

**МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ**

Научная статья

УДК 674.817

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-2-121-131

**Структурно-механические свойства
гидродинамически активированной древесной массы
в аддитивных технологиях****В.Н. Ермолин, д-р техн. наук, проф.;** *ResearcherID: [X-9597-2019](https://orcid.org/0000-0002-2113-4142)**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2113-4142>***М.А. Баяндин**[✉], *канд. техн. наук, доц.;* *ResearcherID: [S-1990-2019](https://orcid.org/0000-0002-6228-2715)**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6228-2715>***А.В. Намятов, ассистент;** *ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5568-8725>***В.А. Острякова, ст. лаборант;** *ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1666-0324>*

Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660031; vnermolin@yandex.ru, mihailbayandin@yandex.ru[✉], namyatov2010@yandex.ru, karmen0703@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.01.22 / Одобрена после рецензирования 04.05.22 / Принята к печати 11.05.22

Аннотация. Аддитивные технологии методом 3D-печати являются перспективным направлением развития малоэтажного домостроения. Для этого используют различные материалы. Проведено исследование возможности применения в качестве материала для 3D-печати гидродинамически активированной древесной массы. Измельченная древесина в процессе активации под воздействием эффекта кавитации изменяет свое физико-химическое состояние. Данная древесная масса представляет собой твердообразную дисперсную систему, свойства которой зависят от влажности. Такую древесную массу можно транспортировать по трубопроводам, структурообразование происходит в процессе удаления влаги за счет возникновения аутогезионных взаимодействий между древесными частицами без использования адгезивов. Полученный таким образом материал имеет достаточно высокие прочность и водостойкость, что послужило предпосылкой для использования активированной древесной массы в аддитивных технологиях. Формирование изделия методом 3D-печати происходит путем послойного нанесения материала с определенными временными интервалами. Обязательным условием при этом является обеспечение стабильной формы и однородности структуры. Поэтому были выполнены исследования по определению предела ползучести древесной массы, показывающего величину напряжений, при превышении которых начинается интенсивное пластическое деформирование материала (течение). Данное исследование проводилось по методике академика П.А. Ребиндера с использованием конического пластометра. Изученный показатель существенно зависит от влажности массы. При снижении влажности предел ползучести значительно возрастает. Полученная зависимость является основой для научно-обоснованного определения толщины наносимых

слоев и временных промежутков между нанесениями. Однородность структуры в межслойной зоне определяет прочность всего изделия и обеспечивается влажностью в зоне контакта не менее 400 %. Создать высокую влажность в зоне контакта при низкой средней влажности массы можно за счет обработки СВЧ-излучением. В результате такой обработки происходит перераспределение влажности по толщине слоя. На поверхности она увеличивается, а в центре – снижается.

Ключевые слова: влажность древесной массы, однородность древесной массы, пластиномер, предел ползучести древесной массы, аддитивные технологии, экструдирование смеси, аутогезия, пьезотермическое воздействие, 3D-печать

Благодарности: Данный проект поддержан за счет средств гранта № 20-48-240001, предоставленного РФФИ, правительством Красноярского края и Краевым фондом науки.

Для цитирования: Ермолин В.Н., Баяндин М.А., Намятов А.В., Острякова В.А. Структурно-механические свойства гидродинамически активированной древесной массы в аддитивных технологиях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 2. С. 121–131. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-121-131>

Original article

Structural and Mechanical Properties of Hydrodynamically Activated Wood Pulp in Additive Technologies

Vladimir N. Ermolin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [X-9597-2019](https://orcid.org/0000-0002-2113-4142),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2113-4142>

Mihail A. Bayandin[✉], Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [S-1990-2019](https://orcid.org/0000-0002-6228-2715), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6228-2715>

Alexey V. Namyatov, Teaching Assistant;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5568-8725>

Valentina A. Ostryakova, Senior Laboratory Assistant;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1666-0324>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, prosp. im. gazety “Krasnoyarskiy rabochiy”, 31, Krasnoyarsk 660037, Russian Federation; vnermolin@yandex.ru, mihailbayandin@yandex.ru[✉], namyatov2010@yandex.ru, karmen0703@yandex.ru

Received on January 28, 2022 / Approved after reviewing on May 04, 2022 / Accepted on May 11, 2022

Abstract. One of the techniques of additive technologies is 3D printing. It is a perspective direction in the development of low-rise housing construction. The process of 3D printing can be performed with various materials. Although this study investigates the possibility of applying hydrodynamically activated wood pulp. A fragmented wood in the process of activation changes physical and chemical properties because of the cavitation effect. Such fragments in the form of the activated pulp are a solid dispersed system, whose properties depend on humidity. The activated pulp mass is created by moisture elimination, and it can be transported through pipelines. The structure is formed in the process of self-adhesion, without any adhesives, by the appearance of autogenous interactions between the wood particles. The obtained material has a sufficiently high strength and water resistance, which are the prerequisites for the use of activated wood pulp in additive technologies. The 3D printed products are constructed by applying some material in layers at certain time intervals. The main requirements are a steady shape and a homogeneity of the structure. Therefore,



the limit of creep rate for the pulp mass was determined that is a yield tensile stress point, above which the material (flow) undergoes an intensive plastic deformation. In this study, a conical plastometer was used according to the method of Academician P.A. Rebinder. The measured parameter depends significantly on the humidity of the pulp. There found an inverse relationship between the humidity and the creep limit. The obtained dependence is fundamental for determination of the thickness of applied layers and the time intervals between applications. The homogeneity of the structure in the interlayer section determines the strength of the entire product. It is obtained when the humidity level is greater than 400 % in the contact area. The high humidity level at the contact area with the low average humidity of the material can be created by microwave radiation treatment. Thus, the moisture is distributed across the thickness of the layer. The treatment also increases the humidity level on the surface and reduces it in the center of the material.

Keywords: humidity of wood pulp, homogeneity of wood pulp, plastometer, creep limit, additive technologies, mixture extrusion, self-adhesion, piezothermic influence, 3D printing

Acknowledgments: This project is supported by grant No. 20-48-240001 provided by the RFBR, the government of Krasnoyarsk Krai and Regional Funds of Science.

For citation: Ermolin V.N., Bayandin M.A., Namyatov A.V., Ostryakova V.A. Structural and Mechanical Properties of Hydrodynamically Activated Wood Pulp in Additive Technologies. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2023, no. 2, pp. 121–131. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-2-121-131>

Введение

Развитие аддитивных технологий является одним из приоритетов современной науки. Они находят применение в разных областях. Одна из них – домостроение методом 3D-печати. В этом направлении уже достигнуты позитивные результаты, в особенности при использовании композиций на основе цемента. В большинстве случаев в качестве основы применяют различные виды цементов с добавлением упрочняющих добавок, пластификаторов и ускорителей твердения [10, 13, 18]. Известно 2 главных подхода формирования строительных изделий. Наиболее широкое распространение получил метод 3D-печати материалов (ME3DP) путем экструдирования смеси под давлением [17]. Наравне с этим активно изучается струйный метод (BJ3DP) – послойное нанесение связующего и минеральных компонентов смеси [17]. В работе [12] для снижения материалоемкости и теплопроводности строительных изделий предлагается формирование их ячеистой структуры. В целом использование смесей на основе минеральных вяжущих в современных условиях сдерживает высокая энергоемкость производства сырья и материалов для 3D-печати и готовых строительных решений. Большой интерес представляет использование в таких технологиях растительного сырья. Это является шагом к развитию «зеленой» экономики и снижению углеродного следа.

В настоящее время есть опыт использования растительных волокон в качестве наполнителя в композициях для 3D-печати объемных деталей и форм. В полимерную матрицу в качестве армирующего элемента вносятся древесные волокна [11]. Так, в работе [16] предлагается применять для 3D-печати смесь полимолочной кислоты и полигидроксиалканоата, которая выступает в качестве матрицы. Содержание древесных волокон находится в диапазоне от 10 до 20 % массовых частей. В исследовании [8] приводятся данные о том,

что продукт марки Lauwoo может содержать до 40 % (по массе) древесного волокна, однако данные материалы используются в том числе в виде нити диаметром до 3 мм, что неприемлемо при формировании крупногабаритных строительных изделий.

Во всех отмеченных случаях структурообразование материала основано на применении связующих веществ. Это создает целый комплекс проблем на стадии эксплуатации и последующей утилизации этих материалов.

Перспективным является направление получения материалов без связующих веществ, структурообразование в таком случае происходит за счет аутогезионных взаимодействий между структурными компонентами. Направление активно развивается в области производства древесных плит без связующих веществ. Это достигается предварительной активацией древесного сырья. Положительные результаты дает паро-взрывной гидролиз, при котором древесные частицы подвергаются разрушению за счет быстрых изменений давления (декомпрессии) и температуры процесса. Данные воздействия приводят к разрушению легкогидролизуемых полисахаридов и деградации лигнина, что сопровождается разрушением клеточной структуры древесины и увеличением количества свободных функциональных групп [4]. Это позволяет получать методом горячего прессования древесные пластики с высокими механическими свойствами [21]. Но предлагаемые решения являются технически труднореализуемыми и не дают возможности производить материалы малой плотности без использования связующих веществ.

Другим способом активации являются химические воздействия на лигноуглеводную матрицу древесинного вещества. Известен целый спектр химических веществ, которые могут воздействовать на древесинное вещество, например органические кислоты, щелочи и соли [2, 3, 6, 20]. При таких воздействиях происходит частичная химическая деструкция компонентов клеточной стенки, что ведет к увеличению количества реакционноспособных групп, которые при последующем пьезотермическом воздействии образуют различные физические связи, а по мнению ряда исследователей [6, 20], – химические. Данный способ получения пластиков не нашел широкого распространения ввиду высокой энергоемкости и сложности технологии.

У исследователей вызывает интерес биотехнологический подход получения древесных прессованных композиционных материалов, базирующийся на микробиологическом (энзиматическом) способе биоактивации природных полимеров древесины [19]. При воздействии микроорганизмов, ферментов и дереворазрушающих грибов происходит направленная частичная деструкция компонентов клеточной стенки [14]. Под действием ферментов дереворазрушающих грибов расщеплению подвергаются в основном лигнин и гемицеллюлозы, а целлюлозные фибриллы практически сохраняют исходную структуру. В лигнине и полисахаридах образуются активные центры и реакционноспособные группы – фенольные, карбонильные, карбоксильные, аминогруппы, гидроксильные и другие, которые при последующем прессовании и воздействии высоких температур в местах контакта древесных частиц образуют прочные химические связи [7, 15]. Следует отметить, что в перечисленных способах активации формирование структуры древесного материала происходит только в условиях пьезотермических воздействий.

Большие перспективы открывает гидродинамическая активация древесины. Измельченную древесину (опилки) замачивают в воде и затем обрабатывают в гидродинамическом диспергаторе. В процессе обработки вследствие эффекта кавитации происходит фибриллирование древесных частиц, т. е. частичное расслоение клеточных стенок на отдельные пучки фибрилл. В результате образуются новые межфазные поверхности с активными функциональными группами, которые ранее участвовали в формировании надмолекулярных структур древесинного вещества. Вода гидратирует эти группы. Полученной древесной массе придают требуемую форму (например, форму плиты) и производят сушку конвективным или кондуктивным способом. При удалении воды между функциональными группами образуются межмолекулярные связи (в основном водородные) между соседними частицами. За счет этого происходит структурообразование материала без использования связующих веществ. Как показывают исследования, полученные таким образом плиты по своим механическим свойствам, при сопоставимой плотности, не уступают широко известным аналогам: ДСтП, MDF, ДВП – а по водостойкости даже превосходят их [5].

Активированная древесная масса может быть использована для создания изделий способом 3D-печати. Объективные предпосылки для этого следующие. Древесная масса представляет собой твердообразную дисперсную систему, вязкость и пластичность которой существенно зависят от влажности. Данный материал без особых сложностей транспортируется по трубопроводам. При формовании экструзионным методом с использованием различных насадок возможно придать древесной массе любую желаемую форму. Структурообразование происходит, как было отмечено выше, благодаря физико-химическому взаимодействию между древесными частицами в результате удаления влаги. Высыхание осуществляется как за счет пьезотермических воздействий (горячее прессование), так и в процессе выдержки на открытом воздухе. При этом физическая сущность происходящих процессов остается одинаковой. Изменяются только их интенсивность и свойства получаемого материала, в частности его плотность и, соответственно, прочность. При высыхании на открытом воздухе без предварительного уплотнения плотность материала при влажности 10 % получается порядка 200 кг/м³. Прочность при сжатии составляет 0,82 МПа, а коэффициент теплопроводности – 0,039 Вт/(м·К) [8]. При длительном вымачивании в воде материал сохраняет свои свойства.

Цель работы – доказательство принципиальной возможности применения гидродинамически активированной древесной массы для формирования однородной структуры материала аддитивным методом.

Объекты и методы исследования

Создание пространственных деталей методом 3D-печати происходит путем послойного нанесения материала с некоторыми временными интервалами. При этом обязательным условием является получение определенной стабильной формы и однородной структуры.

При послойном формировании объема нагрузка на нижележащие слои будет постепенно возрастать. Учитывая, что древесная масса не является иде-

ально упругим телом, ее деформации будут развиваться во времени в зависимости от разных факторов. Для прогнозирования деформаций формируемого изделия необходимо изучение реологических свойств активированной древесной массы.

Применительно к аддитивным технологиям важной характеристикой активированной древесной массы является предел ползучести. Он показывает предельные напряжения, при превышении которых начинается интенсивное пластическое деформирование материала (течение). Это значение говорит о допустимой нагрузке, которую можно приложить к нижележащему слою без его деформирования. Величина данной нагрузки зависит от плотности массы и толщины слоя. Нахождение предела ползучести создает основу для научно-обоснованного определения толщины слоев.

Изучение предела ползучести активированной древесной массы проводили по методике академика П.А. Ребиндера [9] с использованием конического пластометра. При исследовании фиксировали кинетику погружения конуса в массу, исключали снижение влажности массы. Наблюдения прекращали при неизменности глубины погружения в течение 2 сут. Продолжительность наблюдений, как правило, не превышала 9 сут. По полученной таким образом глубине погружения конуса рассчитывали предел ползучести.

Важным условием при формировании объема изделия аддитивным способом является однородность структуры материала в межслойной зоне. Это во многом предопределяет механические свойства материала и, соответственно, изделия в целом. Структурообразование активированной древесной массы представляет собой образование взаимодействий между межфазными поверхностями соседних частиц в процессе высыхания. Вода в данной дисперсной системе является важным компонентом процесса структурообразования. При удалении воды из древесной массы во время сушки вследствие возникновения сил капиллярной контракции [1] происходит сближение межфазных поверхностей и в конечном итоге образуются межмолекулярные взаимодействия. Ранее, при разработке технологии получения плит без связующих из активированной древесной массы, было отмечено, что их свойства очень сильно зависят от начальной влажности массы. Минимальная влажность массы, при которой в процессе высыхания может образоваться связанная структура материала, хотя и с низкими механическими показателями, составляет $\approx 120\%$ [5]. Наибольшая прочность достигается при начальной влажности более 250% .

При определении влажности активированной древесной массы применительно к аддитивным технологиям необходимо учесть следующие особенности. Массу транспортируют по трубопроводам. С увеличением ее влажности эта задача упрощается. Слои массы при формировании объема изделия наносятся через интервалы времени. Соответственно, верхняя поверхность последнего слоя некоторое время находится в контакте с окружающим воздухом. В результате испаряется вода и снижается влажность поверхностного слоя массы. При определенных условиях образования связанной структуры в межслойной зоне не произойдет. Поэтому было выполнено исследование влияния влажности в зоне контакта на межслойное взаимодействие.

Исследование проводили следующим образом. Из механоактивированной древесной массы, имеющей определенную влажность, формовали парные

заготовки размером $120 \times 120 \times 10$ мм. Их накладывали друг на друга без прижатия и выдерживали в помещении лаборатории до достижения ими влажности порядка 12 %. В качестве контрольных из древесной массы влажностью 410 % формовали заготовки размером $120 \times 120 \times 20$ мм, которые также выдерживали в лаборатории. Затем заготовки раскраивали на образцы размером $50 \times 50 \times 20$ мм и по стандартной методике определяли для них предел прочности на разрыв перпендикулярно плоскости контакта слоев.

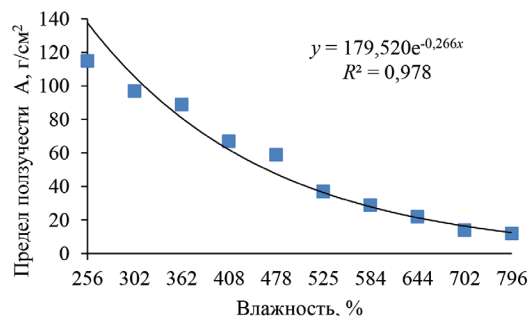
Влажность массы оказывает сильное и при этом противоположное влияние на процесс формирования изделий аддитивным методом. Для получения однородной структуры нужна высокая влажность, а для снижения ползучести, наоборот, – низкая. При этом высокая влажность массы увеличит продолжительность выдержки изделия для формирования его структуры. Поэтому необходим поиск путей снижения влажности массы, но при обеспечении однородной структуры в межслойной зоне. Перспективным направлением в решении этого вопроса является перераспределение влажности по толщине последнего слоя за счет ее увеличения на поверхности и снижения в центре, что позволило бы обеспечить необходимую влажность в зоне контакта при меньшей средней влажности. Как показал проведенный анализ, этого можно достичь предварительной обработкой последнего слоя СВЧ-излучением. В процессе такой обработки во влажных телах образуется избыточное парогазовое давление – вода может перемещаться из центральных слоев к поверхности.

Для проверки выдвинутого предположения были проведены предварительные исследования по следующей методике. Из активированной древесной массы определенной влажности формовали образцы размером $100 \times 100 \times 20$ мм, что имитировало слои, которые последовательно наносятся при формировании изделия. Образцы обрабатывали в микроволновой печи мощностью 600 Вт в течение 5 мин. После этого из образцов быстро вырезали слои толщиной 2 мм, у этих слоев устанавливали влажность сушильно-весовым способом. Слои вырезали с поверхности образцов, $\frac{1}{4}$ толщины и центральной части.

Результаты исследования и их обсуждение

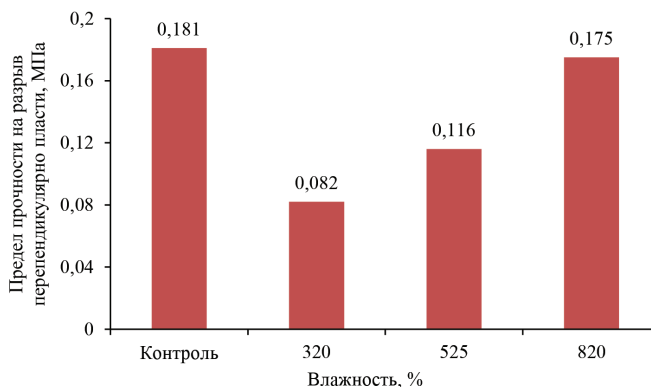
В результате проведенного исследования была получена зависимость предела ползучести активированной древесной массы от ее влажности (рис. 1). Как следует из приведенных на рис. 1 данных, реологические свойства древесной массы значительно зависят от ее влажности. При снижении влажности предел ползучести существенно возрастает. При формировании изделий по аддитивной технологии нагрузка на нижележащие слои со временем постепенно увеличивается. Одновременно с этим снижается влажность и, соответственно, растет предел ползучести. Кроме того, снижение влажности массы уменьшает ее плотность и, следовательно, нагрузку. Это создает предпосылки для создания формостабильных конструкций по такой технологии. Сопоставление предела ползучести, плотности массы и их зависимостей от влажности показывает, что при соблюдении определенных условий данный материал может использоваться в малоэтажном домостроении методом 3D-печати.

Рис. 1. Зависимость предела ползучести древесной массы от влажности
Fig. 1. Correlation between creep limit of wood pulp and humidity



Исследование влияния влажности древесной массы на формирование однородных структур в зоне контакта слоев показало следующее. При растяжении образцов разрушение всегда происходит по межслоевой зоне. Это говорит о том, что процесс структурообразования в этой зоне имеет отличие по сравнению с происходящим в объеме слоя. С увеличением влажности прочность на разрыв возрастает, но при этом она всегда ниже, чем у контрольных образцов (рис. 2). Следует отметить, что прочность на разрыв во многих случаях, в частности применительно к домостроению, не является критическим показателем. Поэтому, по нашему мнению, можно рекомендовать уровень влажности массы в зоне контакта слоев 400 % и более.

Рис. 2. Влияние влажности массы в зоне контакта на предел прочности на растяжение перпендикулярно пласти
Fig. 2. Correlation between humidity of wood pulp in the contact zone and tensile strength applied perpendicular to the planes



Результаты анализа перераспределения влажности по толщине образцов из активированной древесной массы в результате СВЧ-обработки приведены на рис. 3. Из полученных данных следует, что СВЧ-обработка позволяет при неизменной средней влажности образцов увеличить влажность поверхностных слоев и снизить – центральных. Рост влажности в поверхностной зоне создает благоприятные условия для взаимодействия между слоями, позволяет снизить среднюю влажность массы в слоях и, как следствие, увеличить предел ползучести и уменьшить продолжительность процесса сушки. Поэтому СВЧ-обработка применительно к аддитивным технологиям является перспективным направлением и требует более глубокого изучения. Как нам представляется, такая обработка совместима с технологией 3D-печати. Необходимое оборудование может быть сблокировано с печатающей головкой. В настоящее время уже есть опыт использования СВЧ-обработки для интенсификации процессов твердения бетона в домостроении методом 3D-печати [17].

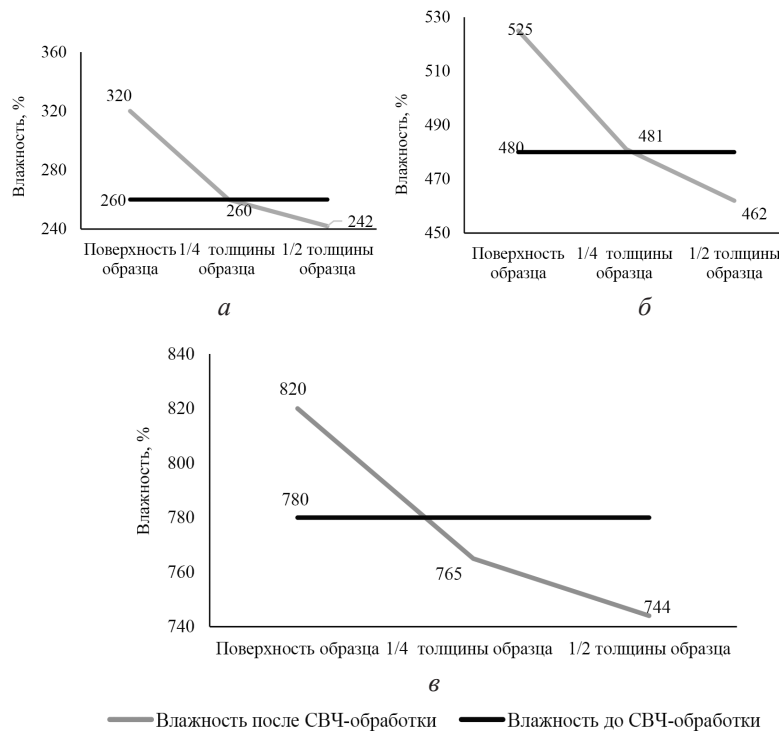


Рис. 3. Изменение влажности древесной массы по толщине образцов в результате СВЧ-обработки при начальной влажности массы, %: *a* – 320; *b* – 525; *v* – 820

Fig. 3. Change in humidity of wood pulp by layer thickness as a result of microwave radiation treatment with the initial humidity (%): *a* – 320; *b* – 525; *v* – 820

Выводы

1. Проведенное исследование показывает принципиальную возможность использования гидродинамически активированной древесной массы для создания объемных изделий по аддитивной технологии, в частности в малоэтажном домостроении методом 3D-печати.

2. Полученные зависимости предела ползучести активированной древесной массы от ее влажности являются научной основой для определения толщины наносимых слоев и временных интервалов между нанесениями.

3. Для достижения однородной структуры в межслойной зоне, обеспечивающей высокую прочность, влажность древесной массы в зоне контакта должна быть не менее 400 %.

4. Увеличение влажности древесной массы в зоне контакта, что необходимо для обеспечения высоких механических свойств материала, возможно за счет предварительной СВЧ-обработки. Это позволит снизить исходную влажность древесной массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Аведиков А.С., Остриков М.С., Дибров Г.Д. Об усадочном напряжении в дисперсных структурах // Докл. АН СССР. 1965. Т. 163, № 5. С. 1185–1188.

Avedikov A.S., Ostrikov M.S., Dibrov G.D. Contraction Stress in Dispersed Structures. *Doklady Akademii nauk USSR. Chemistry Series*, 1965, vol. 163, no. 5, pp. 1185–1188. (In Russ.).

2. Артёмов А.В., Буриндин В.Г., Савиновских А.В. Влияние карбамида на физико-механические свойства пластика на основе сосновых опилок // Вестн. технол. ун-та. 2021. Т. 24, № 5. С. 35–39.

Artemov A.V., Buryndin V.G., Savinovskikh A.V. The Influence of Carbamide on the Physico-Mechanical Properties of Plastic Made of Pine Sawdust. *Vestnik of Kazan National Research Technological University*, 2021, vol. 24, no. 5, pp. 35–39. (In Russ.).

3. Базарнова Н.Г., Маркин В.И., Катраков И.Б., Колосов П.В., Калюта Е.В., Чеprasова М.Ю. Методы получения лигноуглеводных композиций из химически модифицированного растительного сырья // Рос. хим. журн. 2011. Т. 55, № 1. С. 4–9.

Bazarnova N.G., Markin V.I., Katrakov I.B., Kolosov P.V., Kalyuta E.V., Cheprasova M.Yu. Methods for Obtaining Lignocarbhydrate Compositions from Chemically Modified Plant Raw Materials. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2011, vol. 55, no. 1, pp. 4–9. (In Russ.).

4. Ефремов А.А. Влияние условий термokatалитической активации древесины осины на состав водорастворимых продуктов // Химия природ. соединений. 1995. № 6. С. 20–25.

Efremov A.A. Influence of the Conditions for Thermocatalytic Activation of Aspen Wood on the Composition of Water-Soluble Products. *Khimiya prirodnykh soyedineniy = Chemistry of Natural Compounds*, 1995, no. 6, pp. 20–25. (In Russ.).

5. Казитцин С.Н. Получение древесных плит без связующих веществ из механоактивированных древесных частиц: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2017. 132 с.

Kazitsin S.N. *Production of Chipboards Without Binders from Mechanically Activated Wood Particles*: Cand. Eng. Sci. Diss. Ekaterinburg, 2017. 132 p. (In Russ.).

6. Карасев Е.И., Киселев И.Ю., Мерсов Е.Д., Киселева Г.В. Водостойкость древесноволокнистых плит. М.: ВНИПИЭИлеспром, 1986. 32 с.

Karasev E.I., Kiselev I.Yu., Mersov E.D., Kiseleva G.V. *Water Resistance of Wood Fibreboards*. Moscow, VNIPIEIsesprom Publ., 1986. 32 p. (In Russ.).

7. Кондрашенко В.И., Тарарушкин Е.В., Горшина Е.С., Кесарийский А.Г. Биопластики – древесные композиционные материалы, получаемые методами биотехнологии // Вестн. ДонНАСА. 2012. № 1(93). С. 17–24.

Kondrashenko V.I., Tararushkin E.V., Gorshina E.S., Kesariyskiy A.G. Bioplastics – Wood Composites Obtained by Biotechnology Methods. *Vestnik of DonNACA*, 2012, no. 1(93), pp. 17–24. (In Russ.).

8. Намятов А.В., Баяндин М.А., Казитцин С.Н., Ермолин В.Н. Исследование свойств плит малой плотности из механоактивированных древесных частиц без использования связующих веществ // Строение, свойства и качество древесины – 2018: материалы VI Междунар. симп. им. Б.Н. Уголева, посвящ. 50-летию Регионального Координационного совета по современным проблемам лесоведения, Красноярск, 10–16 сент. 2018 г. Новосибирск: СО РАН, 2018. С. 149–151.

Namyatov A.V., Bayandin M.A., Kazitsin S.N., Ermolin V.N. Investigation of the Properties of Low-Density Boards Made of Mechanically Activated Wood Particles Without Usage of Binders. *Structure, Properties and Quality of Wood – 2018: Proceedings of the 6th International Symposium named after B.N. Ugolev, dedicated to the 50th anniversary of the Regional Coordinating Council on Modern Problems of Wood Science. Krasnoyarsk, September 10-16, 2018*. Novosibirsk, SB RAS, pp. 149–151. (In Russ.).

9. Ребиндер П.А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика. Избр. тр. М.: Наука, 1979. 384 с.

Rebinder P.A. *Surface Effects in Dispersed Systems. Physico-Chemical Mechanics. Selected Works*. Moscow, Nauka Publ., 1979. 384 p. (In Russ.).

10. Bos F., Wolfs R., Ahmed Z., Salet T. Additive Manufacturing of Concrete in Construction: Potentials and Challenges of 3D Concrete Printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 2016, vol. 11, no. 3, pp. 209–225. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1209867>
11. Correa D., Papadopoulou A., Guberan C., Jhaveri N., Reichert S., Menges A., Tibbitts S. 3D printed Wood: Programming Hygroscopic Material Transformations. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2015, vol. 2, no. 3, pp. 106–116. <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0022>
12. Feng P., Meng X., Chen J.-F., Ye L. Mechanical Properties of Structures 3D Printed with Cementitious Powders. *3D Concrete Printing Technology*, Elsevier, 2019, pp. 181–209. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815481-6.00009-9>
13. Ferretti E., Moretti M., Chiusoli A., Naldoni L., de Fabritiis F., Visonà M. Rice-Husk Shredding as a Means of Increasing the Long-Term Mechanical Properties of Earthen Mixtures for 3D Printing. *Materials*, 2022, vol. 15, no. 3, p. 743. <https://doi.org/10.3390/ma15030743>
14. Forss K. Biotechnology in the Forest Industry. *Bioconversion of Plant Raw Material by Microorganisms: Proceedings of the 5th Finnish-Soviet Seminar*. Helsinki, University of Helsinki, 1983, pp. 13–21.
15. Kirk T.K., Shimada M. Lignin Biodegradation: The Microorganisms Involved and the Physiology and Biochemistry of Degradation by White-Rot Fungi. *Biosynthesis and Biodegradation of Wood Components*, Elsevier, 1985, pp. 579–605. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-347880-1.50025-8>
16. Le Duigou A., Castro M., Bevan R., Martin N. 3D Printing of Wood Fibre Biocomposites: From Mechanical to Actuation Functionality. *Materials and Design*, 2016, vol. 96, pp. 106–114. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.02.018>
17. Min K.-S., Park K.-M., Lee B.-C., Roh Y.-S. Chloride Diffusion by Build Orientation of Cementitious Material-Based Binder Jetting 3D Printing Mortar. *Materials*, 2021, vol. 14, no. 23, p. 7452. <https://doi.org/10.3390/ma14237452>
18. Perrot A., Rengeard D., Pierre A. Structural Built-Up of Cement-Based Materials Used for 3D Printing Extrusion Techniques. *Materials and Structures*, 2016, vol. 49, no. 4, pp. 1213–1220. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0571-0>
19. Unbehaun H., Konig S., Spindler D., Kerns G. Enzymatic Modification of Lignocellulosic Substances for the Production of Fiberboards. *Moscow University Chemistry Bulletin*, 2008, vol. 63, no. 2, pp. 126–130. <https://doi.org/10.3103/S002713140802017X>
20. Velásquez J.A., Ferrando F., Salvadó J. Binderless Fiberboard from Steam Exploded Miscanthus Sinensis: The Effect of a Grinding Process. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2002, vol. 60, no. 4, pp. 297–302. <https://doi.org/10.1007/s00107-002-0304-2>
21. Velásquez J.A., Ferrando F., Salvadó J. Binderless Fiberboard from Steam Exploded Miscanthus Sinensis: Optimization of Pressing and Pretreatment Conditions. *Wood Science and Technology*, 2003, vol. 37, no. 3-4, pp. 279–286. <https://doi.org/10.1007/s00226-003-0186-4>

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