



Research Article

Received: November 9, 2025

Accepted: December 14, 2025

Published: January 17, 2026

ISSN 2658-5553

Physical and mechanical properties of wood-polymer composite based on polylactide and aspen wood flour

Usov, Alexey Sergeevich¹ Lisyatnikov, Mikhail Sergeevich¹  Roshchina, Svetlana Ivanovna^{1*}  

¹ Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russian Federation; usovlexx@mail.ru (U.A.S.); mlisyatnikov@mail.ru (L.M.S.); rsi3@mail.ru (R.S.I.)

Correspondence: * email rsi3@mail.ru; contact phone +74922479810

Keywords:

Wood-polymer composite; Polylactide; Aspen wood flour; Compressive strength; Tensile strength; Flexural strength; Ecoplastic

Abstract:

The object of research is a wood-polymer composite (WPC) containing 75% polylactide and 25% aspen wood flour (hereinafter referred to as WPC composite). This work aimed to experimentally determine the numerical values of the physical and mechanical characteristics of the WPC composite to form a finite element model. **Method.** The study includes physical experiments to determine the physical and mechanical properties of the obtained WPC, as well as their comparison with the generally accepted physical and mechanical properties of pure polylactide and pure aspen wood. The experiments include determining the compressive strength, tensile strength and bending strength, according to accepted standards. **Results.** The compressive strength of the test material was 53.6 MPa, the tensile strength was 23.4 MPa, and the bending strength was 47.3 MPa. The determined values will allow calculating the supporting structure in a software package based on the finite element method. Compared with pure polylactide and pure wood, the compressive strength increased by 36% and 18%, respectively. This comparison indicates the need to introduce a reinforcement element into the calculated section to increase the strength limits.

1 Introduction

Для проектирования, строительства и обслуживания зданий и сооружений необходимы инновационные материалы, отвечающие растущим запросам строительной индустрии [1], [2]. Однако разработка передовых строительных материалов должна быть сопряжена с решением экологических проблем, в том числе за счет использования в качестве сырья отходов смежных отраслей [3]. В связи с этим широкое распространение получили древесные композиты, например, известные всем фанера, древесно-стружечная и ориентированно-стружечная плиты и др. [4]. Несмотря на наличие очевидных преимуществ, основным недостатком подобных композитов является применение в качестве основы связующих с высокой токсичностью [5], что в свою очередь вносит определенные ограничения на возможность использования таких изделий. Применение в качестве связующего биопластиков, производимых из органического сырья, помогает не только избавиться от токсичности, но и снизить зависимость от невозобновляемого сырья, например, нефти [6]. К биопластикам относятся ацетат целлюлозы (СА), полимолочная кислота (PLA), полигидроксибутират (РНВ) и др. [7]. К преимуществам использования биопластиков в древесно-полимерных композитах (WPC) можно отнести: биоразлагаемость, способность формированию изделий при помощи FDM-печати (моделирование методом

Usov, A.; Lisyatnikov, M.; Roschina, S.

Physical and mechanical properties of wood-polymer composite based on polylactide and aspen wood flour; 2026; AlfaBuild; 37 Article No 3701. doi: 10.57728/ALF.37.1



наплавления), пригодность для вторичной переработки, придание любой геометрии, простота в обработке [8].

Основными критериями выбора наполнителя для WPC служит его ценовая доступность и распространенность. Чаще всего в качестве сырья выступают измельченные отходы от деревообрабатывающих предприятий [9], [10], но также возможно применение отходов сельскохозяйственных комплексов, таких как шелуха риса [11]–[13] или подсолнечника [14]–[16]. Согласно статистическим данным дендрологического анализа, доля осиновых лесов в средней полосе России составляет приблизительно 20 % [17]. Однако значительная часть зрелых деревьев (от 30 % до 80 %) поражена гнилью из-за произрастания на переувлажненных почвах [18]. Это приводит к высокому проценту отходов при заготовке и крайне низкому выходу деловой древесины — всего 30-40 % от общего объема (у хвойных пород этот показатель достигает 60-80 %). В результате, при проведении сплошных рубок, древесина осины нередко остается невостребованной и расценивается как побочный продукт лесозаготовок, подлежащий утилизации, несмотря на ее физико-механические свойства, сопоставимые со свойствами сосны [19]. Перспективным решением обозначенной проблемы является переработка такой древесины в древесную муку, что позволит ее эффективно применять в качестве наполнителя в WPC.

Согласно исследованиям [20]–[22] физико-механические показатели древесно-полимерного композита напрямую зависят от массовой доли наполнителя. Увеличение его содержания, с одной стороны, способствует удешевлению стоимости конечного материала, но с другой, приводит к уменьшению прочностных характеристик по сравнению с чистым пластиком [23]. Кроме того, сухая древесная мука, представляющая собой природный гидрофильный полимер, подвержена повышенной абсорбции влаги [24], что влияет на неустойчивость габаритных размеров изделий. Совокупность указанных аспектов обуславливает установление оптимального количества наполнителя в диапазоне 20-30 %, представляя сбалансированное решение, учитывающее как экономическую целесообразность, так и эксплуатационные показатели композита.

По состоянию на 2025 год научные исследования, представляющие анализ физико-механических свойств древесно-полимерного композита, состоящего на 75 % из PLA и на 25 % из древесной муки осины, отсутствуют. В связи с этим, данная статья восполняет существующий пробел. Предметом данного исследования является изучение физико-механических характеристик композита WPC. Целью исследования является экспериментальное определение физико-механических характеристик композита WPC для формирования конечно-элементной модели. Заявленная цель достигалась решением ряда задач:

- создать филамент из композита WPC;
- выполнить FDM-печать образцов для испытаний из полученного филамента;
- провести испытания при сжатии, растяжении и статическом изгибе стандартных образцов;
- выполнить анализ, полученных в результате испытаний, данных.

2 Materials and Methods

2.1 Materials

Для определения физико-механических свойств WPC были выполнены образцы, определенных размеров и формы согласно техническим требованиям и характеристик оборудования для испытаний. Образцы выполнялись методом FDM-печати на 3D принтере Bambu Lab X1 (изготовитель "Shenzhen Tuozhu Technology Co., Ltd.", Китай, Гуандун) (Рисунок 1). Скорость печати образцов составила 40-60 мм/с. Температура печати составила 170-180°C. Расходный материал (WPC нить) для изделий изготавливали на экструдере собственной разработки (Рисунок 2). Через загрузочную воронку экструдера в канал установки подавались гранулы WPC, комбинированные с древесной мукой (сырье). Затем при помощи гидроцилиндра с ручным приводом осуществлялась подача сырья в зону нагрева. Нагрев канала в зоне высокой температуры осуществлялся с использованием хомутовых нагревателей с прокладками, достигая температуры 160°C. Сырье во время проходки через горячую зону нагревалось, пластифицировалось и протягивалось через сопло диаметром 1.75 мм. Полученная нить охлаждалась через водяные ванночки и наматывалась на бухты. Нить состоит из полилактида марки 3052D (Таблица 1) производства "Shenzhen Tuozhu Technology Co., Ltd." (Китай, Гуандун) и древесной муки из осины марки 200 со следующими характеристиками: влажность не более 8 %, массовая доля золы не более 1 %, массовая доля окрашенных примесей не более 4 %, массовая Usov, A.; Lisyatnikov, M.; Roschina, S.

доля металломагнитных примесей не более 0.0016 %, массовая доля остатка на сетке 0.18 не более 5-%, на сетке 025 не более 0.4%, массовая доля смол и масел не более 5 %; по ГОСТ 16361-87 Государственный стандарт Союза ССР ГОСТ 16361-87 “Мука древесная. Технические условия” <https://docs.cntd.ru/document/1200016983> массовым соотношением 75 % – полилактида, 25 % – древесной муки осины.

Таблица 1. Параметры полилактида марки 3052D
Table 1. Parameters of polylactide grade 3052D

Наименование свойства	Ед. изм.	Значение
Плотность	г/см3	1.24
Температура плавления	°C	152.4
Температура стеклования	°C	59.5
Прочность на изгиб	МПа	55.3
Прочность на растяжение	МПа	34.8
Прочность на сжатие	МПа	45.4



Рис. 1 – 3D принтер Bambu Lab X1
Fig. 1 – Bambu Lab X1 3D printer
Image by the author of the article

Решение создания материала из указанных составляющих связано с их характеристиками. Полилактид 3052D был выбран из-за его высоких физико-механических свойств, а также из-за относительно невысокой температуры плавления [25], так как при значительных температурах может произойти термическое разложение органического наполнителя, в качестве которого была выбрана мука древесины осины марки 200. В качестве образцов для испытаний из композита WPC были подготовлены несколько экземпляров различных форм (Рисунок 3).



Рис. 2 – Экструдер собственной разработки.

Fig. 2 – Extruder of our own design.

Image by the author of the article

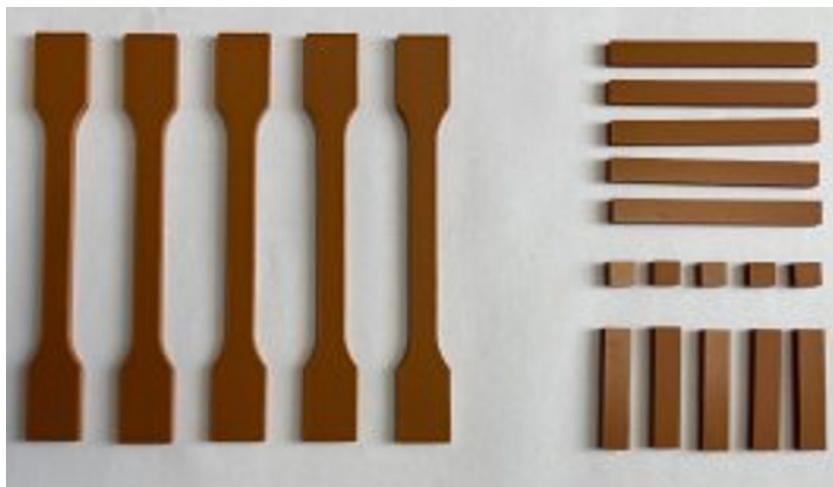


Рис. 3 – Изготовленные образцы для испытаний

Fig. 3 – Samples manufactured for testing

Image by the author of the article

2.2 Determination of static bending strength

Исследование на прочность при изгибе проводили согласно Межгосударственному стандарту ГОСТ 4648-2014 «Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб» <https://docs.cntd.ru/document/1200110853> на универсальной машине РЭМ-100 (Разрывная машина Метротест РЭМ-100, свидетельство об утверждении типа средств измерений № 75408, изготовитель ООО “Метротест”, Россия, г. Нефтекамск) со специализированной установкой для испытания на изгиб (Рисунок 4). Температурно-влажностный режим при проведении испытаний был нормальным (температура 25 ° С, относительная влажность окружающей среды 52 %). Испытуемый образец подвергался изгибу до разрушения с постоянной скоростью, равной 1 мм/мин, в середине между опорами. Образцы имели длину 80 мм, ширину 10 мм и толщину 4 мм, расчетная длина 64 мм. Все результаты представляют собой средние значения пяти измерений после статистической обработки.

2.3 Determination of tensile strength

Предел прочности при растяжении определяли по Межгосударственному стандарту ГОСТ 11262-2017 «Пластмассы. Метод испытания на растяжение» <https://docs.cntd.ru/document/1200158280> (Рисунок 5) на универсальной испытательной машине РЭМ-100 (Разрывная машина Метротест РЭМ-100, свидетельство об утверждении типа средств измерений № 75408, изготовитель ООО “Метротест”, Россия, г. Нефтекамск). Температурно-влажностный режим при проведении испытаний был нормальным. Нагрузка прикладывалась вдоль главной оси образца до разрушения, при скорости перемещения подвижного захвата разрывной машины 5 мм/мин, Размеры и форма образцов соответствуют типу 1А согласно Межгосударственному стандарту ГОСТ 11262-2017 Пластмассы. Метод испытания на растяжение <https://docs.cntd.ru/document/1200158280> Все результаты представляют собой средние значения пяти измерений после статистической обработки.

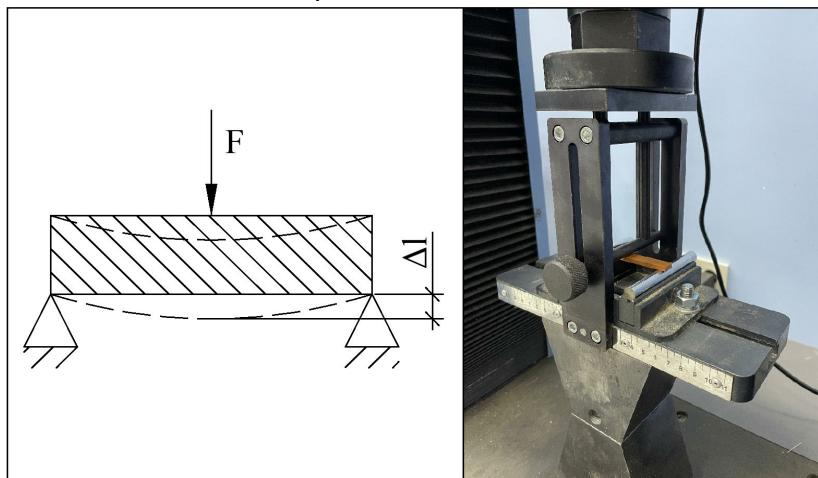


Рис. 4 – Испытания на статический изгиб

Fig. 4 – Static bending tests

Image by the author of the article

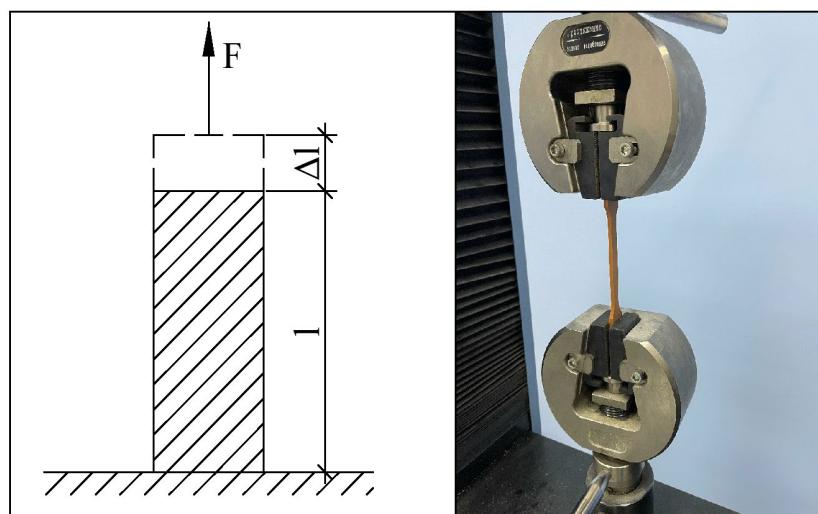


Рис. 5 – Испытание на растяжение

Fig. 5 – Tensile test

Image by the author of the article

2.4 Determination of compressive strength

Исследование на прочность при сжатии проводили согласно Межгосударственному стандарту ГОСТ 4651-2014 «Пластмассы. Метод испытания на сжатие» <https://docs.cntd.ru/document/1200110855> (Рисунок 6) на универсальной машине РЭМ-100 (Разрывная машина Метротест РЭМ-100, свидетельство об утверждении типа средств измерений № 75408, изготовитель ООО “Метротест”, Россия, г. Нефтекамск). Температурно-влажностный Usov, A.; Lisyatnikov, M.; Roschina, S.

Physical and mechanical properties of wood-polymer composite based on polylactide and aspen wood flour; 2026; AlfaBuild; 37 Article No 3701. doi: 10.57728/ALF.37.1

режим при проведении испытаний был нормальным. Испытуемый образец подвергался сжатию с постоянной скоростью до разрушения, равной 1 мм/мин, нагрузка прикладывается вдоль его главной оси. Образцы имели длину 10 мм, ширину 10 мм и толщину 4 мм. Все результаты представляют собой средние значения пяти измерений после статистической обработки.

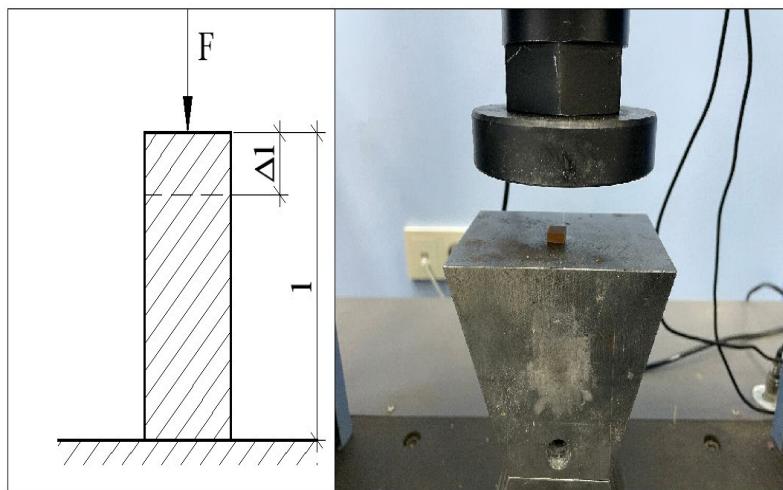


Рис. 6 – Испытание на сжатие
Fig. 6 – Compression test
Image by the author of the article

3 Results and Discussion

Внешний вид испытанных образцов показан на рисунке 7. Результаты исследования физико-механических свойств данных образцов представлены в таблице 2. По результатам проведенных экспериментов установлено, что образцы на сжатие имели наибольшую разрушающую нагрузку, наименьшую – образцы на изгиб. Образцы на растяжение имели промежуточные значения разрушающей нагрузки.



Рис. 7 – Внешний вид испытанных образцов
Fig. 7 – Appearance of the tested samples
Image by the author of the article

После обработки и анализа экспериментальных данных можно заметить, что, при добавлении 25 масс. % древесной муки осины в полилактид, показатель предела прочности на сжатие увеличился на 18 %, предел прочности на растяжение уменьшился на 33 %, предел прочности на изгиб уменьшился на 8 % (Рисунок 8). Полученные результаты позволяют сделать заключение о том, что добавление древесной муки меняет физико-механические свойства, делая материал более хрупким.

Usov, A.; Lisyatnikov, M.; Roschina, S.

Physical and mechanical properties of wood-polymer composite based on polylactide and aspen wood flour; 2026; AlfaBuild; 37 Article No 3701. doi: 10.57728/ALF.37.1

Таблица 2. Полученные значения пределов прочности
Table 2. Obtained values of tensile strength

Показатели		Вид нагрузки		
		Растяжение	Сжатие	Изгиб
Нагрузка, Н	Среднее значение	935	5360	78.8
	min ÷ max	869 ÷ 971	4780 ÷ 5470	74 ÷ 81.3
Деформация, мм	Среднее значение	8.4	2.4	6.9
	min ÷ max	6.7 ÷ 9.6	2.2 ÷ 2.5	6.7 ÷ 7.3
Предел прочности, МПа	Среднее значение	23.4	53.6	47.3
	min ÷ max	21.8 ÷ 24.3	47.8 ÷ 54.7	41.2 ÷ 49.8

В рамках настоящего исследования проведен сравнительный анализ экспериментально полученных физико-механических характеристик композита WPC с временными сопротивлениями цельной древесины осины. Для установления эталонных значений по цельной древесине осины был осуществлен анализ данных, представленных в ряде научных исследований [26–30]. На основании проведенного обзора выполнена статистическая обработка данных с последующим представлением гарантированных пределов прочности Таблице 3. Полученные показатели были использованы в качестве базы для сравнительной оценки механических свойств композита WPC с, разработанным нами, материалом.

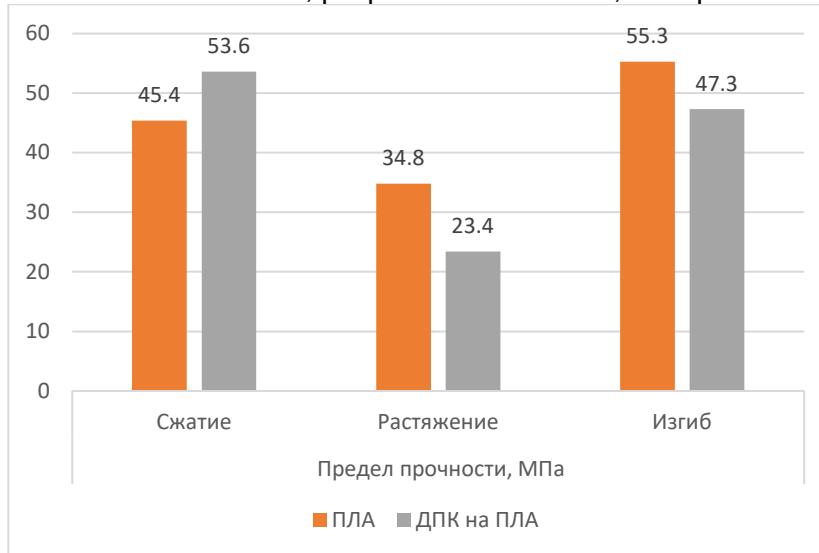


Рис. 8 – Изменение физико-механических свойств полилактида после добавления 25 масс. % древесной муки осины

Fig. 8 – Changes in the physical and mechanical properties of polylactide after adding 25 wt.% aspen wood flour

Image by the author of the article

Образцы, полученные из WPC на основе PLA, обладают следующими физико-механическими свойствами: предел прочности при сжатии 53.6 МПа; предел прочности при растяжении 23.4 МПа; предел прочности при изгибе 47.3 МПа. При сравнении с цельной древесиной осины 2 сорта исследуемый древесно-полимерный композит показал увеличение прочности при сжатии на 60 %, уменьшение прочности при растяжении и изгибе на 66% и 21% соответственно (Рисунок 9).

Таблица 3. Значения временных сопротивлений древесины осины из разных источников

Usov, A.; Lisyatnikov, M.; Roschina, S.

Physical and mechanical properties of wood-polymer composite based on polylactide and aspen wood flour; 2026; AlfaBuild; 37 Article No 3701. doi: 10.57728/ALF.37.1

Table 3. Tensile strength values of aspen wood from different sources

Название параметра	Цельная древесина осины [26]	Цельная древесина осины [27]	Цельная древесина осины [28]	Цельная древесина осины [29]	Цельная древесина осины [30]	Цельная древесина осины (гарантированные значения)
Предел прочности при сжатии, МПа	43	38.9	35.2	36.7	42.5	33.6
Предел прочности при растяжении, МПа	121	-	80	142.2	102.2	69.1
Предел прочности при изгибе, МПа	77	68.6	64	65.9	79.9	59.6

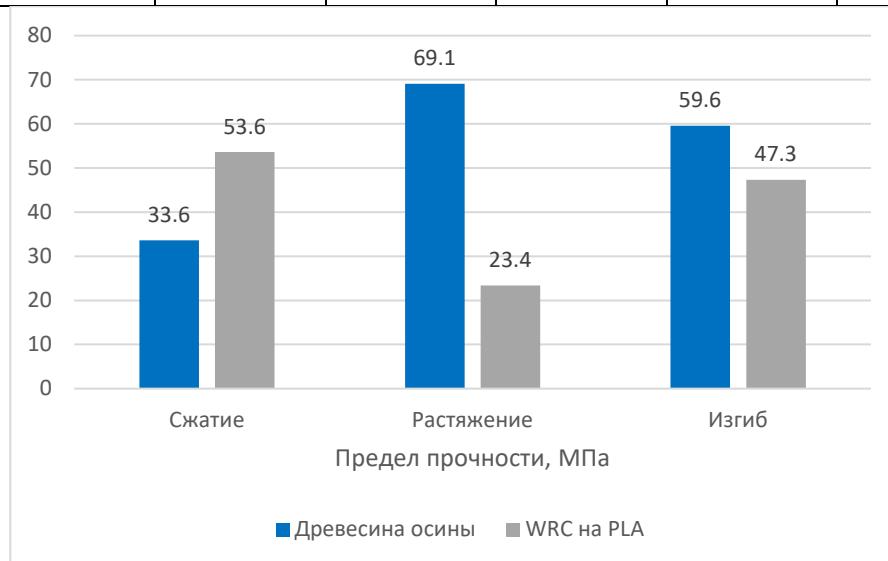


Рис. 9 – Сравнение физико-механические свойства цельной древесины и ДПК на ПЛА
 Fig. 9 – Comparison of physical and mechanical properties of solid wood and WPC on PLA
 Image by the author of the article

В выполненном исследовании, композит WPC показал не однозначные результаты. Увеличился предел прочности на сжатие, но пределы прочности на изгиб и растяжение заметно уменьшились. Получив данные значения пределов прочности материала, появляется возможность провести дальнейшие исследования при помощи расчетного комплекса, основанного на МКЭ, создав там новый материал. Такое моделирование позволит спрогнозировать поведение и определить несущую способность любых видов конструкций из WPC на PLA, перед проведением лабораторных испытаний на моделях или натурных конструкциях. Нельзя забывать, что физико-механические свойства исследуемого материала сильно зависят от свойств PLA, в дальнейшем будет проведена работа по сравнению WPC на основе PLA разных брендов и типов. Также для повышения прочностных характеристик конструкций, работающих на растяжение или изгиб, предполагается введение в расчетное сечение армирования из стеклопластиковой арматуры, что позволит нивелировать снижение соответствующих расчетных сопротивлений.

Usov, A.; Lisyatnikov, M.; Roschina, S.

Physical and mechanical properties of wood-polymer composite based on polylactide and aspen wood flour; 2026; AlfaBuild; 37 Article No 3701. doi: 10.57728/ALF.37.1

4 Conclusions

В рамках настоящего исследования удалось получить древесно-полимерный композит (WPC), состоящий на 75 % из полилактида 3052D (PLA) и на 25 % из древесной муки осины марки 200. Из полученного композита WPC был выполнен филамент для 3D печати. Затем была выполнена FDM-печать образцов на 3D принтере. В ходе печати созданный филамент показал себя с положительной стороны: не засорял сопло принтера, имел однородную текстуру, равномерно покрывал форму, быстро высыхал. Полученные образцы были исследованы на сжатие, растяжение и статический изгиб на универсальной испытательной машине.

В результате проведенных исследований сформулированы следующие выводы:

1. Предел прочности на сжатие испытываемого материала (53.6 МПа) выше, чем у цельной древесины осины 2 сорта и чистого PLA на 20 МПа и 8.2 МПа (+66 % и +18 %) соответственно.
2. При определении предела прочности на растяжение образцы из WPC на основе матрицы из PLA показали следующее значение: 23.4 МПа, что ниже, чем у цельной древесины на 45.7 МПа (- 66 %), и меньше, чем у чистого PLA на 11.4 МПа (-33 %).
3. Предел прочности на изгиб данного материала (47.3 МПа) ниже, чем у цельной древесины на 12.3 МПа (-21 %), и ниже, чем у PLA на 8 МПа (-14 %).

Полученные в ходе испытаний данные, позволяют оценить механические свойства композита, состоящего на 75 % из PLA и на 25 % из древесной муки осины, и сформировать область его конструкционного применения.

5 Fundings

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024- 0004, госзадание ВлГУ).

References

- 1 Chibrikin, D.A., Lukin, M.V., Lukina, A.V., Tyurikova, T.V. and Roshchina, S.I. (2022) Numerical Study of the Stress-Strain State of a Modified Wooden Beam. *Lesnoy Zhurnal . Russian Forestry Journal*, 167–178. <https://doi.org/https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-167-178>
- 2 Cheng, W.N., Yi, H., Yu, C.F., Wong, H.F., Wang, G., Kwon, E.E. and Tsang, Y.F. (2019) Biorefining Waste Sludge from Water and Sewage Treatment Plants into Eco-Construction Material. *Frontiers in Energy Research*, 7, 1–9. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2019.00022>
- 3 Roshchina, S.I., Lukin, M. V., Lukina, A.V. and Lisyatnikov, M.S. (2015) Recovery Wooden Beams Impregnating Polymer Composition Based on Epoxy Resins. *Forestry Engineering Journal*, 5, 183–190. <https://doi.org/https://doi.org/10.12737/14167>
- 4 Koshcheyev, A.A. (2021) Razrabotka Konstruktivnykh i Tekhnologicheskikh Resheniy Derevyannykh Balok s Krivolineynym Trosovym Armirovaniyem. Avtoref. dis. na soisk. uch. st kand. tekhn. nauk.–Arkhangelsk: SAFU
- 5 Kumar, S., Vedrtnam, A. and Pawar, S.J. (2019) Effect of Wood Dust Type on Mechanical Properties, Wear Behavior, Biodegradability, and Resistance to Natural Weathering of Wood-Plastic Composites. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 13, 1446–1462. <https://doi.org/10.1007/s11709-019-0568-9>
- 6 Borovkov, A.I., Vafaeva, K.M. and Vatin, N.I. (2024) Microstructure and Physicomechanical Properties of Glass-Basalt Fiber Reinforced Polymer Pipes: 3D Fractal Modeling. *AlfaBuild*, 32, 3203. <https://doi.org/http://doi.org/10.57728/ALF.32.3>
- 7 Repin, V.A., Lukina, A.V. and Usov, A.S. (2023) Rational Structural Solutions for Triangular Trusses. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*, 19, 199–209. <https://doi.org/http://doi.org/10.22363/1815-5235-2023-19-2-199-209>
- 8 Xie, H., Hou, X., Fang, H., Zhang, S., Wang, Z., He, P., Yang, Z., Fang, Y. and Yu, F. (2024) Flexural Behavior Evaluation of PET Foam Core Curved Sandwich Beam: Experimental Study and Numerical Simulation. *Construction and Building Materials*, 414. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135000>
- 9 Lisyatnikov, M.S., Chibrikin, D.A., Prusov, E.S. and Roshchina, S.I. (2024) Mechanical Properties of wood-polymer composite based on polylactide and aspen wood flour; 2026; AlfaBuild; 37 Article No 3701. doi: 10.57728/ALF.37.1

Usov, A.; Lisyatnikov, M.; Roschchina, S.

Physical and mechanical properties of wood-polymer composite based on polylactide and aspen wood flour; 2026; AlfaBuild; 37 Article No 3701. doi: 10.57728/ALF.37.1

- Characteristics of Polymer Composites Based on Epoxy Resins with Silicon Carbide. *Construction materials and products*, **7**, 3. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-5-3>
- 10 Urkhanova, L.A., Lkhasaranyov, S.A. and Ochirov, B.O. (2021) Sawdust Concrete Obtained with the Use of Wood Waste from the Republic of Buryatia and Ultrafine Additives. *Vestnik VSGUTU*, 69–74. <https://cyberleninka.ru/article/n/opilkobeton-poluchenny-s-primeneniem-drevesnyh-othodov-respubliki-buryatiya-i-ultradispersnyh-dobavok>
- 11 Borovkov, A.I., Vafaeva, Kh.M. and Vatin, N.I. (2024) Compressive Strength of Hybrid Glass-Basalt Fiber Reinforced Polymer Composite Tube: Multifractal Microstructure Characteristics. *AlfaBuild*, **32**, 3204. <https://doi.org/10.57728/ALF.32.4>
- 12 Kotlyarskaya, I.L., Sinelnikov, A.S., Iakovlev, N.A., Vatin, N.I. and Gravit, M.V. (2022) Structural and Technological Features of Modular Multi-Storey Buildings. A Review. *AlfaBuild*, 2304. <https://doi.org/10.57728/ALF.23.4>
- 13 Gutnikov, V.A., Kaykazsky, V.I. and Usanova, K.I. (2024) High Performance Polymer Zedex-100K Based on Polyethylene Terephthalate: Physical, Mechanical and Operational Properties. *AlfaBuild*, **30**, 3005. <https://doi.org/10.57728/ALF.30.5>
- 14 Yang, A., Liao, Z., Xu, Z., Liu, T., Fang, Y., Wang, W., Xu, M., Song, Y., Wang, Q. and Li, Y. (2025) Scalable Production of Robust and Creep Resistant Ultra-High Filled Wood-Plastic Composites. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, **289**, 111937. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111937>
- 15 Chen, L., Tang, W., Zhou, H., Li, Y., He, W., Hao, X., Chen, D., Li, D., Ou, R. and Wang, Q. (2023) Constructing a Rigid-Flexible Grid Structure for Simultaneously Strengthening and Toughening Bamboo Flour/Plastic Composites through the Introduction of Continuous Carbon Fabric Meshes via Multi-Layer Co-Extrusion. *Composites Science and Technology*, Elsevier, **242**, 110204. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2023.110204>
- 16 Chen, L., Gao, F., Liu, J., Li, D., Chen, D., Li, Y., Hao, X., Ou, R. and Wang, Q. (2025) Enhancing Wood-Plastic Composites for High-Performance Structural Applications. *Composites Part B: Engineering*, Elsevier, **299**, 112410. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2025.112410>
- 17 Khantimirov, A.G., Abdrukhmanova, L.A., Nizamov, R.K. and Khozin, V.G. (2022) Wood-Polymer Composites Based on Polyvinyl Chloride Reinforced with Basalt Fiber. *News KSUAE*, **3**, 75–81. https://doi.org/10.52409/20731523_2022_3_75
- 18 Williams, K., Ebdon, J.R. and Kandola, B.K. (2020) Intumescent Fire-retardant Coatings for Plastics Based on Poly (Vinylphosphonic Acid): Improving Water Resistance with Comonomers. *Journal of Applied Polymer Science*, Wiley Online Library, **137**, 47601. <https://doi.org/10.1002/app.47601>
- 19 Martynov, V., Lisyatnikov, M., Lukina, A. and Roshchina, S. (2024) Manufacturing Technology of Glued Wooden Structures with the Use of Wood Damaged by the Fire Impact of a Forest Fire. *Forestry Engineering Journal*, **13**, 158–177. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/10>
- 20 Hao, X., Xu, J., Zhou, H., Tang, W., Li, W., Wang, Q. and Ou, R. (2021) Interfacial Adhesion Mechanisms of Ultra-Highly Filled Wood Fiber/Polyethylene Composites Using Maleic Anhydride Grafted Polyethylene as a Compatibilizer. *Materials & Design*, The Authors, **212**, 110182. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110182>
- 21 Zhang, J., Delichatsios, M.A., Fateh, T., Suzanne, M. and Ukleja, S. (2017) Characterization of Flammability and Fire Resistance of Carbon Fibre Reinforced Thermoset and Thermoplastic Composite Materials. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Elsevier, **50**, 275–282. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.10.004>
- 22 Zhang, N., Zhang, M., Zhang, J., Guo, X., Wang, H., Niu, B. and Yan, H. (2019) Flexible Water-Resistant Intumescent Coatings: Fabrication, Characterization, and Fire Protective Performance. *Progress in Organic Coatings*, Elsevier, **137**, 105322. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105322>
- 23 Zhao, L. and Fei Xi, D. (2022) Flexural Performance of Reinforced Aluminum–Wood–Plastic Composite Beam: An Experimental and Numerical Investigation. *Thin-Walled Structures*, Elsevier, **180**, 109910. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.109910>
- 24 Ratanawilai, T. and Taneerat, K. (2018) Alternative Polymeric Matrices for Wood-Plastic Composites: Effects on Mechanical Properties and Resistance to Natural Weathering. *Construction and Building Materials*, Elsevier, **172**, 349–357. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.266>
- 25 Gao, L. and Tong, Y. (2024) Effect of Viscosity and Thermal Properties on Mechanical Properties



- of PLA Materials. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 12024. <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1742-6596/2680/1/012024>
- 26 Ugolev, B.N. (2011) Drevesinovedeniye i Lesnoye Tovarovedeniye. Akademiya. <https://www.booksite.ru/fulltext/ugolev/text.pdf>
- 27 Eliseyev, S.G. and Ermolin, V.N. (2008) Fiziko-Mekhanicheskiye Svoystva Drevesiny Raznykh Form Osiny. *Aktualnyye problemy lesnogo kompleksa*, 2, 92–95. <https://cyberleninka.ru/article/n/fiziko-mehanicheskie-svoystva-drevesiny-raznyh-form-osiny-populus-tremulae>
- 28 Johnson, R.P.A. (1947) Mechanical Properties of Aspen. *Lake States Aspen Report No. 7*, US Dept. of Agriculture, Forest Service, Lake States Forest Experiment Station, 1. <https://research.fs.usda.gov/treesearch/45481>
- 29 Roshchina, S.I., Lisyatnikov, M.S., Gribanov, A.S. and Glebova, T.O. (2015) Calculation and Strengthening of Maximum Stressed near Support Zones of High Glue-Wood Beam Constructions. *Forestry Engineering Journal.*, 5, 187–197. <https://doi.org/https://doi.org/10.12737/11276>
- 30 Heräjärvi, H. (2009) Effect of Drying Technology on Aspen Wood Properties. Finnish Society of Forest Science. <https://doi.org/https://doi.org/10.14214/sf.198>