

Научная статья

УДК 674.8

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-183-199

Физико-механические свойства композиционных материалов на основе диацетата целлюлозы

С.Н. Казизин¹, канд. техн. наук; ResearcherID: [W-8224-2019](https://orcid.org/0000-0003-4220-5488),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4220-5488>

Д.В. Василишин¹, ассистент; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9293-5900>

А.В. Шишмарева¹, канд. экон. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9193-3687>

В.Д. Ворончихин¹, канд. техн. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4176-861X>

А.А. Тамби², д-р техн. наук; ResearcherID: [J-9614-2017](https://orcid.org/0000-0003-4099-3409),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4099-3409>

¹Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660031; sergeikaz060890@yandex.ru, ameteras008@gmail.com, shishmareva_anna@bk.ru, voronchikhinvd@mail.sibsau.ru

²Ассоциация производителей машин и оборудования лесопромышленного комплекса «ЛЕ-СТЕХ», ул. Новопроложенная, д. 11, г. Всеволожск, Россия, 188642; a_tambi@mail.ru

Поступила в редакцию 22.05.24 / Одобрена после рецензирования 24.08.24 / Принята к печати 27.08.24

Аннотация. В настоящее время состояние проблемы использования древесных отходов является критическим, поскольку традиционные способы их переработки не обеспечивают экономически обоснованного вовлечения в промышленное производство всего объема отходов. Для решения этой проблемы необходимо найти методы переработки древесных отходов, способные увеличить долю измельченной древесины, используемой в производстве востребованной продукции с высокой добавочной стоимостью. Целью настоящей работы является изучение влияния содержания активированных древесных частиц, измельченных гидродинамическим способом, на физико-механические свойства древесно-полимерных композитов на основе диацетата целлюлозы. Полимерную матрицу в виде диацетата целлюлозы и древесный наполнитель получали в лаборатории из гидродинамически активированных опилок березы. Образцы композитов для испытания механических свойств производили методом литья под давлением с использованием вертикальной литьевой машины. Анализ морфологии поверхностей композитов после испытаний осуществляли при помощи электронной микроскопии. Термическую деструкцию образцов диацетата целлюлозы и композитов оценивали методом термогравиметрического анализа. Ненаполненный диацетат целлюлозы показал минимальное водопоглощение (около 4 %). Водостойкость образцов композитов снижалась при повышении содержания наполнителя в диацетате целлюлозы. Увеличение количества древесного наполнителя в составе композиции до 20 % приводит к росту предела прочности при растяжении и модуля упругости до 23,0 МПа и 1,22 ГПа соответственно. Дальнейшее повышение содержания наполнителя с 30 до 70 % снижало эти два показателя. При увеличении содержания наполнителя с 10 до 70 % предел прочности при изгибе падал с 34,4 до 13,6 МПа. Рост доли древесного наполнителя в составе композита влечет снижение потери его массы при высокой температуре. Гидродинамически обработанные древесные частицы могут быть использованы в производстве композиционных материалов на основе диацетата целлюлозы при их добавлении в количестве от 20 до 30 %.

© Казизин С.Н., Василишин Д.В., Шишмарева А.В., Ворончихин В.Д., Тамби А.А., 2025

 Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Ключевые слова: древесно-полимерный композит, гидродинамическая активация, опилки березы, ацетат целлюлозы, физико-механические свойства

Благодарности: Исследование выполнено при поддержке Красноярского краевого фонда науки в рамках проекта № 20231105-06121 «Получение композиционных материалов на основе ацетата целлюлозы из механоактивированных древесных частиц» в соответствии с договором о предоставлении гранта № 695 от 21.12.2023 г.

Для цитирования: Казисин С.Н., Василишин Д.В., Шишмарева А.В., Ворончихин В.Д., Тамби А.А. Физико-механические свойства композиционных материалов на основе дицетата целлюлозы // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 2. С. 183–199.

<https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-183-199>

Original article

Physical and Mechanical Properties of Composite Materials Based on Cellulose Diacetate

Sergey N. Kazitsin¹, Candidate of Engineering; ResearcherID: [W-8224-2019](https://orcid.org/0000-0003-4220-5488),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4220-5488>

Dmitry V. Vasilishin¹, Assistant; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9293-5900>

Anna V. Shishmareva¹, Candidate of Economics; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9193-3687>

Vasili D. Voronchikhin¹, Candidate of Engineering;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4176-861X>

Alexander A. Tambi², Doctor of Engineering; ResearcherID: [J-9614-2017](https://orcid.org/0000-0003-4099-3409),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4099-3409>

¹Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. im. gazety “Krasnoyarskiy rabochiy”, 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; sergeikaz060890@yandex.ru, ameteras008@gmail.com, shishmareva_anna@bk.ru, voronchikhinvd@mail.sibsau.ru

²Timber Industry Machinery and Equipment Producers Association «LESTECH», ul. Novoprolozhennaya, 11, Vsevolozhsk, 188642, Russian Federation; a_tambi@mail.ru

Received on May 22, 2024 / Approved after reviewing on August 24, 2024 / Accepted on August 27, 2024

Abstract. Currently, the state of the problem of wood waste use is critical, since traditional methods of its processing do not provide economically justified involvement of the entire volume of waste in industrial production. To solve this problem, it is necessary to find methods for processing wood waste that increase the share of crushed wood used in the production of high-value-added products in demand. The aim of this work has been to study the effect of the content of activated wood particles crushed by a hydrodynamic method on the physical and mechanical properties of wood-polymer composites based on cellulose diacetate. A polymer matrix in the form of cellulose diacetate and wood filler has been obtained in the laboratory from hydrodynamically activated birch sawdust. Composite samples for testing mechanical properties have been produced by injection molding using a vertical injection molding machine. The morphology of the composite surfaces after the tests has been analyzed using electron microscopy. Thermal degradation of cellulose diacetate samples and composites has been assessed using thermogravimetric analysis. Unfilled cellulose diacetate has shown minimal water absorption (about 4 %). The water resistance of the composite samples has decreased with increasing filler content in cellulose diacetate. An increase in the amount of wood filler in the composition to 20 % leads to an increase in the tensile strength and modulus of elasticity to 23.0 MPa and 1.22 GPa, respectively.

A further increase in the filler content from 30 to 70 % has reduced these two indicators. With an increase in the filler content from 10 to 70 %, the flexural strength has dropped from 34.4 to 13.6 MPa. An increase in the proportion of wood filler in the composite composition leads to a decrease in its mass loss at high temperatures. Hydrodynamically treated wood particles can be used in the production of composite materials based on cellulose diacetate when added in amounts from 20 to 30 %.

Keywords: wood-polymer composite, hydrodynamic activation, birch sawdust, cellulose acetate, physical and mechanical properties

Acknowledgements: The research was supported by the Krasnoyarsk Regional Science Foundation within the framework of the project no. 20231105-06121 “Production of Composite Materials Based on Cellulose Acetate from Mechanically Activated Wood Particles” in accordance with the grant agreement no. 695 dated 21.12.2023.

For citation: Kazitsin S.N., Vasilishin D.V., Shishmareva A.V., Voronchikhin V.D., Tambi A.A. Physical and Mechanical Properties of Composite Materials Based on Cellulose Diacetate. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 2, pp. 183–199. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-183-199>

Введение

Следование человечеством концепции устойчивого развития экономики обусловлено необходимостью решения экологических проблем, в т. ч. вызванных применением полимеров из ископаемого сырья [16, 28]. Синтетические полимеры на основе нефтепродуктов очень медленно разрушаются в окружающей среде, этот процесс может занимать сотни лет. В результате многочисленные пластиковые отходы уже накопились в земле, океанах и атмосфере. Научные исследования, проведенные за последние десятилетия, позволили найти решение данной проблемы – применять в повседневной жизни экологически чистые биополимеры, такие как полимолочная кислота (PLA), полигидроксibuтират (PHB), полигидроксиалканоаты (PHA) и ацетат целлюлозы (CA), и создавать полимерные композиты, не наносящие вред окружающей среде и подлежащие переработке или утилизации [35].

Ацетат целлюлозы представляет собой биоразлагаемый полимер, получаемый из возобновляемых источников, например из древесины или хлопкового волокна, путем частичного ацетилирования целлюлозы. Ацетат целлюлозы при компостировании не выделяет опасных продуктов разложения, а также обладает высокими механическими свойствами.

Среди биоразлагаемых полимеров ацетат целлюлозы наиболее широко используется при изготовлении биопластиков, упаковочных материалов, в биомедицине, в мембранных фильтрах и др. [20, 25]. В зависимости от степени замещения выделяют триацетат целлюлозы – от 60 до 61,5 % связанной уксусной кислоты и вторичный ацетат (диацетат – ДАЦ), содержащий от 54 до 56 % этой кислоты [1].

Степень замещения оказывает влияние на свойства ацетата целлюлозы. Так, в работе [14] отмечается, что повышение степени ацетилирования целлюлозы с 1,81 до 2,41 приводит к увеличению плотности и твердости этролов, а также к снижению их водопоглощения и степени биоразложения.

N. Španić с соавторами [46] исследовали свойства биокompозитов на основе ацетата целлюлозы. В качестве сырья для получения данного материала и напол-

нителем были использованы древесина белой ивы и черной ольхи, измельченная до размеров частиц от 0,5 до 1 мм. Авторы установили разницу между прочностью при растяжении в зависимости от породы древесины: показатель для ацетата целлюлозы из черной ольхи составил 58,7 МПа, из белой ивы – 64,1 МПа. Ученые связывают такой результат со степенью замещения, которая различна для изучаемых ацетатов целлюлозы (ацетат из белой ивы имел степень замещения 2,32, а из черной ольхи – 2,73).

Авторы исследования [44] выявили, что максимальные предел прочности при растяжении 65 МПа и модуль Юнга 2,5 ГПа достижимы при добавлении 5 % целлюлозных нановолокон, выделенных из рисовой соломы в матрицу на основе ацетата целлюлозы.

Li и др. [31] изучали способ получения композитов на основе ацетата целлюлозы (степень замещения – 2,45) с добавлением волокон мискантуса методом 2-этапной экструзии. Предложенный способ позволил получить композит с прочностью на разрыв 64 МПа и модулем при растяжении 4,7 ГПа при 25 % механически фибриллированных волокон мискантуса в составе.

Чистый ацетат целлюлозы является хрупким материалом и нуждается в модификации, например, с помощью пластификаторов и армирующих частиц [22].

Натуральные растительные волокна из возобновляемого сырья обладают рядом преимуществ, таких как улучшенная биоразлагаемость, невысокая стоимость, устойчивость к истиранию, хорошая удельная прочность, низкая плотность и т. д. Введение в полимерную матрицу твердых дисперсных или волокнистых натуральных растительных частиц осуществляется с целью изменения физико-химических, механических, термических, фрикционных и прочих свойств материалов, хотя, как правило, основной задачей является улучшение физико-механических свойств [7, 36].

Древесина нашла широкое применение как наполнитель в древесно-полимерных композитах, поскольку сырьем могут служить отходы деревообрабатывающей промышленности, что делает данный вид наполнителя сравнительно дешевым. Наряду с этим, древесный наполнитель улучшает свойства композитов [17]. Авторы работ [4, 11, 15] отмечают, что увеличение содержания в композиции древесных частиц повышает модуль упругости при сжатии [15], при статическом изгибе [11], а также твердость и прочность при растяжении [4].

Исследования механических свойств композитов на основе полигидроксисульфата с добавлением древесной муки березы марки 180 позволили сделать вывод о том, что содержание наполнителя 40 % дает композит с высокими механическими свойствами: прочность при растяжении – 23 МПа; модуль упругости – 2,36 ГПа [2].

Современные тенденции в области изготовления полимерных композитов привели к разработке полностью целлюлозных композитов. Целлюлоза выполняет функции как матрицы, так и встроенного волокнистого наполнителя [17, 46].

Форма наполнителя является одним из наиболее важных факторов, влияющих на механические свойства древесно-полимерного композита [33]. По результатам недавних исследований сообщалось, что древесно-полимерные композиты, содержащие древесные частицы с волокнистой структурой

на поверхности, полученной в результате механического измельчения имеют лучшие механические свойства, чем аналогичный материал без волокнистых структур [26, 42].

В ряде работ отмечается, что мокрое измельчение древесной муки значительно улучшает характеристики древесно-полимерных композитов. Влажное измельчение древесной муки может привести к разрушению структуры клеточных стенок с отслоением фибрилл на поверхностях древесных частиц. Это положительно сказывается на прочности при растяжении, ударной вязкости и усталостной долговечности получаемых композитов [19, 26].

При исследовании отбеленной сульфатной целлюлозы из хвойных пород древесины, изготовленной методом мокрого размола в шаровой мельнице [40], прочность при растяжении композита на основе полилактида была наибольшей в случае максимальной продолжительности размола, что соответствует наименьшим размерам армирующих частиц. Мокрое измельчение древесины в валковой мельнице описано в работе [24].

Таким образом, мокрое измельчение является перспективным направлением подготовки древесного наполнителя для композиционных материалов на основе биополимеров.

Проведенные ранее исследования [3] свидетельствуют о получении в процессе гидродинамической обработки древесных частиц, диспергированных до состояния волокнистого материала с фибриллированными поверхностями, пригодных для создания композиционных материалов. Таким образом, целью настоящей работы является изучение влияния содержания активированных древесных частиц, измельченных гидродинамическим способом, на физико-механические свойства древесно-полимерных композитов на основе ДАЦ.

Объекты и методы исследования

В качестве основного сырья для выделения целлюлозы и получения наполнителя использовали опилки древесины березы, оставшиеся после распиловки круглых лесоматериалов на ленточнопильном станке МЛ3210 (ООО «Сибфорест», г. Красноярск), размер опилок – менее 2 мм.

Методика получения полимерной матрицы – ДАЦ из гидродинамически активированных опилок березы (рис. 1, а) с содержанием связанной уксусной кислоты 54,1–58,0 % основана на ацетилировании целлюлозы с применением в качестве катализатора серной кислоты [6]. Целлюлоза для ацетилирования была изготовлена азотнокислым методом из гидродинамически активированных опилок березы. Ацетилирование целлюлозы до ДАЦ осуществляли с использованием кетена как ацетилирующего агента в закрытой реакционной установке с кетеновой лампой. Ацетилирующий агент действует на подготовленную смесь из целлюлозы, активированной ледяной уксусной кислотой, в среде бензола и катализатора – серной кислоты. Ацетилирование длилось 3–4 ч при перемешивании.

По окончании процесса ацетилирования полученный продукт частично является сульфоацетатом, вследствие чего проводили нейтрализацию катализатора в реакционной смеси и стабилизацию для удаления сульфогрупп.

Стабилизированную реакционную массу фильтровали и отгоняли остатки бензола из ДАЦ.

Подготовка древесного наполнителя (дисперсных частиц) (рис. 1, б) включала гидродинамическую активацию опилок в течение 25 мин [18] с последующей лиофильной сушкой и измельчением [6].



Рис. 1. Внешний вид: а – диацетат целлюлозы; б – древесный наполнитель

Fig. 1. The appearance: а – cellulose diacetate; б – wood filler

Изготовление древесно-полимерного композита. Перед приготовлением композита древесные частицы и порошкообразный ДАЦ высушивали до постоянной массы при температуре 95 ± 5 °С. Уменьшение температуры сушки ниже 100 °С связано с исключением риска разложения ДАЦ при температуре выше 100 °С.

Образцы из чистого ДАЦ и биокомпозиты были приготовлены для испытаний методом литья без давления в растворитель (ацетон). ДАЦ $20 \pm 0,02$ г растворяли в стеклянном лабораторном стакане, в который добавляли $101 \pm 0,1$ мл ацетона до получения 20%-го раствора. Для растворения ДАЦ и диспергирования частиц наполнителя использовали верхнеприводную мешалку US-2000А.

Приготовленные смеси разливали в стеклянные чашки Петри. Композиты готовили путем добавления различного количества наполнителя к уже растворенному ДАЦ и помещения смесей в чашки Петри [21, 27, 29]. Получение монолитных образцов композитов с содержанием древесных частиц более 70 % невозможно по причине недостатка связующего. Растворенный ДАЦ и композитные смеси оставляли в чашках Петри при комнатной температуре до полного испарения растворителя в течение 3 сут. Контроль полноты испарения растворителя осуществляли весовым методом.

Полученные таким образом материалы предварительно измельчали в мельнице Biolomix 800G (BioloMix, Китай). Образцы композитов для испытания механических свойств в форме прямоугольной полоски по ГОСТ 4648–2014 (ISO 178:2010) и 2-сторонней лопатки по ГОСТ 11262–2017 (ISO 527-2:2012) изготавливали с использованием вертикальной литьевой машины BORX-40 (Shenzhen Borx Technology Co., Ltd., Китай) с последующим охлаждением до комнатной температуры. Размеры образцов в форме 2-сторонней лопатки составляли около $80 \times 5 \times 4$ мм, прямоугольных – $80 \times 10 \times 4$ мм.

Все образцы кондиционировали при температуре 20 °С и относительной влажности 65 % в продолжение 1 недели перед каждым испытанием.

Содержание влаги в образцах композитов составляло $0,5 \pm 0,05$ %. Условное обозначение образцов композита в зависимости от количества древесных частиц 10, 20, 30, 40, 50, 60 и 70 % – W10, W20, W30, W40, W50, W60 и W70 соответственно.

Механические свойства древесно-полимерного композита. Анализ морфологии поверхностей поперечного сечения образцов композитов после испытаний на растяжение и изгиб проводили с помощью сканирующего электронного микроскопа (SEM) (Hitachi TM4000Plus, Япония). Для образцов композитов не предусматривали дополнительную пробоподготовку. Композиты были закреплены на алюминиевых заглушках. Наблюдение осуществляли при ускоряющем напряжении 15 кВ.

Водопоглощение определено в соответствии с ГОСТ 4650–2014 (ISO 62:2008).

Прочность образцов на растяжение и модуль упругости фиксировали с помощью универсальной испытательной машины (УТС-110МН-30-0У, Testsystems, Россия) при постоянной скорости перемещения траверсы 2 мм/мин в соответствии с ГОСТ 11262–2017. Определение прочности образцов композитов на изгиб и модуля упругости при изгибе проводили со скоростью испытания 5 мм/мин по ГОСТ 4648–2014.

Термогравиметрическое исследование выполняли с помощью прибора STA 449 F1 Jupiter (Netzsch, Германия) в корундовых тиглях в интервале температур от 30 до 900 °С со скоростью нагрева 10 °С/мин в потоке аргона (скорость потока защитного и продувочного газов – 20 и 50 мл/мин соответственно). Для испытаний использовали образцы массой $12 \pm 0,3$ мг. Обработка результатов измерений выполнена с помощью пакета программ Netzsch Proteus Thermal Analysis 5.1.0, поставляемого с прибором.

Результаты исследования и их обсуждение

Влияние содержания древесных частиц, активированных гидродинамической обработкой, на поверхность поперечного сечения образца композита после испытаний на изгиб и растяжение исследовали методом SEM. На рис. 2 представлены SEM-микрофотографии поверхности разрушения композита – ненаполненного и наполненного древесными частицами.

SEM-изображения показывают, что древесные частицы были хорошо диспергированы в полимере матрицы в образцах W10–W40, что позволяет достичь однородности композита. На рис. 2, б–д видны древесные частицы, многие из которых разрушены у поверхности образца. На поверхности разрушения рис. 2, б–г более четко различимы отдельные расслоения стенок клеток вдоль армирующих элементов (фибрилл), произошедшие вследствие анизотропии физико-механических свойств древесины.

Установленный характер разрушения согласуется с результатами работы [43], в которой авторы указывают на улучшение механических свойств древесно-полимерного композита на основе полилактида при добавлении древесных частиц. В статье содержится утверждение, что морфология поверхности разрушения композита свидетельствует скорее о разрыве волокна, чем о его вытягивании, это является доказательством совместимости полимерной матрицы и древесного наполнителя, а также адгезии между ними.

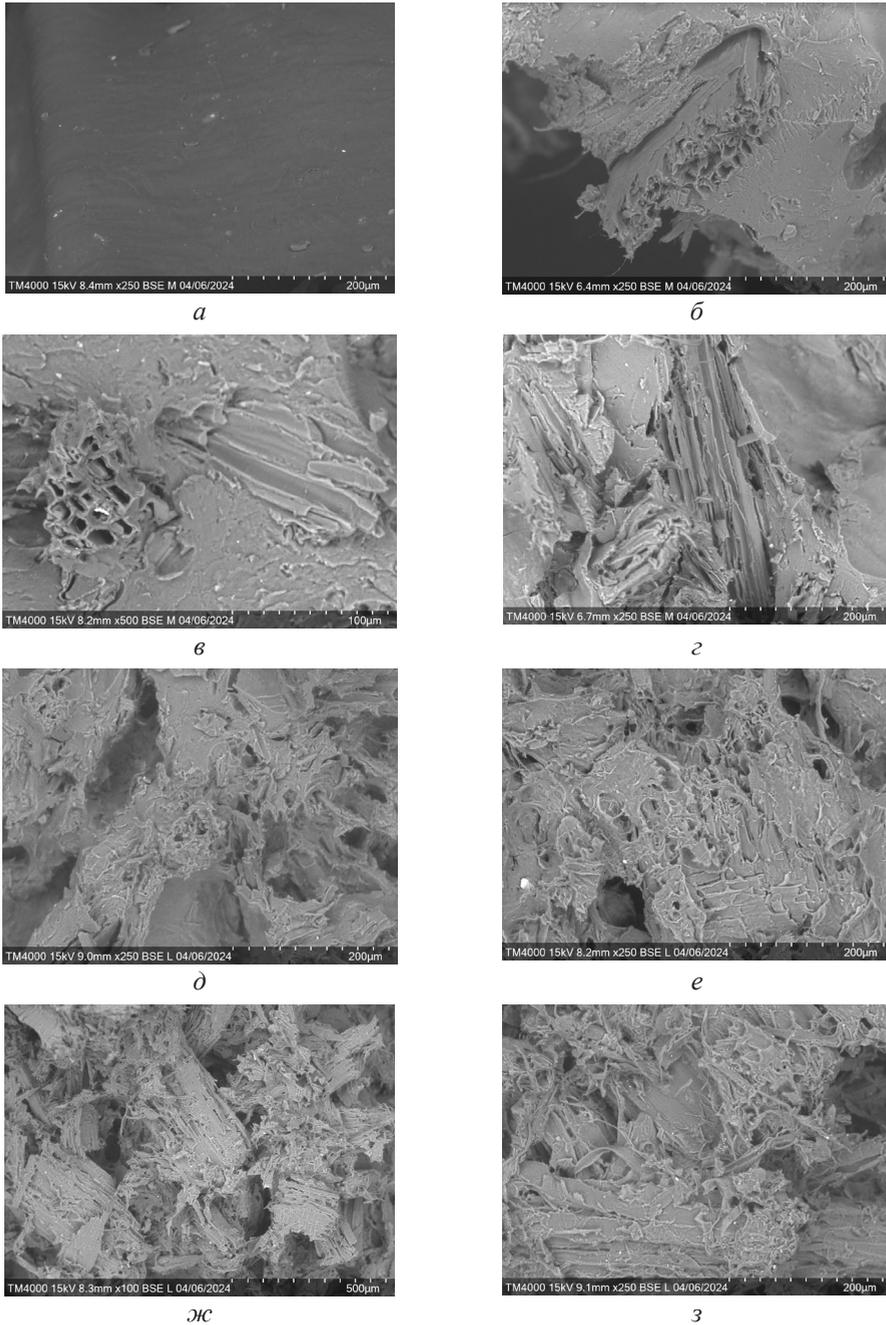


Рис. 2. Микрофотографии поперечного сечения образцов: *a* – диацетат целлюлозы; *б* – W10; *в* – W20; *г* – W30; *д* – W40; *е* – W50; *ж* – W60; *з* – W70

Fig. 2. The micrographs of the cross-section of the samples: *a* – cellulose diacetate; *б* – W10; *в* – W20; *г* – W30; *д* – W40; *е* – W50; *ж* – W60; *з* – W70

Согласно полученным результатам, гидродинамически обработанные древесные частицы играют важную роль в формировании механических свойств композита, осуществляя передачу напряжений на полимерную матрицу. Процесс фибриллирования наполнителя [6] в ходе гидродинамической обработки способствует повышению степени межфазного взаимодействия между

матрицей ДАЦ и древесными частицами [26, 33]. При добавлении 20 % наполнителя предел прочности при растяжении увеличился в сравнении с ненаполненным ДАЦ. Кроме того, в работе [37] было выдвинуто предположение, что гидрофобный лигнин, присутствующий в древесных частицах, обуславливает адгезионное взаимодействие с биополимерной матрицей.

В образцах W50–W70 по мере увеличения содержания наполнителя в композите наблюдалась агломерация древесных частиц и, как следствие, образование пустот в структуре материала. При этом прочностные свойства композитов резко снижаются [2].

Влияние количества древесных частиц в композите на водопоглощение образцов показано на рис. 3. Ненаполненный ДАЦ имел минимальное водопоглощение (около 4 %). Водостойкость образцов композитов значительно снижалась при росте содержания наполнителя в ДАЦ. При увеличении содержания наполнителя с 50 до 70 % водопоглощение композитов повысилось особенно резко – с 8,3 до 11 %. Это можно объяснить отрицательным влиянием гидрофильных свойств древесины, а также образованием микрополостей в композитах (рис. 2, е–з).

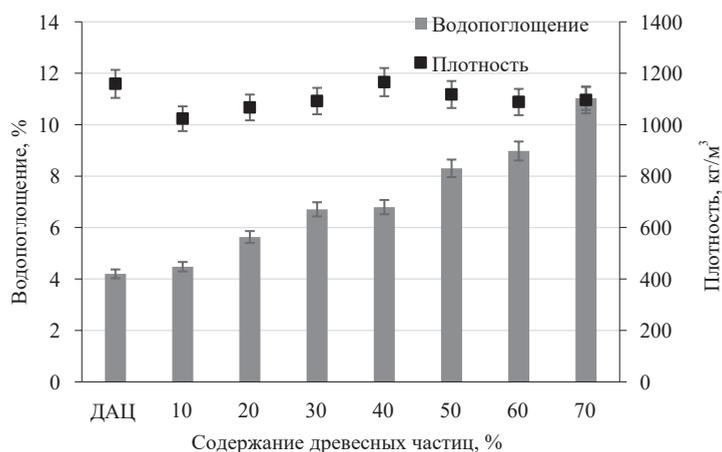


Рис. 3. Влияние содержания древесных частиц в композите на водопоглощение и плотность образцов

Fig. 3. The effect of wood particle content in the composite on water absorption and density of the samples

На рис. 4, а отражено влияние содержания древесных частиц на предел прочности при растяжении композитов. Этот показатель и модуль упругости ненаполненного ДАЦ равняются 19,5 МПа и 1,29 ГПа соответственно. Введение в состав композита 10 % древесных частиц способствует незначительному снижению названных значений в сравнении с показателями исходного ДАЦ [2]. Увеличение количества древесного наполнителя в составе композиции до 20 % позволяет повысить предел прочности при растяжении и модуль упругости до 23,0 МПа и 1,22 ГПа соответственно. Дальнейший рост содержания наполнителя с 30 до 70 % снижал предел прочности при растяжении (6,20 МПа) и модуль упругости (0,22 ГПа). По сравнению с ненаполненным ДАЦ более низкая прочность при растяжении композитов с высоким содержанием наполнителя может быть объяснена снижением количества ДАЦ, который выступал в качестве связующего для наполнителя в композите.

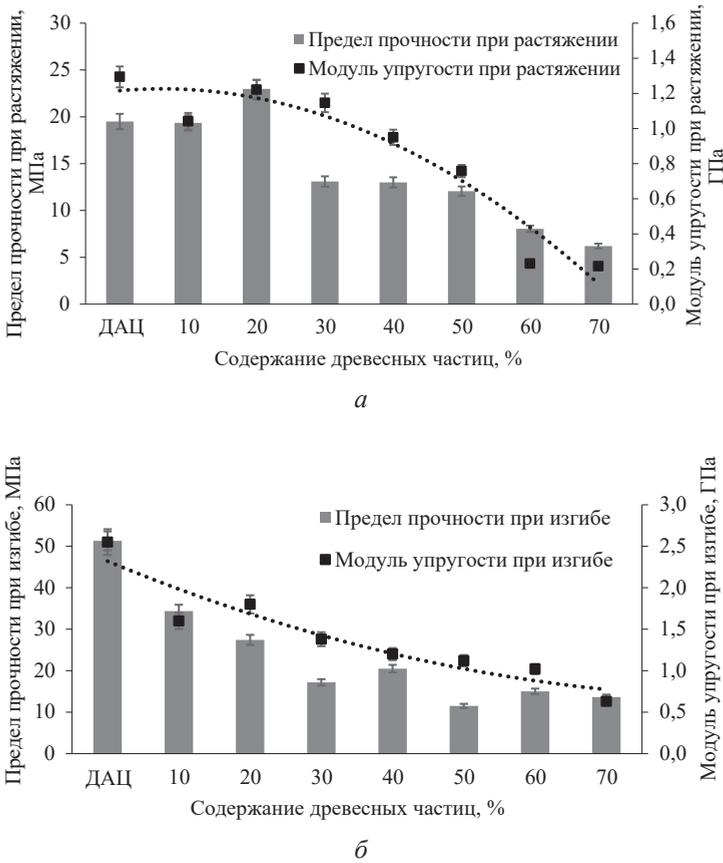


Рис. 4. Влияние содержания древесных частиц на прочность композитов:
а – при растяжении; *б* – при изгибе

Fig. 4. The effect of wood particle content on the strength of composites:
a – under tension; *b* – under bending

На SEM-изображении на поверхности излома образца композита наблюдали волокнистые элементы клеточной стенки древесных частиц, вероятно, вследствие адгезионной связи между наполнителем и ДАЦ-матрицей.

Явление механической блокировки объясняет адгезию, когда матрица проникает в поры, отверстия и щели или другие неровности основы и механически фиксируется на ней. Механическая блокировка происходит между матрицей и шероховатой поверхностью натурального волокна [30]. Если поверхность более шероховатая, то увеличивается площадь связывания между матрицей и наполнителем, а значит, повышается прочность связи в области раздела фаз [23, 32].

На рис. 4, *б* показано влияние содержания древесных частиц на предел прочности при изгибе композитов. Предел прочности при изгибе и модуль упругости ненаполненных древесными частицами образцов составили 51,3 МПа и 2,55 ГПа соответственно. При увеличении содержания наполнителя с 10 до 70 % предел прочности при изгибе снизился с 34,4 до 13,6 МПа [15]. Образцы с содержанием древесных частиц 70 % обладали самым низким значением (13,6 МПа).

На рис. 5 приведены термогравиметрические и дифференциальные термогравиметрические кривые (ТГ и ДТГ) исследованных образцов ненаполненного ДАЦ и композиций с различным содержанием древесных частиц.

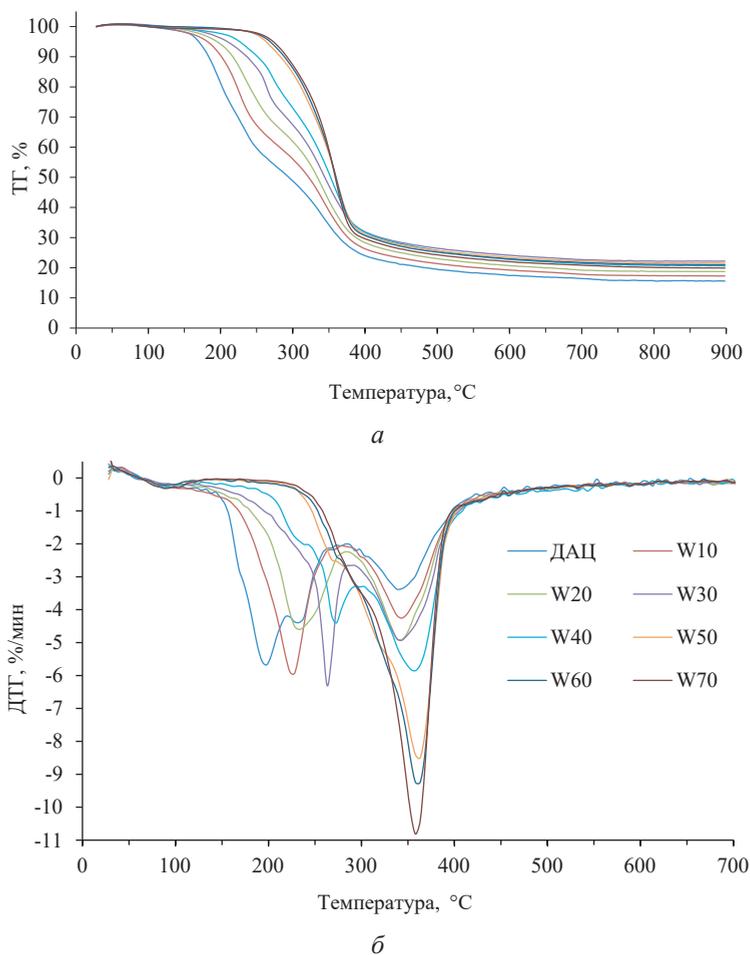


Рис. 5. Термогравиметрические кривые диацетата целлюлозы и композитов с различным содержанием древесных частиц: *a* – ТГ; *б* – ДТГ

Fig. 5. The thermogravimetric curves of cellulose diacetate and composites with different wood particle content: *a* – thermogravimetric curve; *б* – differential thermogravimetric curve

На графике ТГ (рис. 5, *a*) в температурном интервале до 160 °С изменение массы образцов из ненаполненного ДАЦ происходит за счет испарения сорбированной воды с частичным началом процессов деградации. С температуры 170–180 °С масса снижается за счет деградации с разделением на несколько температурных интервалов. При 160–250 °С медленно разлагается ацетат целлюлозы и быстро – сульфозамещенные ацетаты, образованные в результате действия катализатора (серной кислоты) на целлюлозу в ходе синтеза ацетата целлюлозы, которые не были полностью удалены на этапе нейтрализации [6, 9].

В диапазоне температур 250–330 °С снижение массы образца связано с разложением ацетата целлюлозы с формированием основной доли карбонильных и карбоксильных групп в продуктах деструкции. Суммарно основному разложению ацетата целлюлозы при 160–330 °С соответствует потеря 50–60 %

от всей массы исходного ацетата. При дальнейшем увеличении температуры в диапазоне 330–440 °С происходит уменьшение массы за счет деградации и разложения органических кислот и альдегидов, образовавшихся ранее [13].

На рис. 5, б пик ДТГ при температуре до 160 °С соответствует испарению влаги [12]. Деградация ацетата целлюлозы начинается в интервале температур 150–180 °С с разложения сульфозамещенных звеньев цепи, снижающих термостабильность ацетата [41].

Дальнейшая деградация ацетата целлюлозы сопровождается активным образованием карбонильных и карбоксильных групп в интервале температур 220–280 °С [5].

Увеличение скорости потери массы образца при температурах 330–440 °С связано с разложением продуктов деградации ацетата целлюлозы (кислоты, альдегиды и др.) и деградацией исходной целлюлозы [13].

Термическая стабильность древесно-полимерных композитов основана на термической деструкции главных компонентов древесного вещества наполнителя в виде гемицеллюлозы, целлюлозы и лигнина [38]. Термическая стабильность гемицеллюлоз в интервале температур 200–300 °С снижается из-за их аморфной структуры [47]. Для термического разложения целлюлозы необходима температура от ≈ 350 °С из-за кристаллической природы этого сырья [45]. Структура лигнина не похожа на структуру целлюлозы и гемицеллюлозы. Термическое разложение лигнина начинается при 300–500 °С [39].

Термодеструкция всех структурных компонентов полимера матрицы и древесинного вещества наполнителя в атмосфере аргона в отличие от окислительной среды происходит при температуре до 440 °С. Также было замечено, что увеличение количества древесного наполнителя в составе композита приводит к снижению потери его массы при высокой температуре – она составила 84,4 % (чистый ДАЦ) и $79,8 \pm 1,7$ % (W10–W70), что может свидетельствовать об улучшении термостабильности за счет добавления наполнителя.

Деградация композита проходила в несколько стадий (рис. 5, б). Первый пик на кривой ДТГ можно объяснить испарением воды, содержащейся в композите, с его последующим разрушением. При добавлении древесных частиц в композит ДТГ-пики на графике смещались вправо по оси температур. Максимальная температура составляет 225, 232, 264, 267, 270 и 280 °С для W10, W20, W30, W40, W50, W60, W70 соответственно. Сдвиг пика ДТГ по оси температур показал улучшение термической стабильности композита, наполненного древесными частицами, вероятно, за счет углеродного остатка, который выступает в качестве изолирующего слоя, препятствующего дальнейшей термической деградации композита [34].

В ходе работы [10] был выполнен сравнительный анализ термических характеристик натуральных и подверженных гидродинамической активации древесных частиц. Авторы пришли к выводу, что гидродинамическая активация не изменяет структуру полимерной композиции древесного вещества, но оказывает заметное влияние на его морфолого-анатомическое строение. Композиты, наполненные древесными частицами от 50 до 70 %, в ходе испытаний показали похожие результаты по потере массы, свойственные для натуральной древесины [8].

Сводные данные ТГ анализа представлены в таблице.

Результат термогравиметрического анализа образцов
The result of thermogravimetric analysis of the samples

Образец	ТГ			ДТГ	Зольный остаток после нагрева образца до 900 °С, %
	T_{10}	T_{50}	T_{75}	T_{dmax}	
ДАЦ	183	293	388	198	15,6
W10	203	323	413	228	17,3
W20	218	333	448	343	18,7
W30	233	343	553	263	22,2
W40	248	353	518	358	20,6
W50	283	358	523	363	21,5
W60	288	358	503	358	20,9
W70	293	358	473	358	19,9

Примечание: T_{10-75} – температура, при которой достигается потеря массы образца 10, 50 и 75 % от его исходной массы соответственно, °С; T_{dmax} – температура максимума на кривой ДТГ, °С.

Выводы

1. Физико-механические свойства композитов зависят от содержания древесных частиц, измельченных гидродинамическим способом.
2. Предел прочности при растяжении композита существенно не изменяется при добавлении 10 % наполнителя в сравнении с ненаполненным диацетатом целлюлозы.
3. Внесение 20 % древесного наполнителя в состав композиции способствует увеличению прочности, однако дальнейший рост содержания наполнителя отрицательно сказывается на прочности при растяжении.
4. Малоиспользуемые мягкие отходы лесопильных и деревоперерабатывающих производств в виде опилок могут быть вовлечены в получение ацетата целлюлозы и композиционных материалов на его основе.
5. Гидродинамически обработанные древесные частицы целесообразно использовать при изготовлении композиционных материалов на основе диацетата целлюлозы при их добавлении в количестве от 20 до 30 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Азаров В.И. Химия древесины и синтетических полимеров. 3-е изд., стер. СПб.: Лань, 2021. 620 с.
Azarov V.I. *Chemistry of Wood and Synthetic Polymers*. 3rd ed., stereotyped. St. Petersburg, Lan' Publ., 2021. 620 p. (In Russ.).
2. Галяветдинов Н.Р., Сафин Р.Р., Илалова Г.Ф., Прокопьев А.А. Исследование физико-механических характеристик биокompозитов с наполнителем из древесной муки // Системы. Методы. Технологии. 2023. Т. 59, № 3. С. 94–99.
Galyavetdinov N.R., Safin R.R., Ilalova G.F., Prokopiev A.A. Investigation of Physical and Mechanical Characteristics of Composites with Wood Flour Filler. *Sistemy. Metody.*

Tekhnologii = Systems. Methods. Technologies, 2023, vol. 59, no. 3, pp. 94–99. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2023-3-94-99>

3. Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Казизин С.Н., Намятов А.В. Формирование структуры плит малой плотности из гидродинамически активированных мягких отходов деревообработки // Изв. вузов. Лесн. журн. 2019. Т. 371, № 5. С. 148–157.

Ermolin V.N., Bayandin M.A., Kazitsin S.N., Namyatov A.V. Structure Formation of Low-Density Boards from Hydrodynamically Activated Soft Wood Waste. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2019, vol. 371, no. 5, pp. 148–157. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2019.5.148>

4. Захаров П.С., Шкуро А.Е., Кривоногов П.С. Исследование свойств наполненных ацетилцеллюлозных этролов // Вестн. технол. ун-та. 2020. Т. 23, № 2. С. 50–53.

Zakharov P.S., Shkuro A.E., Krivonogov P.S. Properties of Filled Acetyl Cellulose Ethrols. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta = Herald of Technological University*, 2020, vol. 23, no. 2, pp. 50–53. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/2071-8268-2023-1-32-36>

5. Зонova Н.В. Защитное действие металлоганических соединений применительно к волокнам и пленкам из ацетатов целлюлозы: дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, 2005. 147 с.

Zonova N.V. *Protective Effect of Organometallic Compounds on Cellulose Acetate Fibers and Films*: Cand. Tech. Sci. Diss. Tyumen, 2005. 147 p. (In Russ.).

6. Казизин С.Н., Василишин Д.В., Шишмарева А.В., Добрынкина Д.Д., Ворончихин В.Д. Исследование процесса получения ацетата целлюлозы из механоактивированных частиц березы // Хвойные бореал. зоны. 2024. Т. 42, № 2. С. 73–79.

Kazitsin S.N., Vasilishin D.V., Shishmareva A.V., Dobrynina D.D., Voronchikhin V.D. Research of the Process of Obtaining Cellulose Acetate from Mechanoactivated Birch Particles. *Khvoynye boreal'noi zony = Conifers of the Boreal Area*, 2024, vol. 42, no. 2, pp. 73–79. (In Russ.). <https://doi.org/10.53374/1993-0135-2024-2-73-79>

7. Липатов Ю.С. Физическая химия наполненных полимеров. М.: Химия, 1977. 304 с. Lipatov Yu.S. *Physical Chemistry of Filled Polymers*. Moscow, Khimiya Publ., 1977. 304 p. (In Russ.).

8. Лоскутов С.Р., Шапченкова О.А., Анискина А.А. Термический анализ древесины основных лесобразующих пород Средней Сибири // Сиб. лесн. журн. 2015. № 6. С. 17–30.

Loskutov S.R., Shapchenkova O.A., Aniskina A.A. Thermal Analysis of Wood of the Main Tree Species of Central Siberia. *Sibirskij lesnoj zhurnal = Siberian Journal of Forest Science*, 2015, no. 6, pp. 17–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.15372/SJFS20150602>

9. Нормакхатов Н.С., Чуркина К.М., Тураев А.С. Влияние расположения сульфатных групп в сульфатах целлюлозы на стабильность их макромолекулы // Химия растит. сырья. 2014. № 2. С. 61–66.

Normakhamatov N.S., Churkina K.M., Turaev A.S. Influence of the Location of Sulphate Groups in Cellulose Sulphates on Stability of Their Macromolecule. *Khimija Rastitel'nogo Syr'ya*, 2014, no. 2, pp. 61–66. (In Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.1402061>

10. Петрунина Е.А., Лоскутов С.Р., Миронов П.В. Гидродинамически активированная древесина сосны: термогравиметрия, дифференциальная сканирующая калориметрия // Строение, свойства и качество древесины – 2018: материалы 6-го Междунар. симп. им. Б.Н. Уголева, посвящ. 50-летию региональн. координацион. совета по соврем. проблемам древесиноведения. Новосибирск: СО РАН, 2018. С. 161–165.

Petrulina Y.A., Loskutov S.R., Mironov P.V. Hydrodynamically Activated Wood of Pine: Thermogravimetry, Differential Scanning Calorimetry. *Structure, Properties and Quality of Wood – 2018*: Proceedings of the 6-th International Symposium named after B.N. Ugolev, Dedicated to the 50th Anniversary of the Regional Coordination Council on Modern Problems of Wood Science. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2018, pp. 161–165. (In Russ.).

11. Сабирова Г.А., Сафин Р.Р., Хайруллин Р.З., Галяветдинов Н.Р., Кайнов П.А. Влияние концентрации наполнителя на физико-механические свойства древесно-наполненных материалов // Вестн. Поволж. гос. технол. ун-та. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. 2020. № 3(15). С. 24–34.

Sabirova G.A., Safin R.R., Khairullin R.Z., Galiavetdinov N.R., Kainov P.A. Influence of Filler Concentration on Physical and Mechanical Properties of Wood-Filled Materials. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii* = Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies, 2020, no. 3(15), pp. 24–34. (In Russ.).

<https://doi.org/10.25686/2542-114X.2020.3.24>

12. Сутягин В.М., Ляпков А.А. Физико-химические методы исследования полимеров. Томск: Томск. политехн. ун-т, 2008. 130 с.

Sutyagin V.M., Lyapkov A.A. *Physico-Chemical Methods for Studying Polymers*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ., 2008. 130 p. (In Russ.).

13. Урьяш В.Ф., Кокурина Н.Ю. Влияние источника получения и степени упорядоченности на физико-химические свойства целлюлозы и ее нитратов // Вестн. Нижегородски. ун-та им. Н.И. Лобачевского. 2011. Т. 1, № 6. С. 111–116.

Uryash V.F., Kokurina N.Yu. The Effect of Source and Degree of Ordering on Physico-Chemical Properties of Cellulose and its Nitrates. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo* = Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 2011, vol. 1, no. 6, pp. 111–116. (In Russ.).

14. Усова К.А., Захаров П.С., Шкуро А.Е., Глухих В.В. Влияние степени ацетилирования целлюлозы на свойства ненаполненного ацетата целлюлозы // Эффективный ответ на современные вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий: социально-экономические и экологические проблемы лесного комплекса: материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2023. С. 548–552.

Usova K.A., Zaharov P.S., Shkuro A.Ye., Gluhikh V.V. Influence of the Degree of Cellulose Acetylation on the Properties of Unfilled Cellulose Acetate. *An Effective Response to Modern Challenges Taking into Account the Interaction of Man and Nature, Man and Technology: Socio-Economic and Environmental Problems of the Forest Complex: Materials of the XIV International Scientific and Technical Conference*. Ekaterinburg, Ural State Forestry Engineering University Publ., 2023, pp. 548–552. (In Russ.).

15. Шкуро А.Е., Глухих В.В., Усова К.А., Чирков Д.Д., Захаров П.С., Вураско А.В. Получение биокomпозитов с полимерной фазой пластифицированных ацетатов целлюлозы с различной степенью ацетилирования // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 4. С. 155–168.

Shkuro A.E., Glukhikh V.V., Usova K.A., Chirkov D.D., Zakharov P.S., Vurasko A.V. Deriving Biocomposites of Polymer Phase Plasticised Cellulose Acetates with Varying Degrees of Acetylation. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 4, pp. 155–168. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-4-155-168>

16. Accorsi R., Cascini A., Cholette S., Manzini R., Mora C. Economic and Environmental Assessment of Reusable Plastic Containers: A Food Catering Supply Chain Case Study. *International Journal of Production Economics*, 2014, vol. 152, pp. 88–101.

<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.014>

17. Baghaei B., Skrifvars M. All-Cellulose Composites: A Review of Recent Studies on Structure, Properties and Applications. *Molecules*, 2020, vol. 25, no. 12, art. no. 2836.

<https://doi.org/10.3390/molecules25122836>

18. Delviawan A., Kojima Y., Kobori H. The Influence of Wet Milling Time of Wood Flour on the Water Resistance of Wood Plastic Composite. *Proceedings of UGSAS-GU & BWEL Joint Poster Session on Agricultural and Basin Water Environmental Sciences*, 2020, vol. 9.

19. Delviawan A., Kojima Y., Kobori H., Suzuki S., Aoki K., Ogoe S. The Effect of Wood Particle Size Distribution on the Mechanical Properties of Wood–Plastic Composite. *Journal of Wood Science*, 2019, vol. 65, art. no. 67.

<https://doi.org/10.1186/s10086-019-1846-9>

20. Edgar K.J., Buchanan C.M., Debenham J.S., Rundquist P.A., Seiler B.D., Shelton M.C., Tindall D. Advances in Cellulose Ester Performance and Application. *Progress in Polymer Science*, 2001, vol. 26, no. 9, pp. 1605–1688.

[https://doi.org/10.1016/S0079-6700\(01\)00027-2](https://doi.org/10.1016/S0079-6700(01)00027-2)

21. Farrokhpayam S.R., Shahabi M.A., Sheshkal B.N., Gargari R.M. The Morphology, Physical, and Mechanical Properties of Poly (Lactic Acid)-Based Wood Flour and Pulp Fiber Biocomposites. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 2021, vol. 18, pp. 20–25.

<https://doi.org/10.1007/s13196-021-00274-4>

22. Ganster J., Fink H.-P. Cellulose and Cellulose Acetate. *Bio-Based Plastics: Materials and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd., 2013, chapt. 3, pp. 35–62.

<https://doi.org/10.1002/9781118676646.ch3>

23. Gogoi R., Manik G. Mechanical Properties of Wood Polymer Composites. *Wood Polymer Composites. Composites Science and Technology*. Singapore, Springer, 2021, pp. 113–136. https://doi.org/10.1007/978-981-16-1606-8_6

24. Gravelsins R.J. *Studies of Grinding of Wood and Bark-Wood Mixtures with the Szego Mill*: Doc. of Philosophy Thesis. University of Toronto, 1998. 352 p.

25. Heinze T., El Seoud O.A., Koschella A. *Cellulose Derivatives: Synthesis, Structure, and Properties*. Springer, 2018. 531 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-73168-1>

26. Isa A., Minamino J., Kojima Y., Suzuki S., Ito H., Makise R., Okamoto M., Endo T. The Influence of Dry-Milled Wood Flour on the Physical Properties of Wood Flour/Polypropylene Composites. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, 2016, vol. 36, iss. 2, pp. 105–113. <https://doi.org/10.1080/02773813.2015.1083583>

27. Khan M.Z.R., Srivastava S.K., Gupta M.K. A State-of-the-Art Review on Particulate Wood Polymer Composites: Processing, Properties and Applications. *Polymer Testing*, 2020, vol. 89, art. no. 106721. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106721>

28. Korhonen J., Honkasalo A., Seppälä J. Circular Economy: the Concept and its Limitations. *Ecological Economics*, 2018, vol. 143, pp. 37–46.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>

29. Lima D.C., de Melo R.R., Pimenta A.S., Pedrosa T.D., de Souza M.J.C., de Souza E.C. Physical–Mechanical Properties of Wood Panel Composites Produced with *Qualea sp.* Sawdust and Recycled Polypropylene. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, pp. 4858–4865. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06953-7>

30. Liu D., Song J., Anderson D.P., Chang P.R., Hua Y. Bamboo Fiber and its Reinforced Composites: Structure and Properties. *Cellulose*, 2012, vol. 19, pp. 1449–1480.

<https://doi.org/10.1007/s10570-012-9741-1>

31. Liu Y., Feldner A., Kupfer R., Zahel M., Gude M., Arndt T. Cellulose-Based Composites Prepared by Two-Step Extrusion from Miscanthus Grass and Cellulose Esters. *Fibers and Polymers*, 2022, vol. 23, pp. 3282–3296. <https://doi.org/10.1007/s12221-022-0399-5>

32. Mohammed M.M., Rasidi M., Mohammed A.M., Rahman R.B., Osman A.F., Adam T., Betar B.O., Dahham O.S. Interfacial Bonding Mechanisms of Natural Fibre-Matrix Composites: An Overview. *BioResources*, 2022, vol. 17, iss. 4, pp. 7031–7090.

<https://doi.org/10.15376/biores.17.4.Mohammed>

33. Murayama K., Yamamoto M., Kobori H., Kojima Y., Suzuki S., Aoki K., Ito H., Ogoe S., Okamoto M. Mechanical and Physical Properties of Wood–Plastic Composites Containing Cellulose Nanofibers Added to Wood Flour. *Forest Products Journal*, 2018, vol. 68, iss. 4, pp. 398–404. <https://doi.org/10.13073/FPJ-D-18-00006>

34. Nagarajan K.J., Balaji A.N., Basha K.S., Ramanujam N.R., Kumar R.A. Effect of Agro Waste α -Cellulosic Micro Filler on Mechanical and Thermal Behavior of Epoxy Com-

posites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, vol. 152, pp. 327–339. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.255>

35. Naghdi R. Advanced Natural Fibre-Based Fully Biodegradable and Renewable Composites and Nanocomposites: A Comprehensive Review. *International Wood Products Journal*, 2021, vol. 12, iss. 3, pp. 178–193. <https://doi.org/10.1080/20426445.2021.1945180>

36. Özdemir F., Ayırlıms N., Yurttaş E. Mechanical and Thermal Properties of Biocomposite Films Produced from Hazelnut Husk and Polylactic Acid. *Wood Material Science & Engineering*, 2022, vol. 27, iss. 6, pp. 783–789. <https://doi.org/10.1080/17480272.2021.1955972>

37. Panaitescu D.M., Nicolae C.A., Gabor A.R., Trusca R. Thermal and Mechanical Properties of Poly(3-Hydroxybutyrate) Reinforced with Cellulose Fibers from Wood Waste. *Industrial Crops and Products*, 2020, vol. 145, art. no. 112071. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.112071>

38. Pelaez-Samaniego M.R., Yadama V., Lowell E., Espinoza-Herrera R. A Review of Wood Thermal Pretreatments to Improve Wood Composite Properties. *Wood Science and Technology*, 2013, vol. 47, pp. 1285–1319. <https://doi.org/10.1007/s00226-013-0574-3>

39. Pokryshkin S., Sypalova Y., Ivahnov A., Kozhevnikov A. Optimization of Approaches to Analysis of Lignin by Thermal Decomposition. *Polymers*, 2023, vol. 15, no. 13, art. no. 2861. <https://doi.org/10.3390/polym15132861>

40. Qiang T., Wang J., Wolcott M.P. Facile Preparation of Cellulose/Poly lactide Composite Materials with Tunable Mechanical Properties. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 2018, vol. 57, iss. 13, pp. 1288–1295. <https://doi.org/10.1080/03602559.2017.1381243>

41. Roman M., Winter W.T. Effect of Sulfate Groups from Sulfuric Acid Hydrolysis on the Thermal Degradation Behavior of Bacterial Cellulose. *Biomacromolecules*, 2004, vol. 5, iss. 5, pp. 1671–1677. <https://doi.org/10.1021/bm034519>

42. Salasinska K., Ryszkowska J. The Effect of Filler Chemical Constitution and Morphological Properties on the Mechanical Properties of Natural Fiber Composites. *Composite Interfaces*, 2015, vol. 22, iss. 1, pp. 39–50. <https://doi.org/10.1080/15685543.2015.984521>

43. Shah B.L., Selke S.E., Walters M.B., Heiden P.A. Effects of Wood Flour and Chitosan on Mechanical, Chemical, and Thermal Properties of Polylactide. *Polymer Composites*, 2008, vol. 29, iss. 6, pp. 655–663. <https://doi.org/10.1002/pc.20415>

44. Sharma A., Mandal T., Goswami S. Fabrication of Cellulose Acetate Nanocomposite Films with Lignocellulosic Nanofiber Filler for Superior Effect on Thermal, Mechanical and Optical Properties. *Nano-Structures and Nano-Objects*, 2021, vol. 25, art. no. 100642. <https://doi.org/10.1016/j.nanoso.2020.100642>

45. Shen D.K., Gu S. The Mechanism for Thermal Decomposition of Cellulose and its Main Products. *Bioresource Technology*, 2009, vol. 100, iss. 24, pp. 6496–6504. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.06.095>

46. Španić N., Jambreković V., Šernek M., Medved S. Influence of Natural Fillers on Thermal and Mechanical Properties and Surface Morphology of Cellulose Acetate-Based Biocomposites. *International Journal of Polymer Science*, 2019, vol. 2019, iss. 1, art. no. 1065024. <https://doi.org/10.1155/2019/1065024>

47. Werner K., Pommer L., Broström M. Thermal Decomposition of Hemicelluloses. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2014, vol. 110, pp. 130–137. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.08.013>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest