себя внимание полоса поглощения контрольного образца в области 1600 см^{-1} , соответствующая валентным колебаниям связи С=О паразамещенных фенолов G-колец лигнинов с одной группой --OCH_3 . В данной области также могут проявляться валентные колебания связи С=О паразамещенных фенолов S-колец лигнинов с 2 группами --OCH_3 . Возможно, эта полоса поглощения перекрывается широкой полосой поглощения с максимумом 1710 см^{-1} .

Валентные колебания связи С=О паразамещенных фенолов H-колец лигнинов отмечены в области 1650 см^{-1} . Полоса поглощения в области 1507 см^{-1} соответствует скелетным колебаниям связей С–С ароматического гваяцильного кольца. Полосы поглощения в области $1267\text{--}1278\text{ см}^{-1}$ – скелетным колебаниям G-кольца. В этих же областях накладываются деформационные колебания связи С=О. Скелетные колебания связей С–С G-колец лигнинов и валентные колебания С–О в фенолах гваяцильных структурных единиц проявляются в области 1235 см^{-1} . Интенсивная полоса поглощения с максимумом 1028 см^{-1} соответствует деформационным плоскостным колебаниям связей С–Н в ароматическом кольце и несопряженным колебаниям связей С=О целлюлозы. Полоса поглощения в области 894 см^{-1} отражает деформационные внеплоскостные колебания связей С–Н в S- и G-ароматических кольцах. Полоса поглощения в области 860 см^{-1} – деформационные внеплоскостные колебания связей С–Н в положениях 2, 5 и 6 ароматического G-кольца [1].

Для оценки влияния вида (ацелированный и обычный) и количества применяемого древесного наполнителя на эксплуатационные свойства (прочность на изгиб, морозостойкость, истираемость) композитов были изготовлены 10 групп образцов (5 групп – с ацелированной древесной мукой березы, 5 групп – с обычной древесной мукой березы). Погрешность измерений составила ± 1 %.

Влияние концентрации и предварительной обработки наполнителя на предел прочности образцов композитов при изгибе показано на рис. 2.

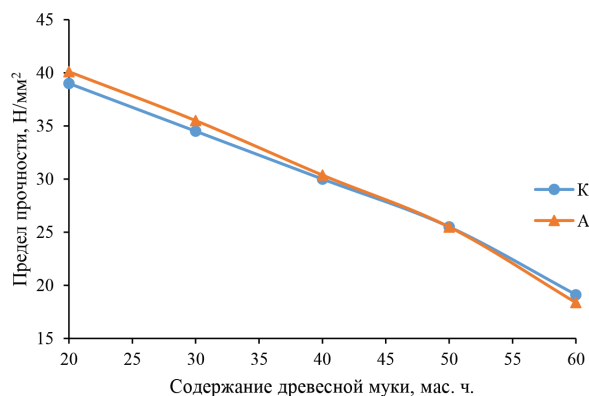


Рис. 2. Влияние концентрации и предварительной обработки наполнителя композитов на предел прочности при изгибе: К – контрольные образцы; А – ацелированные образцы (здесь и далее)

Fig. 2. The effect of concentration and pre-treatment of the filler of the composites on flexural strength limit: K – control samples; A – acetylated samples (hereinafter)

Анализ рис. 2 указывает на то, что увеличение количества древесного наполнителя в композите приводит к снижению предела прочности при изгибе, однако использование ацелированной древесной муки не оказывает существенного влияния на прочность по сравнению с композитами из обычной древесной муки. Наибольшая разница предела прочности при изгибе достигает 3 %. Это говорит об отсутствии негативного влияния на прочностные свойства материала использования ацелированной древесной муки в композите.

На рис. 3 представлены результаты определения морозостойкости образцов композитов, которая установлена по коэффициенту сохранения свойств после 20 циклов замораживания и оттаивания.

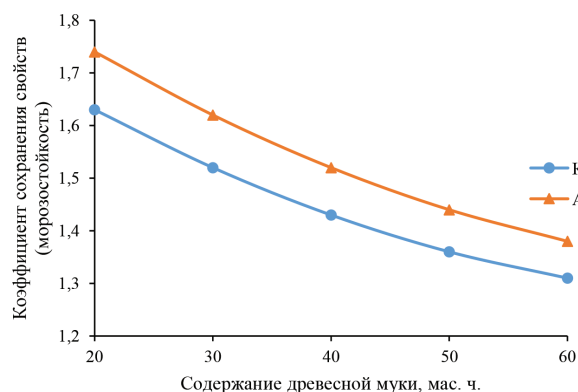


Рис. 3. Влияние концентрации и предварительной обработки наполнителя композитов на морозостойкость

Fig. 3. The effect of concentration and pre-treatment of the filler of the composites on frost-resistance

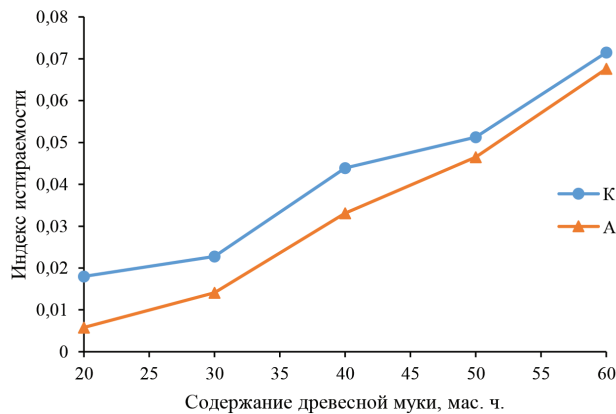
Как видно на рис. 3, увеличение доли древесного наполнителя в композите приводит к снижению коэффициента сохранения свойств. В то же время для композитов с ацелированным наполнителем морозостойкость выше, чем для контрольных образцов. Это можно объяснить тем, что в результате ацелирования древесного наполнителя происходит замещение свободных ОН-групп

ацетильными, что, в свою очередь, препятствует проникновению жидкости в структуру материала. Благодаря этому спустя 20 циклов попеременного замораживания и оттаивания композиты с ацетилированным древесным наполнителем показывают наилучшую стойкость к подобному воздействию.

На рис. 4 представлены результаты исследования индекса истираемости образцов композитов.

Рис. 4. Влияние концентрации и предварительной обработки наполнителя композитов на индекс истираемости

Fig. 4. The effect of concentration and pre-treatment of the filler of the composites on the abrasability index



Таким образом, полученные результаты позволяют сделать вывод, что показатели для древесно-наполненного композита на основе ацетилированной древесной муки березы меньше в среднем в 1,5–2 раза применительно ко всем составам по сравнению с контрольными образцами. Это говорит об эффективности ацетилирования в качестве способа обработки древесного наполнителя.

Выводы

1. В результате ацетилирования ледяной уксусной кислотой древесной муки из березы основная структура лигнина и целлюлозы сохраняется, о чем свидетельствует появление пика малой интенсивности в области 1843 см^{-1} в ИК-спектре ацетилированного образца и отсутствие пика в области 1460 см^{-1} , отвечающего за деформационные колебания связи C–H в CH_2OH -группах мономерных звеньев лигнина. Однако происходит преобразование отдельных функциональных групп в результате взаимодействия ледяной уксусной кислоты с $-\text{CH}_2\text{OH}$ -группами мономерных звеньев лигнина с максимумом в области 1710 см^{-1} с образованием сложноэфирных групп.

2. Использование ацетилированного древесного наполнителя не оказывает негативного влияния на предел прочности при изгибе для всех исследованных составов (наибольшая разница в значениях предела прочности при изгибе достигает 3 %).

3. Изменение морозостойкости по коэффициенту сохранения свойств имело общую тенденцию для всех составов композита, при этом с увеличением концентрации наполнителя коэффициент уменьшался, однако композиты с ацетилированным древесным наполнителем показали лучший результат (5–6 % для всех составов) по сравнению с контрольными образцами. Это может быть связано с преобразованиями в химической структуре наполнителя, ввиду чего проникновение жидкости в глубь материала может быть затруднено.

4. Для композитов с ацелированным древесным наполнителем отмечен наилучший результат по индексу истираемости, однако наибольшие различия наблюдали для образцов с 20%-м содержанием древесного наполнителя (67 %), в то же время по мере увеличения доли древесного наполнителя в составе композиции разница значений между композитами с ацелированным и обычным древесным наполнителем уменьшалась и для образцов с 60%-м содержанием наполнителя составила 5,5 %. В целом снижение истираемости композитов может положительно сказаться на их долговечности, при этом универсальным составом с точки зрения эффективности может служить композит с 40 % древесного наполнителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Пожидаев В.М., Ретивов В.М., Панарина Е.И., Сергеева Я.Э., Жданович О.А., Яцшишина Е.Б. Разработка метода идентификации породы древесины в археологических материалах методом ИК-спектроскопии // Журн. аналит. химии. 2019. Т. 74, № 12. С. 911–921.
Pozhidaev V.M., Retivov V.M., Panarina E.I., Sergeeva Ya.E., Zhdanovich O.A., Yatsishina E.B. Development of a Method for Identifying Wood Species in Archaeological Materials by IR Spectroscopy. *Zhurnal analiticheskoy khimii* = Journal of Analytical Chemistry, 2019, vol. 74, no. 12, pp. 911–921. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0044450219120107>
2. Прокопьев А.А., Салимгараева Р.В., Сафин Р.Р. Обзор современных исследований в области ацелирования древесины // Деревообработ. пром-сть. 2022. № 2. С. 106–114.
Prokopiev A.A., Salimgaraeva R.V., Safin R.R. Review of Modern Research in the Field of Wood Acetylation. *Derevoobrabativalnaya promishlennost'* = Woodworking Industry, 2022, no. 2, pp. 106–114. (In Russ.).
3. Прокопьев А.А., Салимгараева Р.В., Сафин Р.Р. Исследование свойств ацелированной древесины // Деревообработ. пром-сть. 2023. № 1. С. 86–91.
Prokopiev A.A., Salimgaraeva R.V., Safin R.R. Investigation of the Properties of Acetylated Wood. *Derevoobrabativalnaya promishlennost'* = Woodworking Industry, 2023, no. 1, pp. 86–91. (In Russ.).
4. Прокопьев А.А., Салимгараева Р.В., Сафин Р.Р. Исследование свойств древесно-полимерных композитов на основе ацелированного древесного наполнителя // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 2(58). С. 99–106.
Prokopiev A.A., Salimgaraeva R.V., Safin R.R. Investigation of the Properties of Wood-Polymer Composites Based on Acetylated Wood Filler. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* = Systems. Methods. Technologies, 2023, no. 2(58), pp. 99–106. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2023-2-99-106>
5. Alfredsen G., Pilgård A. *Postia placenta* Decay of Acetic Anhydride Modified Wood – Effect of Leaching. *Wood Material Science & Engineering*, 2014, vol. 9, iss. 3, pp. 162–169. <https://doi.org/10.1080/17480272.2014.887776>
6. Bongers F., Meijerink T., Lütke-meier B., Lankveld C., Alexander J., Miltz H., Lehringer C. Bonding of Acetylated Wood. *International Wood Products Journal*, 2016, vol. 7, iss. 2, pp. 102–106. <https://doi.org/10.1080/20426445.2016.1161944>
7. Borysiak S., Pauksza D. Mechanical Properties of Lignocellulosic / Polypropylene Composites. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2008, vol. 484, no. 1, pp. 13/379 – 22/388. <https://doi.org/10.1080/15421400801901464>

8. Çetin N.S., Özmen N., Birinci E. Acetylation of Wood with Various Catalysts. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2011, vol. 31, iss. 2, pp.142–153. <https://doi.org/10.1080/02773813.2010.503981>
9. Eranna P.B., Pandey K.K., Nagarajappa G.B. A Note on the Effect of Microwave Heating on Iodine-Catalyzed Acetylation of Wood. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2016, vol. 36, iss. 3, pp. 205–210. <https://doi.org/10.1080/02773813.2015.1112405>
10. Fodor F., Németh R., Lankveld C., Hofmann T. Effect of Acetylation on the Chemical Composition of Hornbeam (*Carpinus betulus* L.) in Relation with the Physical and Mechanical Properties. *Wood Material Science & Engineering*, 2018, vol. 13, iss. 5, pp. 271–278. <https://doi.org/10.1080/17480272.2017.1316773>
11. Hamid N.H., Hale M. Decay Threshold of Acetylated Rattan against White and Brown Rot Fungi. *International Wood Products Journal*, 2012, vol. 3, iss. 2, pp. 96–106. <https://doi.org/10.1179/2042645311Y.0000000018>
12. Joeressen J., Baumann G., Spirk S., Krenke T., Schönauer T., Feist F. Chemical Resistance of Acetylated Radiata Pine Sliced Veneers. *Wood Material Science & Engineering*, 2022, vol. 18, iss. 4, pp. 1467–1477. <https://doi.org/10.1080/17480272.2022.2155565>
13. Khoaele K.K., Gbadeyan O.J., Chunilall V., Sithole B. A Review on Waste Wood Reinforced Polymer Composites and Their Processing for Construction Materials. *International Journal of Sustainable Engineering*, 2023, vol. 16, iss. 1, pp. 104–116. <https://doi.org/10.1080/19397038.2023.2214162>
14. Li J.-Z., Furuno T., Zhou W.-R., Ren Q., Han X.-Z., Zhao J.-P. Properties of Acetylated Wood Prepared at Low Temperature in the Presence of Catalysts. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2009, vol. 29, iss. 3, pp. 241–250. <https://doi.org/10.1080/02773810903009499>
15. Marsich L., Cozzarini L., Ferluga A., Solinas D., Schmid C. The Effect of Acetylation on Hybrid Poplar after Artificial Weathering. *International Wood Products Journal*, 2018, vol. 9, iss. 3, pp. 134–141. <https://doi.org/10.1080/20426445.2018.1513893>
16. Pizzi A., Zhou X., Navarrete P., Segovia C., Mansouri H.R., Placentia Pena M.I., Pichelin F. Enhancing Water Resistance of Welded Dowel Wood Joints by Acetylated Lignin. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2013, vol. 27, iss. 3, pp. 252–262. <https://doi.org/10.1080/01694243.2012.705512>
17. Popescu C.M., Hill C.A.S., Popescu M.C. Water Adsorption in Acetylated Birch Wood Evaluated through Near Infrared Spectroscopy. *International Wood Products Journal*, 2016, vol. 7, iss. 2, pp. 61–65. <https://doi.org/10.1080/20426445.2016.1160538>
18. Rowell R.M. Acetylation of Natural Fibers to Improve Performance. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2004, vol. 418, iss. 1, pp. 153–164. <https://doi.org/10.1080/15421400490479244>
19. Rowell R.M. Chemical Modification of Wood: A Short Review. *Wood Material Science & Engineering*, 2006, vol. 1, iss. 1, pp. 29–33. <https://doi.org/10.1080/17480270600670923>
20. Rowell R.M., Ibach R.E., McSweeney J., Nilsson T. Understanding Decay Resistance, Dimensional Stability and Strength Changes in Heat-Treated and Acetylated Wood. *Wood Material Science & Engineering*, 2009, vol. 4, iss. 1–2, pp. 14–22. <https://doi.org/10.1080/17480270903261339>
21. Rozman H.D., Kumar R.N., Khalil H.P.S.A., Abusamah A., Abu R. Chemical Modification of Wood with Maleic Anhydride and Subsequent Copolymerization with Diallyl Phthalate. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 1997, vol. 17, iss. 4, pp. 419–433. <https://doi.org/10.1080/02773819708003142>

22. Sethy A.K., Vinden P., Torgovnikov G., Militz H., Mai C., Kloeser L., Przewloka S. Catalytic Acetylation of *Pinus radiata* (D. Don) with Limited Supply of Acetic Anhydride Using Conventional and Microwave Heating. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2012, vol. 32, iss. 1, pp. 1–11. <https://doi.org/10.1080/02773813.2011.573121>

23. Wålinder M., Brelid P.L., Segerholm K., Long C.J., Dickerson J.P. Wettability of Acetylated Southern Yellow Pine. *International Wood Products Journal*, 2013, vol. 4, iss. 3, pp. 197–203. <https://doi.org/10.1179/2042645313Y.0000000045>

24. Zelinka S.L., Passarini L. Corrosion of Metal Fasteners Embedded in Acetylated and Untreated Wood at Different Moisture Contents. *Wood Material Science & Engineering*, 2018, vol. 15, iss. 4, pp. 182–189. <https://doi.org/10.1080/17480272.2018.1544171>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest