УДК 678.046.52 DOI: 10.18324/2077-5415-2026-3-210-217

Ацетилирование как способ переработки измельчённых древесных отходов в процессе наполнения полимерной матрицы

А.А. Прокопьев[a], Р.Р. Хасаншин[b], Р.Р. Сафин[c]

Казанский национальный исследовательский технологический университет, ул. Карла Маркса, 68, Казань, Россия
[a] prokopev.anatolij@mail.ru,[b] rusl2881@mail.ru, [c] cfaby@mail.ru.
[a] https://orcid.org 0009-0008-8106-364X, [b] https://orcid.org 0000-0002-4250-7358,
[c] https://orcid.org 0000-0002-0226-4232.
Статья поступила 26.08.2026, принята 10.09.2026.

На фоне устойчивого роста масштабов применения полимерных композитов в различных отраслях промышленности особую актуальность приобретает вопрос увеличения содержания наполнителя как основного способа удешевления готовой продукции. Однако экономический эффект от применения данного подхода не должен достигаться в ущерб эксплуатационным характеристикам материалов, которые должны оставаться на стабильно высоком уровне. В связи с этим проведено исследование, направленное на обоснование применения ацетилированного древесного наполнителя и оценку его влияния на физические, механические и термические свойства композитов при различной степени наполнения полимера. По результатам проведённых исследований установлено, что плотность композитов с ацетилированной древесной мукой не имеет существенных отличий от показателей образцов с немодифицированным наполнителем во всём диапазоне исследованных составов. Анализ механических характеристик выявил повышение твёрдости композитов с ацетилированным наполнителем относительно контрольных образцов. Это объясняется улучшением адгезионного взаимодействия на границе раздела фаз между полимерным связующим и поверхностью наполнителя из древесины. Положительный эффект от ацетилирования наполнителя нашёл своё подтверждение и при оценке прочностных свойств материалов при воздействии растягивающих усилий. Модифицирование древесной муки позволило получить композиты, не уступающие контрольным образцам по прочностным испытаниям. Более того, для наполнителя на уровне 40 и 50 мас. % зафиксировано двукратное превышение прочности по сравнению с контрольными образцами. При повышении концентрации ацетилированной древесной муки с 20 до 50 мас. % себестоимость материала для полимерных композитов получается на 25 % ниже, чем у контрольного образца. Данный факт формирует экономически значимые предпосылки при переходе к промышленному производству.

Ключевые слова: наполнитель; древесная мука; полимер; древесно-полимерный композит; ацетилирование; химическая обработка; эксплуатационные свойства; твёрдость; температура размягчения по Вика.

Acetylation as a method of processing comminuted wood waste in the process of filling a polymer matrix

A.A. Prokopiev[a], R.R. Khasanshin[b], R.R. Safin[c]

Kazan National Research Technological University; 68, Karl Marx St., Kazan, Russia
[a] prokopev.anatolij@mail.ru,[b] rusl2881@mail.ru, [c] cfaby@mail.ru.
[a] https://orcid.org 0009-0008-8106-364X, [b] https://orcid.org 0000-0002-4250-7358,
[c] https://orcid.org 0000-0002-0226-4232.
Received 26.08.2026, accepted 10.09.2026.

Against the background of a steady increase in the use of polymer composites in various industries, the issue of increasing the filler content as the main way to reduce the cost of finished products is becoming particularly relevant. However, the economic effect of this approach should not be achieved at the expense of the performance characteristics of the materials, which should remain at a consistently high level. In this regard, a study has been conducted aimed at substantiating the use of acetylated wood filler and assessing its effect on the physical, mechanical and thermal properties of composites with varying degrees of polymer filling. According to the results of the conducted studies, it has been found that the density of composites with acetylated wood flour does not significantly differ from those of samples with unmodified filler in the entire range of compositions studied. An analysis of the mechanical characteristics reveals an increase in the hardness of composites with acetylated filler relative to the control samples. This is due to the improved adhesive interaction at the interface between the polymer binder and the surface of the wood filler. The positive effect of acetylation of the filler has also been confirmed when evaluating the strength properties of materials under the influence of tensile forces. The modification of wood flour makes it possible to obtain composites that are not inferior to the control samples in strength tests. Moreover, for filler contents of 40 and 50 wt. %, a twofold excess of strength was recorded compared with the control samples. With an increase in the concentration of acetylated wood flour from 20 to 50 wt. %, the cost of the material for polymer composites is 25 % lower than that of the control sample. This fact creates economically significant prerequisites for the transition to industrial production.

Keywords: filler; wood flour; polymer; wood-polymer composite; acetylation; chemical treatment; performance properties; hardness; Vicat softening temperature.

Введение. Наряду с экономическими показателями, одним из ключевых критериев эффективности композиционных материалов в практическом применении выступает их долговечность [4, 13, 14]. Данный параметр находится в прямой зависимости от комплекса физико-механических характеристик и эксплуатационных свойств композитной матрицы, которые определяют структурную целостность и устойчивость материала в течение жизненного цикла [2–3]. С целью оптимизации эксплуатационного потенциала ДПК приоритетным направлением научных исследований является совершенствование методом модификации древесного наполнителя [17–21]. Среди существующих способов модификации древесного наполнителя особую значимость приобретает химическая обработка ацетилированием [5–10], позволяющая целенаправленно регулировать эксплуатационные свойства наполнителя за счёт замещения гидроксильных групп (-OH) полимеров древесины (целлюлозы, лигнина) на ацетильные (-O-CO-CH_3), что способствует улучшению совместимости наполнителя с полимерным связующим. Данная химическая обработка позволяет снизить гидрофильность материала, повысить его биологическую стойкость и размерную стабильность без использования токсичных биоцидов. Благодаря этому ацетилированная древесина характеризуется как экологически безопасный материал [23].

Ацетилирование древесины представляет собой реакцию этерификации. Основное уравнение реакции имеет следующий вид [22, 24]:

$$\text{WOOD-OH} + (CH_3CO)_2O \rightarrow \text{WOOD-O-CO-}CH_3 + CH_3COOH$$

где WOOD-OH – древесина с гидроксильными группами; $(CH_3CO)_2O$ – уксусный ангидрид; WOOD-O-CO-CH_3 – ацетилированная древесина; CH_3COOH – уксусная кислота (побочный продукт).

В качестве катализаторов могут использоваться пиридин, серная кислота, диметиланилин и другие соединения, ускоряющие реакцию и способствующие набуханию клеточной стенки для лучшей диффузии реагента [22].

Установлено, что ацетилирование древесины значительно повышает её устойчивость к поражению грибами [22, 25]. Это объясняется снижением равновесной влажности ниже критического уровня (18–20 %) необходимого для развития большинства дереворазрушающих грибов, а также изменением химической структуры материала. Как следует из работы [24] подвергнутая обработке бальсовая древесина устойчива к различным видам дереворазрушающих грибов. В почвенных тестах с *Poria microspora* и *Poria incrassata* ацетилированные образцы показали высокую сохранность, а после трёх месяцев воздействия *Polyporus versicolor* потеря массы составила лишь 0,2 % против 50,1 % у необработанных материалов.

В работе [1] методом инфракрасной спектроскопии проанализированы структурные преобразования древесной муки в процессе ацетилирования ледяной уксусной кислотой. Выявлено, что основные структурные элементы лигнина и целлюлозы в материале сохраняются в неизменном виде. Свидетельством тому служат регистрируемые в ИК-спектрах интенсивные сигналы от углеводных фрагментов, причём как для контрольных, так и для модифицированных элементов. Наряду с этим отмечена модификация некоторых функциональных групп в структуре лигнина, ведущая к образованию сложных эфирных связей (ацетатных групп).

Авторами [11, 12] были проведены исследования с помощью сканирующей электронной микроскопии, чтобы выявить влияние ацетилирования на микроскопическую структуру древесины граба. Ацетилирование не повредило микроструктуру древесины и значительно увеличило толщину клеточных стенок на 7,0 %. Каждая клетка содержала небольшое количество нерастворимого вещества, что привело к гипотезе о том, что естественное содержимое живых клеток становится нерастворимым в процессе ацетилирования.

В работе [15] оценивали влияние ацетилирования на долговечность древесины тополя при атмосферных воздействиях. Для оценки использовали такие методы, как анализ изменения цвета, механические испытания, инфракрасную спектроскопию, а также замеры влагопоглощения. Ацетилирование выполняли на материале без какой-либо предварительной обработки, эффективность которого контролировали с помощью ИК-спектроскопии и увеличения массовой доли. Средний зафиксированный прирост массы составил 14,4 ± 0,6 %. Установлено, что ацетилирование приводит к росту механических показателей древесины и уменьшению её способности впитывать влагу. Механические свойства как ацетилированной, так и необработанной древесины показали одинаковую тенденцию, но ацетилированные образцы показали более высокую жёсткость, прочность и относительное удлинение при разрыве.

В исследовании [16] сердцевину криптомерии японской *(Cryptomeria japonica)* подвергли парофазному ацетилированию для выяснения зависимости между толщиной модифицированного слоя и биостойкостью древесины к грибковому поражению. По сравнению с необработанными образцами, древесина, ацетилированная парами уксусного ангидрида при температуре 80–85 °C в течение 70 часов, показала существенно высокую грибкостойкость и продемонстрировала стабильность размеров после пропитки в воде.

Известно, что при получении древесно-полимерных композитов к числу основных проблем относится низкая совместимость гидрофильного древесного наполнителя и гидрофобной полимерной матрицы (полипропилена). Это приводит к недостаточному смачиванию наполнителя, образованию агломератов и слабому межфазному взаимодействию, что отрицательно сказывается на механических свойствах композитов. В работах [24, 25] установлено, что ацетилирование древесного сырья позволяет решить проблему совместимости за счёт снижения гидрофильности поверхности древесных частиц, увеличения гидрофобности и повышения адгезионного взаимодействия на границе раздела фаз.

Таким образом, целью настоящей работы является исследование влияния ацетилированной древесной муки на наполнение полимерной матрицы в композиционном материале. Будут рассмотрены физико-механические (плотность, твёрдость, прочность при растяже-

нии) и термические (температура размягчения) характеристики древесно-полимерных композитов в сопоставлении с контрольными образцами.

Объекты и методы исследования. Наполнителем образцов композитов использовали древесную муку, полученную из березы, гранулометрической фракцией 180 мкм, отвечающую нормативным требованиям ГОСТ 16361. Химическую обработку древесины осуществляли методом ацетилирования в среде ледяной уксусной кислоты (CH_3COOH) в изотермических условиях в течение 72 часов. После обработки древесное сырьё подвергалось сушке в вакуумно-сушильном шкафу при температуре 100 °С до достижения постоянной массы.

Для создания композиционного материала в качестве полимерного связующего применяли полиэтилен высокого давления марки 10803-020 (ПВД), чьи технические условия регламентируются ГОСТ 16377. Выбор ПВД обусловлен его ролью эластичного связующего, обеспечивающего композиту ударную вязкость и устойчивость к растрескиванию. Преимуществом полиэтилена высокого давления служат низкая температура переработки и хорошая совместимость с различными наполнителями.

Для экспериментальной части были изготовлены образцы композиционного материала, включающие 10 рецептурных составов. Варьирование осуществлялось по двум факторам: массовому содержанию древесной муки (наполнитель) (от 20 до 60 %) и вида наполнителя (ацетилированный и необработанный-контрольный) (табл. 1). Каждый эксперимент включает две серии проб по три образца ацетилированных и контрольных.

Образцы в виде брусков были получены методом литья под давлением на инжекционной литьевой машине (рис. 1). Для получения брусков ДПК предварительно измельчённое сырьё загружалось в бункер термопластавтомата. Материал из бункера попадает в горячий цилиндр с вращающимся шнеком. Происходит плавление сырья при температуре 160–170 °С, перемешивается в вязкую массу и дозируется.

Таблица 1. Состав композиций

Образец, №	Связующее, %	Наполнитель, %	Вид наполнителя
1–6	60	20	ацетил./ контр.
7–12	50	30	ацетил./ контр.
13–18	40	40	ацетил./ контр.
19–24	30	50	ацетил./ контр.
25–30	20	60	ацетил./ контр.

На полученных образцах-композитах был выполнен комплекс физико-механических испытаний, включавший оценку плотности, твёрдости, температуры размягчения и прочности при растяжении.

Значения плотности для полученных композитных образцов устанавливали в соответствии с методикой ГОСТ Р 57713-2017. Для измерений использовали электронный плотномер МТ 111 (рис. 1, *а*), который позволяет с высокой точностью определять массу и объём образца с автоматическим вычислением плотности. Массу испытуемого образца регистрировали в двух средах – на воздухе и при полном погружении в воду.

Измерения твёрдости по Шору проводили на твердомере (рис. 2, *б*) в соответствии с ГОСТ 24621-2015. В основе метода лежит измерение сопротивления материала проникновению индентора (вдавливанию).



а *б*

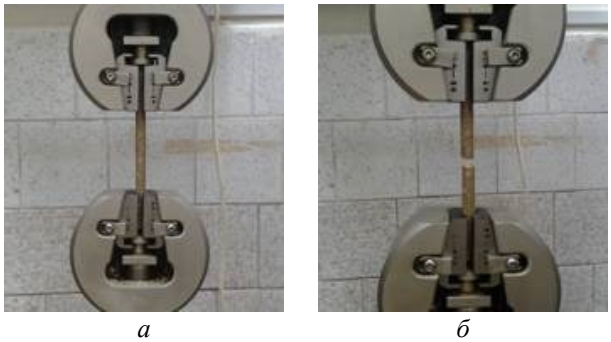
Рис. 1. Плотомер электронный МТ 111 (*а*); твёрдомер (*б*)

Температура размягчения по Вика композитов в жидкой среде определялась согласно ГОСТ 15088-2014 на приборе HV-5000-P3 HDT/VICAT (рис. 2). Образцы нагревались со скоростью 120 °С/ч, нагрузка составляла 50 Н, площадь поперечного сечения иглы – 1 мм^2, глубина проникновения – 1 мм.



Рис. 2. Прибор определения теплостойкости HV-5000-P3 HDT/VICAT

Для проведения испытаний на растяжение отбирались исключительно образцы, не имеющие дефектов как на поверхности, так и в структуре материала. Испытания на разрыв проводились на универсальной испытательной машине модели JLTCLDS-5L (рис. 3).



а *б*

Рис. 3. Прочностные испытания на растяжение: *а* – начало нагрузки; *б* – процесс деструкции

Результаты исследования. На рис. 4 представлены обобщённые результаты экспериментального исследования, демонстрирующие функциональную зависимость плотности древесно-полимерных композитов от двух варьированных факторов: соотношения древесной муки и полимерного связующего, а также способа обработки наполнителя (ацетилирование по сравнению с необработанной древесной мукой).

Экспериментальные данные свидетельствуют о наличии устойчивой зависимости между содержанием древесной муки и плотностью композитов: установлено, что увеличение содержания древесной муки сопровождается снижением плотности образцов. При этом анализ выявил, что абсолютные различия в показателях плотности между модифицированными и немодифицированными композициями для всех составов находятся на сопоставимом уровне. Данный феномен обусловлен фундаментальными особенностями механизма ацетилирования как метода химической модификации: процесс замещения гидроксильных групп полимеров древесины на ацетильные радикалы приводит к изменению химического состава древесины, однако не вызывает существенного прироста массовой доли твёрдой фазы наполнителя.

На рис. 5 представлены данные по результатам исследования зависимости концентрации и предварительной обработки наполнителя на твёрдость образцов.

Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод, что повышение концентрации древесной муки в диапазоне 20–60 мас. % закономерно сопровождается ростом сопротивления материала контактной деформации. Композиты с ацетилированным наполнителем демонстрируют превышение показателей твёрдости относительно контрольных серий с необработанной древесной мукой для всех составов. Данный результат объясняется механизмом адгезионного взаимодействия на границе раздела фаз между полиэтиленом высокого давления и поверхностью древесной муки.

Результаты испытаний на температуру размягчения образцов композита представлены на рис. 6.

Анализ графических зависимостей позволяет установить, что увеличение содержания древесной муки в интервале до 60 мас. % сопровождается повышением термостойкости материала, также максимальные значения фиксируются для композиций с максимальным уровнем наполнения (60 мас. %). Данный результат характерен как для контрольных, так и ацетилированных образцов.

Результаты испытаний на разрыв (табл. 2, рис. 7) для контрольных образцов и для композитов с ацетилированным наполнителем с 20, 30, 40 мас. % находятся в сопоставимом диапазоне, однако для составов с 50, 60 мас. % показатели прочности ацетилированных образцов получились в 2 раза больше. Ацетилированный состав с 50 мас. % древесной муки по пределу прочности не уступает контрольному составу с 20 мас. % наполнителя.

Себестоимость сырья была рассчитана из следующий данных: ПВД – 100 руб/кг, древесная мука березы – 5 руб/кг, ледяная уксусная кислота – 125 руб/кг, при этом установлено, что ледяную уксусную кислоту допустимо применять до 10 раз без снижения качества ацетилирования. Таким образом себестоимость сырья для контрольного состава с 20 мас. % наполнителя составила 81 руб/кг, а для ацетилированного состава с 50 мас. % наполнителя – 64 руб/кг, что на 25 % дешевле. Данный результат подтверждает экономическую целесообразность использования ацетилированного древесного наполнителя с сохранением прочностных характеристик композита.

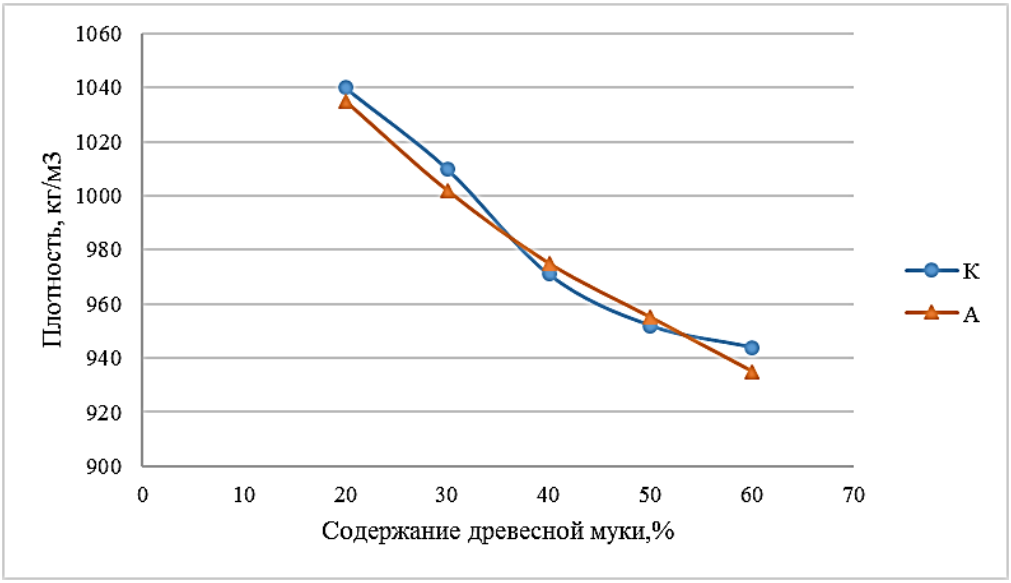


Рис. 4. Влияние концентрации и предварительной обработки для контрольных (К) и ацетилированных (А) составов ДПК на плотность

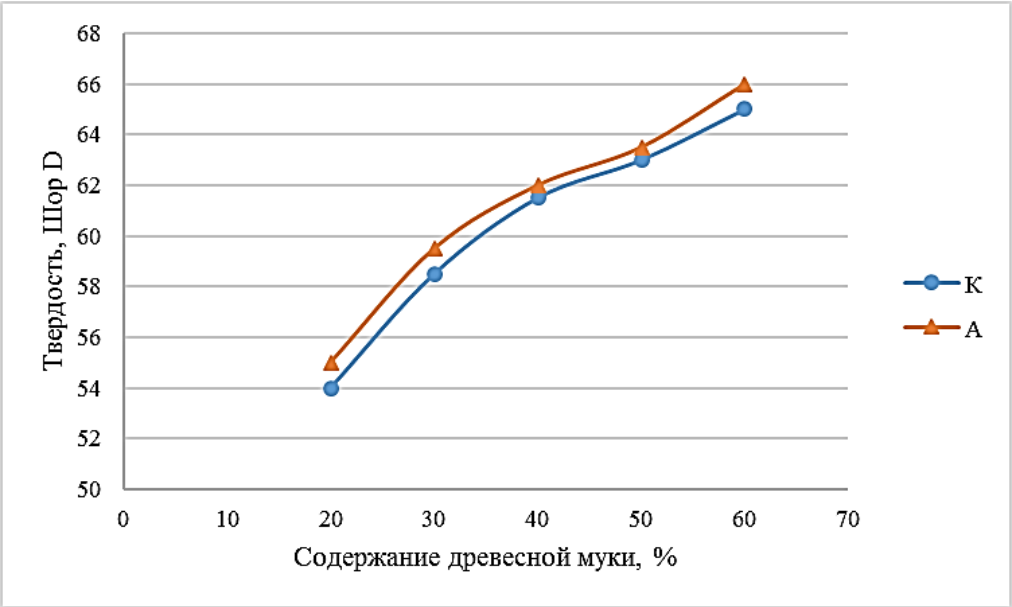


Рис. 5. Влияние концентрации и предварительной обработки для контрольных (К) и ацетилированных (А) составов ДПК на твёрдость

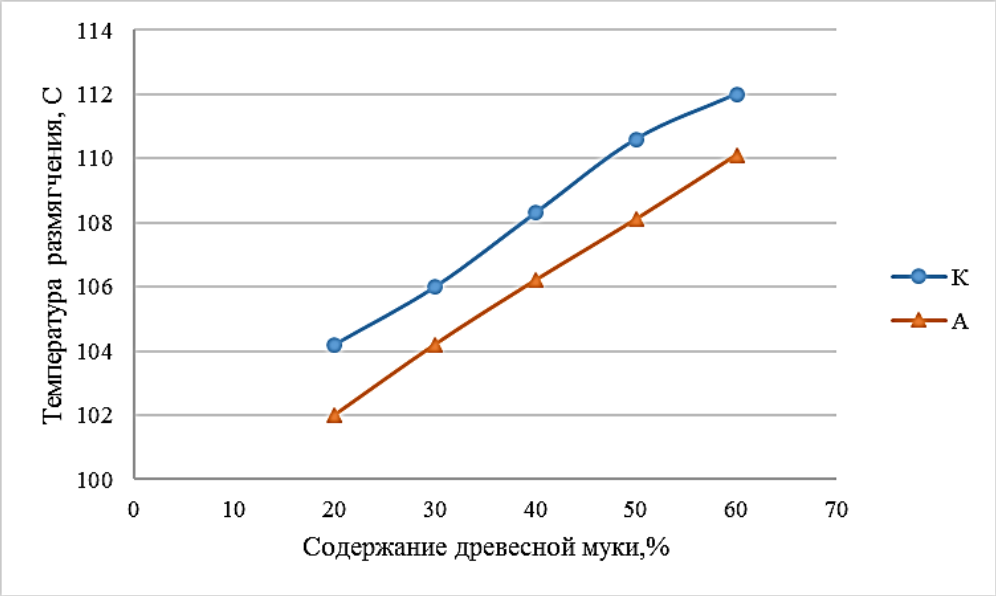


Рис. 6. Влияние концентрации и предварительной обработки для контрольных (К) и ацетилированных (А) составов ДПК на температуру размягчения

Таблица 2. Предел прочности на растяжение для образцов-композитов

Контрольные образцы (компонентный состав)					
№ образца	1	2	3	4	5
Соотношение компонентов (ПВД/ДМ),%	80/20	70/30	60/40	50/50	40/60
F_{max}, Н	470	518	528	265	225
Предел прочности, Н/мм^2	11,75	12,95	13,2	6,625	4,723
Образцы из ацетилированного древесного наполнителя (компонентный состав)					
№ образца	1	2	3	4	5
Соотношение компонентов (ПВД/ДМ),%	80/20	70/30	60/40	50/50	40/60
F_{max}, Н	506	543	561	478	376
Предел прочности, Н/мм^2	12,65	13,575	14,025	11,95	8,425

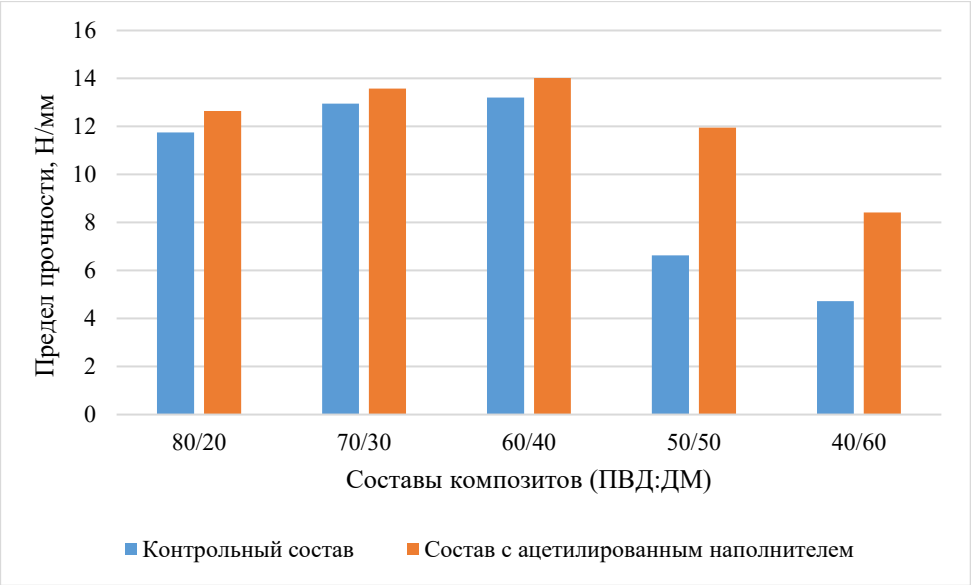


Рис. 7. Влияние концентрации и предварительной обработки для контрольных (К) и ацетилированных (А) составов ДПК на значения прочности при растяжении

Заключение. Были сделаны следующие выводы:

1. Анализ данных, представленных в отечественных и зарубежных научных публикациях, позволяет констатировать высокую технологическую эффективность ацетилирования как метода химической модификации древесины.

2. Показатели плотности между модифицированными и немодифицированными композициями для всех исследованных составов находятся на сопоставимом уровне: процесс замещения гидроксильных групп на ацетильные в структуре древесины приводит к изменению химического состава, не вызывая при этом существенного прироста массовой доли наполнителя.

3. При сравнительном анализе серий образцов выявлено, что композиты с ацетилированным наполнителем демонстрируют наилучшие показатели твёрдости. Данный эффект можно объяснить механизмом взаимодействия на границе раздела фаз между полимерным связующим и поверхностью наполнителя.

4. Установлено, что повышение концентрации древесной муки в интервале 20–60 мас. % сопровождается ростом термостойкости материала, достигая максимального значения при содержании 60 мас. % древесного наполнителя. Данный результат характерен как для контрольных, так и ацетилированных образцов.

5. Наиболее прочными при испытаниях на разрыв оказались образцы контрольного и модифицированного составов с 60 % содержанием древесной муки. При этом ацетилированный состав с 50 мас. % древесной муки по пределу прочности не уступает контрольному составу с 20 мас. % наполнителя. Указанный результат подтверждает, что ацетилирование, изменяя химическую природу поверхности наполнителя, не нарушает целостность межфазного контакта композита.

6. Себестоимость сырья для контрольного состава с 20 мас. % наполнителя составила 81 руб/кг, а для ацетилированного состава с 50 мас. % наполнителя – 64 руб/кг, что на 25 % дешевле. Это позволяет производить древесно-полимерный композит с наименьшими затратами с сохранением прочностных характеристик композита.

Литература

1. Прокопьев А.А., Галяетдинов Н.Р., Сафин Р.Р. Эксплуатационные характеристики древесно-полимерных композитов на основе ацетилированного древесного наполнителя // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2024. № 4 (400). С. 147–158.
2. Прокопьев А.А., Салимгараева Р.В., Сафин Р.Р. Исследование свойств ацетилированной древесины // Деревообрабатывающая промышленность. 2023. № 1. С. 86–90.
3. Прокопьев А.А, Салимгараева Р.В. Обзор композиционных материалов из древесины на основе различных полимерных связующих // В сборнике: Актуальные проблемы лесного хозяйства и деревопереработки. Мат-лы Всерос. науч.-практ. конф. Под редакцией Ю.М. Казакова [и др.]. Казань, 2023. С. 189–192.
4. Саерова К.В., Мухаметзянов Ш.Р., Хасаншин Р.Р. Исследование механических свойств полимерного композита, полученного двухступенчатой обработкой древесного наполнителя // Деревообрабатывающая промышленность. 2022. № 3. С. 51–57.
5. Прокопьев А.А., Салимгараева Р.В. Математическое описание химизма процесса ацетилирования древесины // В сборнике: Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века. Труды XVIII Международного евразийского симпозиума. Под научной редакцией В.Г. Новоселова. Екатеринбург, 2023. С. 50–57.
6. Сафин Р.Р., Салимгараева Р.В., Прокопьев А.А. Исследование гигроскопичности ацетилироанного древесного шпона // Новые материалы и перспективные технологии лесопромышленного комплекса. Мат-лы Всерос. науч.-практ. конф. молодых учёных и студентов. Воронеж, 2022. С. 86–91.
7. Саерова К.В., Мухаметзянов Ш.Р., Хасаншин Р.Р. Иссле-сийскойдование механических свойств полимерного композита, полученного двухступенчатой обработкой древес-

ного наполнителя // Деревообрабатывающая промышленность. 2022. № 3. С. 51–57.
8. Протопопов А.В., Коньшин В.В., Чемерис Н.А., Чемерис М.М. Изучение кинетических закономерностей реакции ацилирования древесины осины ароматическими карбоновыми кислотами // А.В. Протопопов, В.В. Коньшин, Н.А. Чемерис, М.М. Чемерис / Журнал общей химии. 2011. Т. 81. Вып. 7, С. 1191–1194.
9. Шабалин В.Г., Чемерис М.М., Коньшин В.В. // Некоторые кинетические закономерности ацетилирования древесины уксусной кислотой в присутствии тионилхлорида в среде ТФУК / ISSN 0536 – 1036. ИВУЗ. «Лесной журнал». 2004. № 1, С. 82–86.
10. Prokopiev A.A. Preacetylation of wood filler in composite materials production / Safin R.R., Salimgaraeva R.V. // Journal of Physics: Conference Series. "ICMSIT-III-2022", 2022. С. 022065.
11. R. Rousek, F. Fodor, R. Nemeth. Microscopic characterization of sound and decayed acetylated hornbeam (Carpinus betulus L.) //Wood Material Science and Engineering. 2022. 18 (2). P. 640–649.
12. F. Fodor, R. Nemeth, C. Lankveld, T. Hofmann. 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. 13 (5). P. 271–278.
13. Emir Erişir, Esat Gümüşkaya. Acetylation of cellulose in ethyl acetate: characterization and thin film applications // Journal of Wood Chemistry and Technology. 2024. 44 (4). P. 228–243.
14. Nycolle G. S. Silva, Tatiana Faria Maia & Daniella Regina Mulinari. Effect of Acetylation with Perchloric Acid as Catalyst in Sugarcane Bagasse Waste // Journal of Natural Fibers. 2022. 19 (13). P. 5050-5064.
15. L. Marsich, L. Cozzarini, A. Ferluga, D. Solinas, C. Schmid. The effect of acetylation on hybrid poplar after artificial weathering // International Wood Products Journal. 2018. 9 (2). P. 1–8.
16. Yuu Hasegawa, Mitsunori Mori, Keiichi Koda & Yasumitsu Uraki. Effect of Vapor-Phase Surface Acetylation of Japanese Cedar Wood on Fungal Degradation and Dimensional Stability // Journal of Wood Chemistry and Technology. 2020. 40 (1). P. 1–14.
17. Rebecka Ringman, Annica Pilgård, Christian Brischke, Elizabeth Windeisen & Klaus Richter. Incipient brown rot decay in modified wood: patterns of mass loss, structural integrity, moisture and acetyl content in high resolution // International Wood Products Journal. 2017. 8 (3). P. 172–182.
18. Dogan, B. Effects of impregnation and heat treatment on density, bending and compression properties of black pine (pinus nigra arnold) wood / B. Dogan, O. Percin, S.D. Sofuoglu // Wood Material Science & Engineering. 2022. Volume 17. № 6. P. 1–8.
19. Efremov D. Chemical modification of wood veneer by acetylation and furfurylation to determine strength properties / Saerova K., Prokopiev A., Safin R., Shageeva A. // E3S Web of Conferences 402. "TransSiberia 2023" – 2023. С. 14022.
20. Kurkowiak K. Wood chemical modification based on bio-based polycarboxylic acid and polyols – status quo and future perspectives / K. Kurkowiak, L. Emmerich, H. Militz // Wood Material Science & Engineering. 2021. Volume 17. № 5. P. 1–15.
21. Tsuyumoto, I. Fireproofing wood using borate and vinyl phosphorus compounds and its water resistant treatment using copolymer of dimethyl vinylphosphonate and methyl methacrylate / I. Tsuyumoto // Journal of Wood Chemistry and Technology. – 2021. Volume 41. № 3. P. 1–9.
22. Ibach, R.E., Rowell, R.M. USDA Forest Service Forest Products Laboratory: Acetylation of Wood 1945–1966. Forests 2021, 12, 260. https://doi.org/10.3390/f12030260.
23. Slabohm, M., Mai, C.; Militz, H. Bonding Acetylated Veneer for Engineered Wood Products–A Review. Materials 2022, 15, 3665. https://doi.org/10.3390/ ma15103665.
24. Zelinka S.L., Altgen M., Emmerich L., Guigo N., Keplinger T., Kymäläinen M., Thybring E.E.; Thygesen L.G. Review of Wood Modification and Wood Functionalization Technologies. Forests 2022, 13, 1004. https:// doi.org/10.3390/f1 3071004.
25. Pawar P.M.-A., et al. Acetylation of woody lignocellulose: significance and regulation // Frontiers in Plant Science. 2013. Vol. 4. Article 18. P. 1–8.

References

1. Prokopiev A.A., Galyavetdinov N.R., Safin R.R. Operational characteristics of wood-polymer composites based on acetylated wood filler // News of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal. 2024. No. 4 (400). pp. 147–158.
2. Prokopiev A.A., Salimgarayeva R.V., Safin R.R. Investigation of the properties of acetylated wood // The woodworking industry. 2023. No. 1. pp. 86–90.
3. Prokopiev A.A., SalProkopyev A.A., Salimgarayeva R.V. Review of composite wood materials based on various polymer binders // In the collection: Actual problems of forestry and wood processing. Materials of the All-Russian scientific and practical conference. Edited by Yu.M. Kazakov [et al.]. Kazan, 2023. pp. 189–192. imgaraeva R.V. Review of composite materials made of wood based on various polymer binders // In the collection: Actual problems of forestry and wood processing. Materials of the All-Russian scientific and practical conference. Edited by Yu.M. Kazakov [et al.]. Kazan, 2023. pp. 189–192.
4. Saerova K.V., Mukhametzyanov Sh.R., Khasanshin R.R. Investigation of the mechanical properties of a polymer composite obtained by two-stage processing of wood filler // The woodworking industry. 2022. No. 3. pp. 51–57.
5. Prokopiev A.A., Salimgarayeva R.V. Mathematical description of the chemistry of the wood acetylation process // In the collection: Woodworking: technologies, equipment, management of the XXI century. Proceedings of the XVIII International Eurasian Symposium. Edited by V.G. Novoselov. Yekaterinburg, 2023. pp. 50–57.
6. Safin R.R., Salimgarayeva R.V., Prokopiev A.A. Investigation of hygroscopicity of acetylated wood veneer // New materials and promising technologies of the timber industry. Materials of the All-Russian scientific and practical conference of young scientists and students. Voronezh, 2022. pp. 86-91.
7. Saerova K.V., Mukhametzyanov Sh.R., Khasanshin R.R. Investigation of the mechanical properties of a polymer composite obtained by two-stage processing of wood filler // The woodworking industry. 2022. No. 3. pp. 51–57.
8. Protopopov A.V., Konshin V.V., Chemeris N.A., Chemeris M.M. Study of kinetic patterns of the acylation reaction of aspen wood with aromatic carboxylic acids // A.V. Protopopov, V.V. Konshin, N.A. Chemeris, M.M. Chemeris / Journal of General Chemistry. 2011. Vol. 81. Issue 7, pp. 1191–1194.
9. Shabalin V.G., Chemeris M.M., Konshin V.V. // Some kinetic patterns of acetylation of wood with acetic acid in the presence of thionyl chloride in the medium of TFUK / ISSN 0536 – 1036. DISAPPEARED. Lesnoy Zhurnal. 2004. No. 1, pp. 82–86.
10. Prokopiev A.A. Preacetylation of wood filler in composite materials production / Safin R.R., Salimgaraeva R.V. // Journal of Physics: Conference Series. "ICMSIT-III-2022". 2022. С. 022065.
11. R. Rousek, F. Fodor, R. Nemeth. Microscopic characterization of sound and decayed acetylated hornbeam (Carpinus betulus L.) //Wood Material Science and Engineering. 2022. 18 (2). P. 640–649.

12. F. Fodor, R. Nemeth, C. Lankveld, T. Hofmann. 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. 13 (5). P. 271–278.
13. Emir Erişir, Esat Gümüşkaya. Acetylation of cellulose in ethyl acetate: characterization and thin film applications // Journal of Wood Chemistry and Technology. 2024. 44 (4). P. 228–243.
14. Nycolle G.S. Silva, Tatiana Faria Maia & Daniella Regina Mulinari. Effect of Acetylation with Perchloric Acid as Catalyst in Sugarcane Bagasse Waste // Journal of Natural Fibers. 2022. 19 (13). P. 5050–5064.
15. L. Marsich, L. Cozzarini, A. Ferluga, D. Solinas, C. Schmid. The effect of acetylation on hybrid poplar after artificial weathering // International Wood Products Journal. 2018. 9 (2). P. 1–8.
16. Yuu Hasegawa, Mitsunori Mori, Keiichi Koda & Yasumitsu Uraki. Effect of Vapor-Phase Surface Acetylation of Japanese Cedar Wood on Fungal Degradation and Dimensional Stability // Journal of Wood Chemistry and Technology. 2020. 40 (1). P. 1–14.
17. Rebecka Ringman, Annica Pilgård, Christian Brischke, Elizabeth Windeisen & Klaus Richter. Incipient brown rot decay in modified wood: patterns of mass loss, structural integrity, moisture and acetyl content in high resolution // International Wood Products Journal. 2017. 8 (3). P. 172–182.
18. Dogan B. Effects of impregnation and heat treatment on density, bending and compression properties of black pine (pinus nigra arnold) wood / B. Dogan, O. Percin, S.D. Sofuoglu // Wood Material Science & Engineering. 2022. Volume 17. № 6. P. 1–8.
19. Efremov D. Chemical modification of wood veneer by acetylation and furfurylation to determine strength properties / Saerova K., Prokopiev A., Safin R., Shageeva A. // E3S Web of Conferences 402. "TransSiberia 2023". 2023. С. 14022.
20. Kurkowiak K. Wood chemical modification based on bio-based polycarboxylic acid and polyols – status quo and future perspectives / K. Kurkowiak, L. Emmerich, H. Militz // Wood Material Science & Engineering. 2021. Volume 17. № 5. P. 1–15.
21. Tsuyumoto I. Fireproofing wood using borate and vinyl phosphorus compounds and its water resistant treatment using copolymer of dimethyl vinylphosphonate and methyl methacrylate / I. Tsuyumoto // Journal of Wood Chemistry and Technology. 2021. Volume 41. № 3. P. 1–9.
22. Ibach R.E.; Rowell, R.M. USDA Forest Service Forest Products Laboratory: Acetylation of Wood 1945–1966. Forests 2021, 12, 260. https://doi.org/10.3390/f12030260.
23. Slabohm M.; Mai C.; Militz H. Bonding Acetylated Veneer for Engineered Wood Products—A Review. Materials 2022, 15, 3665. https://doi.org/10.3390/ ma15103665.
24. Zelinka S.L., Altgen M., Emmerich L., Guigo N., Keplinger, T., Kymäläinen M., Thybring E.E.; Thygesen L.G. Review of Wood Modification and Wood Functionalization Technologies. Forests 2022, 13, 1004. https:// doi.org/10.3390/ f13071004.
25. Pawar P.M.-A., et al. Acetylation of woody lignocellulose: significance and regulation // Frontiers in Plant Science. 2013. Vol. 4. Article 18. P. 1–8.