

УДК 624.011.2

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-16-27](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-16-27)

EDN: ZYDRJF

АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАСТИКОВЫХ ШАЙБ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

И.В. ЗАЛИЛОВ✉

М.В. АРИСКИН, канд. техн. наук

Д.О. МАРТЫШКИН

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, ул. Германа Титова, д. 28, г. Пенза, 440028,
Российская Федерация

Аннотация

Введение. Соединения элементов современных деревянных конструкций в значительной степени включают в себя использование механических рабочих связей. Повышение надежности узловых соединений в современных деревянных конструкциях достигается за счет применения различного рода вкладышей, которые впрессовываются, вкладываются или клеиваются в древесину соединяемых элементов и тем самым обеспечивают передачу усилий от одного элемента к другому. Соединения на клеиваемых шайбах позволяют на относительно малой площади взаимного контакта передать значительные усилия, что обусловлено их большой несущей способностью. Вклеивание стальных шайб в местах повышенной концентрации напряжений при передаче усилий позволяет значительно перераспределить напряжения смятия/скалывания на большую площадь соединяемых деталей. Обладая достаточно высокой несущей способностью, стальные шайбы имеют существенный недостаток, а именно – высокую степень коррозии, что вызывает необходимость проведения дополнительных работ по защите металлических деталей от коррозии или замены материала на композитный. На основе результатов натурных испытаний образцов с применением клеенных пластиковых шайб рассмотрены варианты повышения прочностных и деформативных характеристик материала пластиковых шайб путем применения аддитивных технологий.

Цель. Повышение несущей способности соединения деревянных конструкций посредством повышения прочностных и деформативных характеристик материала клеенных шайб.

Материалы и методы. Представлена методика проведения натурных испытаний деревянных образцов с клеенными стеклопластиковыми шайбами. Деревянные элементы выполняются из сосны второго сорта, шайбы – из пластиков REC Formax и REC Friction. Испытание производилось на сжатие вдоль волокон, с контролем вертикальных деформаций сдвига. Рассмотрены методы повышения прочностных и деформативных характеристик пластиковых шайб путем применения аддитивных технологий.

Результаты. На основе данных натурных испытаний построены графики деформаций образцов на клеенных пластиковых шайбах, выполнен анализ полученных результатов. Установлена достаточно высокая пластичность материалов шайб. Предложены способы повышения прочностных и деформативных характеристик пластиковых шайб. Предложен рациональный вариант армирования для повышения жесткости и несущей способности пластиковых шайб.

Выводы. Для увеличения несущей способности соединений на клеенных стеклопластиковых шайбах принят вариант армирования пластика с применением аддитивных технологий CFC-печати и использования различных материалов армирующего волокна.

Ключевые слова: аддитивные технологии, анизотропные материалы, деревянные конструкции, соединение, армирование, шайба, пластик

Для цитирования: Залилов И.В., Арискин М.В., Мартышкин Д.О. Аддитивные технологии для повышения прочностных и деформативных характеристик пластиковых шайб соединений деревянных конструкций. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;42(3):16–27. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-16-27](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-16-27)

Вклад авторов

Залилов И.В. – сбор и анализ результатов натуральных испытаний, написание текста научной работы.

Арискин М.В. – постановка задач научной работы, анализ результатов научной работы.

Мартышкин Д.О. – анализ результатов научной работы.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 07.05.2024

Поступила после рецензирования 17.06.2024

Принята к публикации 04.07.2024

ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR IMPROVING THE STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF PLASTIC WASHER JOINTS OF WOODEN STRUCTURES

I.V. ZALILOV✉

M.V. ARISKIN, Cand. Sci. (Engineering)

D.O. MARTYSHKIN

Penza State University of Architecture and Construction, German Titov str., 28, Penza, 440028, Russian Federation

Abstract

Introduction. Modern wooden structures are mostly connected by mechanical working joints. To increase the reliability of nodal joints, various kinds of washers can be pressed, inserted, or glued into the wood of the elements, thus ensuring the transmission of forces from one element to another. Joints on glued washers can transfer significant forces on a relatively small area of mutual contact, which is due to their high load-bearing capacity. Thus, the gluing of steel washers in places of increased stress concentration during force transfer ensures a significant redistribution of buckling/cracking stresses over a larger area of the connected parts. However, steel washers are highly corrosive, so additional measures are required to protect metal parts from corrosion or to replace the material with the composites. The results of full-scale tests of the samples with glued-in plastic washers are used to consider the ways of increasing the strength and deformation characteristics of the plastic washer material by applying additive technologies.

Aim. To increase the load-bearing capacity of the wooden structure joints by increasing the strength and deformation characteristics of the glued washer material.

Materials and methods. A method for full-scale tests of wooden specimens with glued fiberglass washers is presented. The wooden elements are made of second grade pine, while the washers are of REC Formax and REC Friction plastics. The test was performed in compression along the fibers, with control of vertical shear deformations. The methods of increasing the strength and deformation characteristics of plastic washers by using additive technologies are considered.

Results. Using the data of full-scale tests the diagrams of sample deformations on glued plastic washers are drawn, the obtained results are analyzed. The sufficiently high plasticity of washer materials is established.

The ways for increasing the strength and deformation characteristics of plastic washers, particularly by reinforcing the plastic washers is suggested.

Conclusions. In order to increase the load-bearing capacity of the joints on the glued fiberglass washers, the reinforcement of plastic using additive CFC printing technologies and the use of different reinforcing fiber materials is adopted.

Keywords: additive technologies, anisotropic materials, wooden structures, joint reinforcement, washer, plastic

For citation: Zalilov I.V., Ariskin M.V., Martyshkin D.O. Additive technologies for improving the strength and deformation characteristics of plastic washer joints of wooden structures. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;42(3):16–27. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-16-27](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-16-27)

Authors contribution statement

Zalilov I.V. – collection and analysis the results of full-scale tests, performing calculations, writing the manuscript.

Ariskin M.V. – setting the tasks of scientific work, analyzing the results of scientific work.

Martyshkin D.O. – analyzing the data obtained.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflicts of interest.

Received 07.05.2024

Revised 17.06.2024

Accepted 04.07.2024

Введение

Одним из актуальных направлений в исследовании строительных структур является разработка узлов. Узловые соединения деревянных конструкций чаще всего выполняются с применением металлических связей, таких как клеенные стержни, металлические зубчатые пластины, клеенные плоские стержни, кольцевые шпонки, стальные шайбы [1–7] и др., которые клеиваются или впрессовываются в деревянные элементы, обеспечивая передачу усилий от одного элемента к другому. Обладая достаточно высокой несущей способностью, металлические вкладыши в процессе эксплуатации подвержены коррозии, что вызывает необходимость проведения антикоррозионных мероприятий как в процессе эксплуатации, так и при изготовлении соединений.

На основе достоинств соединений на клеенных стальных и стеклопластиковых шайбах [6, 8, 9] предложено коррозионностойкое соединение деревянных конструкций с применением клеенных пластиковых шайб [10]. В основу предлагаемого соединения положена идея передачи сосредоточенного усилия, действующего на механические вкладыши на достаточно большую площадь по сравнению с размером самой связи. При этом клеенные шайбы выполняются из коррозионностойкого материала. В качестве материала шайб приняты пластики REC Formax и REC Friction.

Главное отличие предложенного соединения от [6, 8, 9] заключается в применении аддитивных технологий для изготовления пластиковых шайб. Применение данной технологии

позволяет моделировать и изготавливать шайбы с различными параметрами (диаметр, толщина, внутреннее отверстие) и характеристиками (рис. 1).

Для установления перспективности использования клеенных пластиковых шайб проведены пилотные испытания [10], которые показали удовлетворительные результаты по сравнению с клеенными стеклопластиковыми шайбами [8, 9]. Но вместе с тем отмечена высокая пластичность шайб при нагружении образцов, что связано с пониженными значениями деформативных характеристик материала шайб. В связи с этим необходимо рассмотреть варианты повышения несущей способности клеенных пластиковых шайб за счет увеличения деформативных показателей пластиков.

Далее представлены анализ результатов пилотных испытаний и варианты увеличения деформативных характеристик пластиковых шайб.

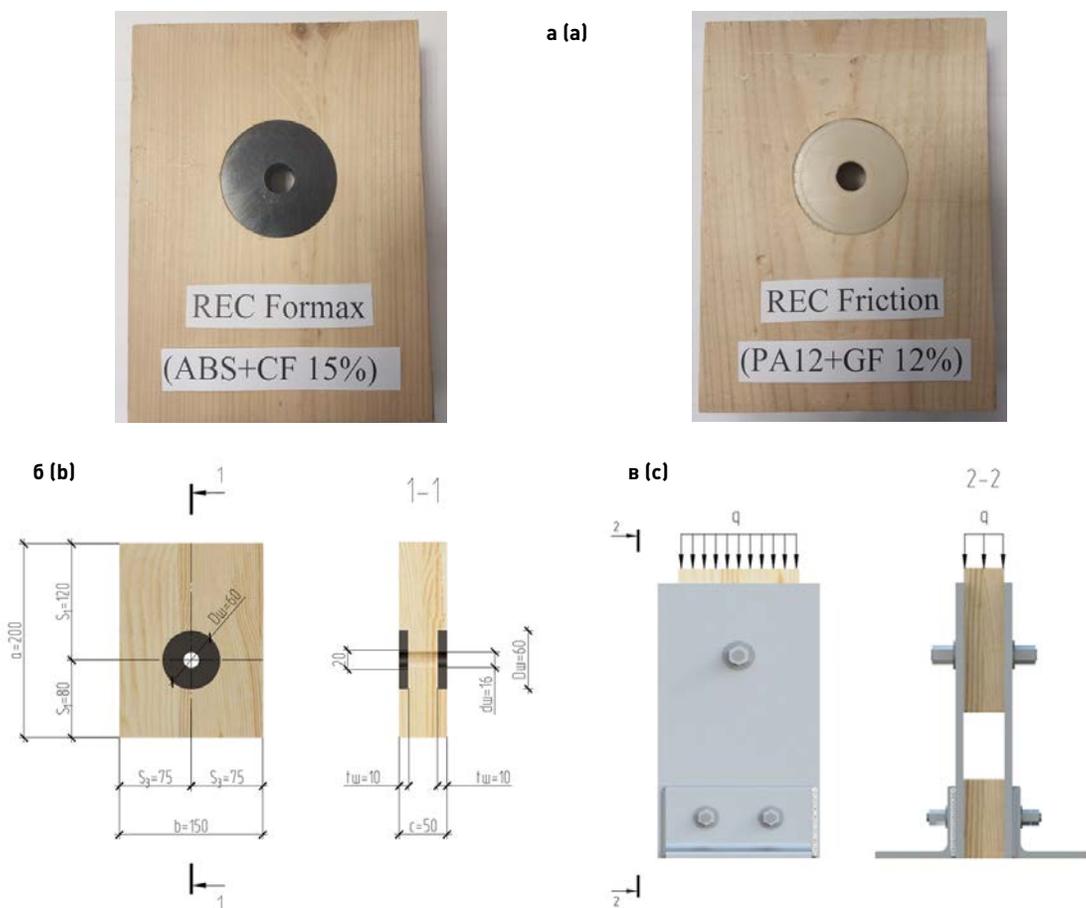


Рис. 1. Образцы на клеенных пластиковых шайбах: *а* – общий вид образцов; *б* – размеры образца; *в* – схема нагружения

Fig. 1. Samples with glued plastic washers: *a* – general view of samples; *b* – dimensions of samples; *c* – loading scheme

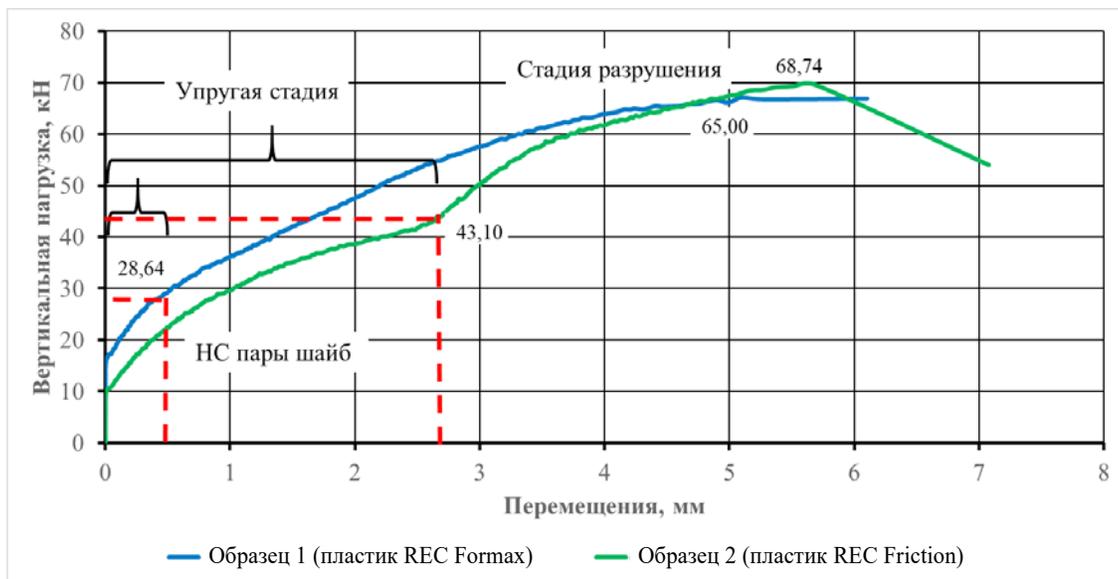


Рис. 2. Деформации сдвига в образцах
Fig. 2. Shear strains in the samples

Проведение натуральных испытаний и анализ результатов

Для натуральных испытаний были изготовлены образцы с вклеенными шайбами. В качестве материала для печати шайб применялись композитные пластики REC Formax и REC Friction [10].

Изготовление шайб производится на 3D-принтере Picaso Designer X PRO с технологией печати Fused filament fabrication (FFF).

Испытания проводились до полного разрушения образцов. Разрушающая нагрузка ($P_{разр}$) образца 1 составила 65,0 кН, для образца 2 – 68,74 кН. График нарастания деформаций сдвига представлен на рис. 2.

Как видно из графика, деформации возникают в образце 1 при нагрузке 15,86 кН, в образце 2 – при нагрузке 10,08 кН. При дальнейшем нагружении наблюдается рост деформаций: образец 1 до нагрузки 28,16 кН и перемещениях 0,43 мм, образец 2 до нагрузки 43,10 кН и перемещениях 2,63 мм, что можно считать упругой работой и принять за несущую способность пары шайб. После чего мы наблюдаем перегиб на графике – происходит смятие шайб (без разрушения) и в работу включается древесина, что было отмечено при испытаниях (резкий треск в образцах). Очевидно, это связано с пониженными значениями прочности и модуля упругости пластиков. Далее наблюдаем значительный рост деформаций при увеличении нагрузки до полного разрушения образцов.

Как отмечено ранее, невысокие деформативные показатели пластиков REC Formax и REC Friction: модуль упругости при растяжении равен 3210 и 1800 МПа соответственно, что значительно ниже, чем у стеклотекстолита КАСТ-В 21000 МПа по основе и 17000 по утку по ГОСТ 10292-74 [11].

Несмотря на наличие армирующих волокон, пилотные испытания показали относительно высокую пластичность материалов, что связано в первую очередь с малой длиной

армирующих волокон, а также с отсутствием их ориентации. В данном случае композитные волокна позволяют увеличить несущие характеристики и жесткость готового изделия по сравнению с аналогичным, выполненным только из материала матрицы данных пластиков (abs и pa12 соответственно), а также снизить объемную усадку при печати.

В связи с этим планируется испытать образцы с шайбами, изготовленными с использованием CFC-печати (continuous fiber coextrusion). Преимущество данной технологии заключается в создании армирования непрерывными волокнами, что позволяет значительно увеличить несущие характеристики. Высокие показатели армирующих волокон позволяют создавать детали с анизотропией и управлять ей в необходимых направлениях в структуре изделия. Печать на 3D-принтере позволяет полностью автоматизировать процесс армирования детали, тем самым обеспечивая одностадийный процесс производства.

Методы повышения прочностных и деформативных характеристик пластиковых шайб

Кокэструзия композитного волокна (CFC) – это процесс аддитивного производства для изготовления легких и прочных композитных деталей сложной формы и внутренней структуры. Процесс основан на внедрении композитного волокна в расплавленный пластик с помощью специально разработанной печатающей головки. Печатающая головка, показанная на рис. 3, включает два экструдера – пластиковый (FFF) и композитный (CFC). Композитный экструдер имеет два входа и одно сопло. Центральный вход предназначен для композитного материала, а боковые – для пластика. Композитное волокно проходит через центральный канал и покрывается расплавленным пластиком, подаваемым через боковой канал в блок экструдера.

Anisoprint Composer – аддитивное устройство для производства функциональных деталей из композитных материалов (рис. 4). За счет управляемой укладки армирующего волокна удается достичь высоких физико-механических характеристик изготавливаемой детали.

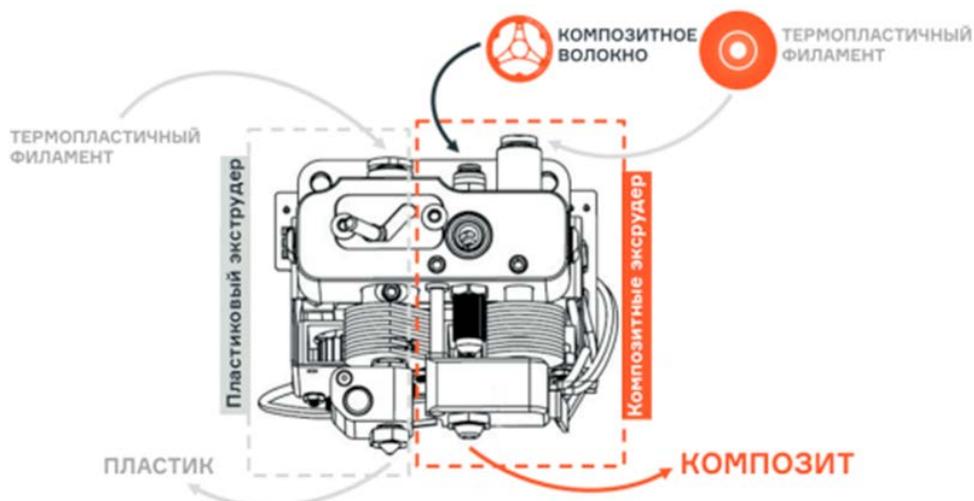


Рис. 3. Схема печатающей головы Anisoprint Composer

Fig. 3. Layout of the Anisoprint Composer print head

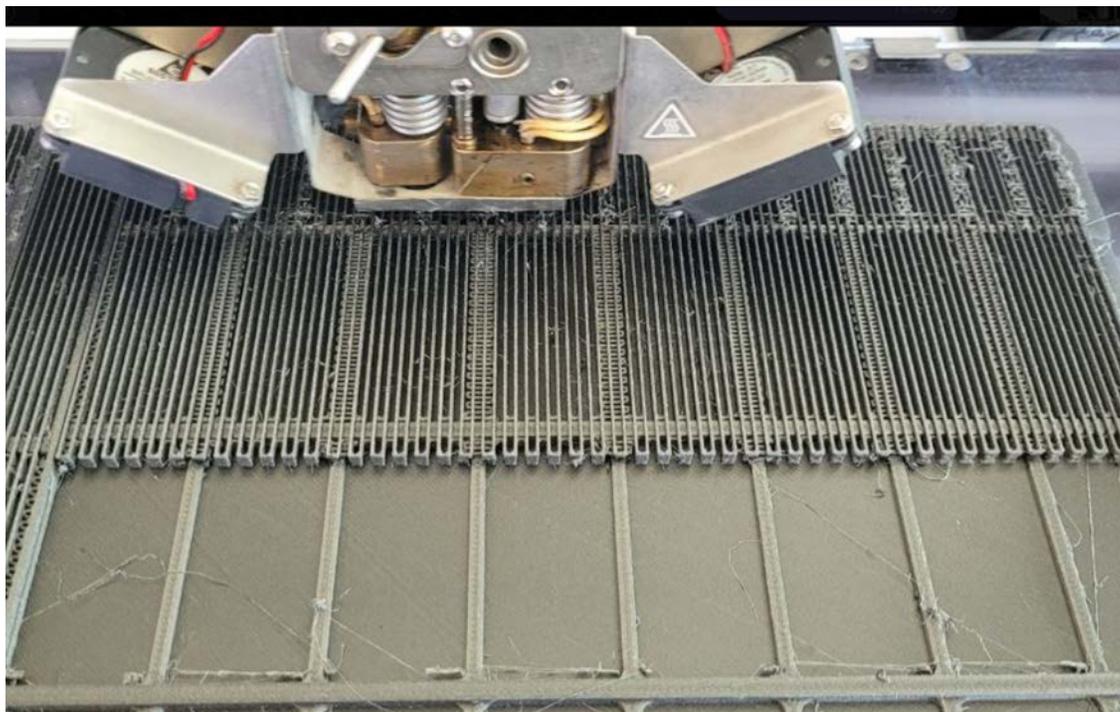


Рис. 4. Процесс печати Anisoprint Composer
Fig. 4. Anisoprint Composer printing process

Композитное волокно с расплавленным пластиком послойно укладывается через сопло экструдера на рабочую поверхность. После печати нескольких слоев пластика принтер начнет печать периметров и заполнение композитного волокна. Таким образом формируется деталь, армированная композитным волокном. Эта технология позволяет производить высококачественные армированные изделия, используя при этом гибкость форм и широкий ассортимент пластиков.

Преимущества данной технологии включают повышенную прочность и жесткость изде-

лий, а также возможность создавать сложные геометрические формы. Это находит применение в различных отраслях, включая авиацию, автомобилестроение, медицину и др.

Волокно может прокладываться по любым траекториям. Некоторые другие технологии, такие как, например, укладка ленты, не позволяют укладывать волокно под теми же углами и радиусом. Минимальный радиус окружности составляет 1,1 мм. Пример такой укладки показан на рис. 5.

Данная технология позволяет использовать различные пластики с температурой плавления до 270 °С. Можно использовать пластики ABS, PLA, PETG, PA и PC.



Рис. 5. Пример укладки волокна по сложной траектории
Fig. 5. Fiber laying pattern along a complex trajectory

Материал можно варьировать для достижения наилучших эксплуатационных или экономических параметров изделий в зависимости от поставленных целей.

В качестве армирующих волокон могут применяться углеродные, базальтовые и стеклянные волокна.

Углеродное волокно используется в тех случаях, когда нужна максимальная прочность. Его прочность сравнима с самыми прочными титановыми сплавами, но масса в три раза ниже. Примеры изделий с применением углеродного волокна показаны на рис. 6. Характеристики углеродного волокна представлены в табл. 1.

Базальтовое волокно характеризуется более низкой прочностью, однако является более доступным в экономическом плане. Это волокно было разработано в основном для использования в радиопрозрачных деталях, а также там, где не нужна большая жесткость. Представляет компромиссный вариант между прочностью и ценой. Примеры изделий с применением базальтового волокна показаны на рис. 7. Характеристики представлены в табл. 2.

Характеристики стекловолокна, пропитанного специальным полимерным составом, обеспечивающим качественную пропитку и адгезию между полимерами и волокном, представлены в табл. 3. Примеры изделий с применением стекловолокна показаны на рис. 8.

Процесс 3D-печати с армированием волокнами требует специального программного обеспечения и знаний, а также может потребовать настройки для оптимальных результатов

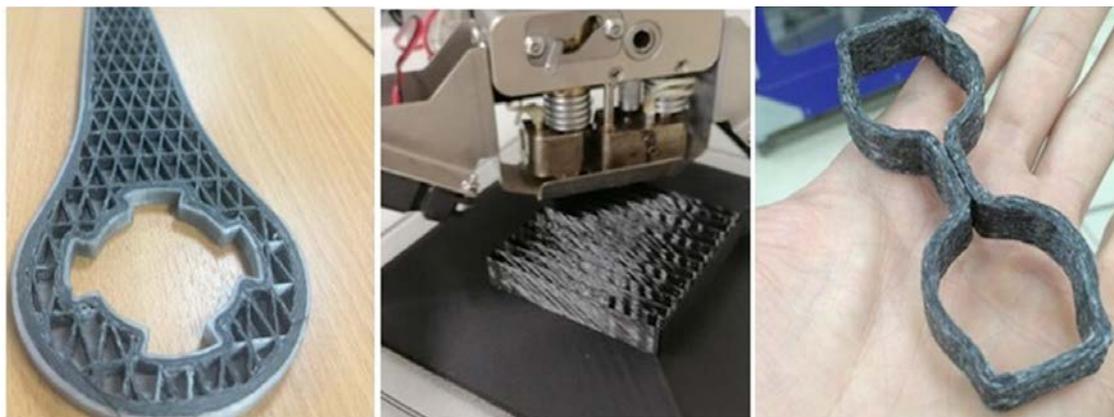


Рис. 6. Примеры печати углеродным волокном
Fig. 6. Examples of carbon fiber printing

Таблица 1

Характеристики углеродного волокна

Table 1

Characteristics of carbon fiber

Эффективный диаметр, мм	Линейная плотность, текс	Разрушающая нагрузка, Н	Модуль Юнга, ГПа	Максимальная температура печати, °С
0,35 ± 0,01	145 ± 5	212 ± 10	149 ± 5	270



Рис. 7. Примеры печати базальтовым волокном
Fig. 7. Examples of basalt fiber printing

Таблица 2

Характеристики базальтового волокна

Table 2

Characteristics of basalt fiber

Эффективный диаметр, мм	Линейная плотность, текс	Разрушающая нагрузка, Н	Модуль Юнга, ГПа	Максимальная температура печати, °С
0,28 ± 0,01	130 ± 10	110 ± 6	50 ± 4	270

Таблица 3

Характеристики стекловолокна

Table 3

Characteristics of glass fiber

Эффективный диаметр, мм	Линейная плотность, текс	Разрушающая нагрузка, Н	Модуль Юнга, ГПа	Максимальная температура печати, °С
0,32 ± 0,01	175 ± 5	100 ± 5	45 ± 5	270



Рис. 8. Примеры печати стекловолокном
Fig. 8. Examples of glass fiber printing

в зависимости от конкретных потребностей проекта.

Для подготовки печати используется специализированное программное обеспечение (ПО) – слайсер Anisoprint Aura, который включает в себя весь набор настроек для печати композитами.

ПО позволяет подготовить 3D-модель для печати, оптимизировать и настроить схему армирования и объемную долю армирующего волокна в разных частях детали для усиления нагруженных участков.

Для увеличения деформативных характеристик пластиковых шайб на рис. 9 представлен вариант армирования, предложенный технологом 3D-печати компании Anisoprint.

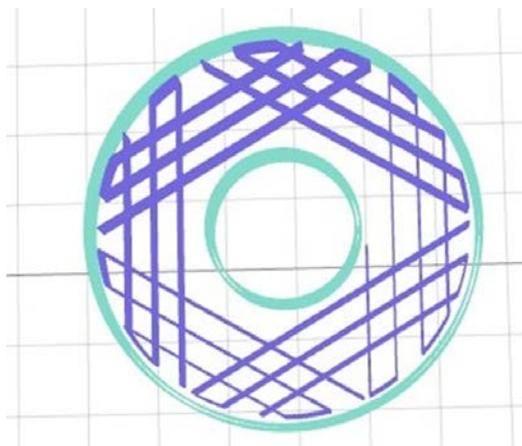


Рис. 9. Вариант армирования пластиковой шайбы
Fig. 9. Reinforcement of plastic washer

Заключение

Предварительные испытания соединений деревянных конструкций с применением клеенных пластиковых шайб показали удовлетворительные результаты. Однако отмечена пластичность шайб, что снижает несущую способность пары шайб. Рассмотрены методы повышения прочностных и деформативных характеристик пластиковых шайб путем применения аддитивных технологий, а именно – с использованием CFC-печати. За счет армирования непрерывными композитными волокнами планируется значительно увеличить жесткость и несущую способность шайб, а использование 3D-печати позволит на этапе проектирования элемента управлять параметрами, характеристиками и вариантами армирования изделия, тем самым обеспечивая рациональный расход материала.

Список литературы

1. Турковский С.Б., Погорельцев А.А., Преображенская И.П. Клеенные деревянные конструкции с узлами на клеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК). Москва: Стройматериалы; 2013.
2. Федосов С.В., Котлов В.Г., Актуганов А.А. Индустриальные деревянные конструкции на металлических зубчатых пластинах. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013;(11–12):39–43.
3. Руднев И.В., Жаданов В.И., Лисов С.В. Соединения элементов деревянных конструкций с применением клеенных стальных пластин. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014;(4):5–12.
4. Лисицкий И.И., Жаданов В.И., Руднев И.В. Деревянные фермы с узловыми соединениями на клеенных плоских стержнях. Промышленное и гражданское строительство. 2020;(4):9–15. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.04.09-15>
5. Вдовин В.М., Карпов В.Н., Галахов М.С. Клеенные кольцевые шпонки в соединениях деревянных конструкций. Пенза: ПГУАС; 2011.
6. Вдовин В.М., Арискин М.В., Дудорова Д.Д. Клеенные металлические шайбы в соединениях деревянных конструкций. Пенза: ПГУАС; 2012.

7. Ишмаева Д.Д., Вдовин В.М. Жесткие узлы клееных деревянных балочных элементов на клеенных стальных шайбах. Вестник Оренбургского государственного университета. 2014;(1):189–195.
8. Вдовин В.М., Мартышкин Д.О. Коррозионностойкое немагнитное соединение элементов деревянных конструкций. Региональная архитектура и строительство. 2019;(4):103–108.
9. Арискин М.В., Мартышкин Д.О. Соединения на клеенных стеклопластиковых шайбах в деревянных конструкциях. Региональная архитектура и строительство. 2022;(2):96–103. https://doi.org/10.54734/20722958_2022_2_96
10. Арискин М.В., Залилов И.В. Аддитивные технологии в изготовлении шайб соединений деревянных конструкций. Региональная архитектура и строительство. 2023;(3):144–151. https://doi.org/10.54734/20722958_2023_3_144
11. ГОСТ 10292-74. Стеклотекстолит конструкционный. Технические условия. Москва: Издательство стандартов; 2005.

References

1. *Turkovsky S.B., Pogoreltsev A.A., Preobrazhenskaya I.P.* Glued wooden constructions with nodes on the pasted rods in the modern construction (TsNIISK system). Moscow: Stroimaterialy Publ.; 2013. [In Russian].
2. *Fedosov S.V., Kotlov V.G., Aktuganov A.A.* Industrial wood constructions on metal gear plate. News of higher educational institutions. Construction. 2013;(11-12):39–43. [In Russian].
3. *Rudnev I.V., Zhadanov V.I., Lisov S.V.* Connections of wooden constructions elements with the use of the pasted steel plates. News of higher educational institutions. Construction. 2014;(4):5–12. [In Russian].
4. *Lisitsky I.I., Zhadanov V.I., Rudnev I.V.* Wooden trusses with nodal joints on glued flat rods. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering. 2020;(4):9–15. [In Russian]. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.04.09-15>
5. *Vdovin V.M., Karpov V.N., Halakhov M.S.* Ring dowel glued in timber structures joints. Penza: Penza State University of Architecture and Construction; 2011. [In Russian].
6. *Vdovin V.M., Ariskin M.V., Dudorova D.D.* Glued metal washers in the joints of wooden structures. Penza: Penza State University of Architecture and Construction (PSUAC); 2012. [In Russian].
7. *Ishmaeva D.D., Vdovin V.M.* Rigid connections of glued wooden beam elements on glued steel washers. Vestnik of the Orenburg State University. 2014;(1):189–195. [In Russian].
8. *Vdovin V.M., Martyshkin D.O.* Corrosion-resistant non-magnetic connection of elements of wooden structures. Regional Architecture and Engineering. 2019;(4):103–108. [In Russian].
9. *Ariskin M.V., Martyshkin D.O.* Connections on glued fiberglass washers in wooden structures. Regional Architecture and Engineering. 2022;(2):96–103. [In Russian]. https://doi.org/10.54734/20722958_2022_2_96
10. *Ariskin M.V., Zalilov I.V.* Additive technologies for making washers of wooden structure connections. Regional Architecture and Engineering. 2023;(3):144–151. [In Russian]. https://doi.org/10.54734/20722958_2023_3_144
11. State Standard 10292-74. Constructive glass-cloth-base laminate. Specifications. Moscow: Publishing House of Standards; 2005. [In Russian].

Информация об авторах / Information about the authors

Илья Вадимович Залилов[✉], аспирант кафедры строительных конструкций, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

e-mail: zalilov.ilya@yandex.ru

Ilya V. Zalilov[✉], Postgraduate student of the Department of Building Structures, Penza State University of Architecture and Construction, Penza

e-mail: zalilov.ilya@yandex.ru

Максим Васильевич Арискин, канд. техн. наук, доцент кафедры строительных конструкций, директор центра практики студентов и содействия трудоустройства выпускников, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

e-mail: m.v.ariskin@mail.ru

Maxim V. Ariskin, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Building Structures, Director of the Center for Student Practice and Employment Promotion of Graduates, Penza State University of Architecture and Construction, Penza

e-mail: m.v.ariskin@mail.ru

Даниил Олегович Мартышкин, аспирант кафедры строительных конструкций, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

e-mail: historical95@mail.ru

Daniil O. Martyshkin, Postgraduate student of the Department of Building Structures, Penza State University of Architecture and Construction, Penza

e-mail: historical95@mail.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author