

М.С. ЛИСЯТНИКОВ¹, М.В. ЛУКИН¹, Д.А. ЧИБРИКИН¹, С.И. РОЩИНА¹¹ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир, Россия

ПРОЧНОСТЬ ДРЕВЕСИНЫ, МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОЛИМЕРНОЙ КОМПОЗИЦИЕЙ С НАНОСТРУКТУРНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ

Аннотация. Увеличение прочностных свойств деревянных конструкций является важной задачей. Древесина может иметь множество дефектов, связанных с природным строением (пороки) или полученных во время эксплуатации (загнивание, усушка и т.д.). Для повышения прочности древесины и, следовательно, несущей способности конструкций на ее основе, используют как традиционные методы (усиление металлом, бетоном или железобетоном), так и перспективные в настоящее время методы модификации полимерными составами, в том числе с наноструктурным наполнителем.

В настоящей работе выполнено исследование по определению прочности образцов модифицированной древесины на сжатие вдоль волокон. Были рассмотрены четыре различные смолы и два наполнителя – углеродные нанотрубки и карбоксилированные углеродные нанотрубки, которые добавлялись в связующее в разных процентных соотношениях (от 0 до 1,1 %). В качестве модификации была применена технология импрегнирования низковязкой полимерной композиции в тело древесины с использованием импульсного воздействия избыточного давления по режиму 10-5-10-5-10 мин.

Модифицированные образцы испытывались при кратковременном действии нагрузок до разрушения. Результатами испытания на образцах определена возможность повышения прочности и снижения деформативности деревянных конструкций, модифицированных полимерной композицией на основе смолы с добавлением наноструктурного наполнителя.

Ключевые слова: строительство, древесина, модификация, полимер, прочность.

M.S. LISYATNIKOV¹, M.V. LUKIN¹, D.A. CHIBRIKIN¹, S.I. ROSHCHINA¹¹Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia

STRENGTH OF WOOD MODIFIED WITH POLYMER COMPOSITION WITH NANOSTRUCTURED FILLER

Abstract. Increasing the strength properties of wooden structures is an important task. Wood can have many defects associated with the natural structure (defects) or obtained during operation (rotting, shrinkage, etc.). To increase the strength of wood and, consequently, the bearing capacity of structures based on it, both traditional methods (reinforcement with metal, concrete or reinforced concrete) and currently promising methods of modification with polymer compositions, including those with nanostructured filler, are used.

In this work, a study was carried out to determine the compressive strength of modified wood samples along the fibers. Four different resins and two fillers were considered - carbon nanotubes and carboxylated carbon nanotubes, which were added to the binder in different percentages (from 0 to 1.1%). As a modification, the technology of impregnating a low-viscosity polymer composition into the wood body was applied using pulsed overpressure according to the 10-5-10-5-10 min mode.

Modified specimens were tested under short-term loads until failure. The results of testing on samples determined the possibility of increasing the strength and deformability of a wooden structure modified with a resin-based polymer composition with the addition of a nanostructured filler.

Keywords: building, wood, modification, polymer, strength.

Введение

Древесина, как конструкционный материал, обладает непревзойдёнными свойствами, являясь природным возобновляемым ресурсом. Технологичность обработки, доступность, высокие физико-механические свойства, экологичность позволяют эффективно использовать древесину в различных сферах строительной индустрии [1-3].

В настоящее время в России почти треть зданий эксплуатируются с деревянными конструкциями перекрытий и стропильных систем [4, 5]. Согласно статистике, в 80 % случаев отказ элемента деревянных конструкций происходит по причинам, вызванным биологическими и структурными дефектами древесины [6, 7]. К ним относят: загнивание опорных и контактных зон деревянных конструкций с металлическими, каменными и железобетонными конструкциями; образование дефектов в виде трещин и расслаивания деревянных элементов вследствие переменного температурно-влажностного режима эксплуатации; влияние пороков, расположенных в наиболее нагруженных зонах конструкции и т.п. В целях сохранения работоспособного состояния конструкций, продления их жизненного цикла, а также обеспечения эксплуатационной надежности возникает необходимость в осуществлении работ по усилению элементов [8]. Для достижения этой цели за рубежом и в нашей стране используются различные строительные материалы.

Большое распространение получили следующие методы восстановления концов деревянных балок с использованием стального проката и крепежа: устройство концевых протезов в виде парных боковых накладок из швеллеров на стальных болтах и хомутах; устройство протезов в виде деревянных парных боковых накладок на болтах, гвоздях или шпонках; устройство стальных сварных прутковых протезов, насаживаемых на обрезанный конец балки; устройство протезов в виде бруса из здоровой древесины, сращиваемого с обрезанным концом балки с помощью специальных соединительных элементов, сваренных из стальных профилей и стальных болтов; опирание обрезанного конца балки на кронштейн, сваренный из стальных профилей и закрепленный в стене.

Помимо металла [9], бетон и железобетон используют в качестве строительного материала для усиления деревянных конструкций зданий. Теоретические и экспериментальные исследования работы конструкции перекрытий, представляющее собой систему деревянных балок и связанной с ними железобетонной плиты, проводились в Техническом университете г. Лодзь (Польша). Свои исследования сотрудники университета применили при капитальном ремонте школьного здания. Перекрытие по деревянным балкам площадью 1000 м² было усилено путем его превращения в деревожелезобетонное, при этом было оставлено около 80 % старых деревянных балок. За счет использования существующих балок для деревожелезобетонного перекрытия расходы при ремонте составили 50 % стоимости деревожелезобетонного перекрытия с новыми деревянными балками; снизились также трудозатраты. В ряде стран, таких, как Франция и Финляндия успешно эксплуатируются деревожелезобетонные перекрытия с ребрами из клееной или цельной древесины и эффективными узлами соединения с железобетонной плитой.

В последние годы полимерные композиции находят широкое использование при восстановлении и ремонте деревянных конструкций в отечественной и зарубежной практике [10-27]. В г. Гамбург (Германия) восстанавливают клееные деревянные элементы путем заполнения в швы клеевой композицией на основе эпоксидной смолы, в которую добавляют целлюлозное волокно для повышения вязкости и снижения расхода клеевого состава. Также в Германии для упрочнения ослабленной древесины используют химические полимерные составы «Holzin». Составы представляют собой низковязкие прозрачные жидкости, отверждающиеся внутри древесины, не образуя на поверхности древесины пленок. Вследствие пропитки древесина приобретает необходимую сплошность и прочность, одновременно повышается ее стойкость к воздействию влаги, стойкость к атмосферным воздействиям и биостойкость.

Несмотря на обширное применение полимерных композиций с древесиной, остается много моментов, которые требуют глубокого изучения. Большое внимание уделяется направленному изменению свойств модификатора: он должен иметь низкую вязкость, малую испаряемость, обладать полярностью для лучшего проникания в капиллярную структуру древесины и физико-химического взаимодействия с компонентами древесины. Отверждение модификатора в древесине не должно сопровождаться значительной усадкой и требовать сильного нагрева и длительного времени. После отверждения модификатор должен обладать высокой стойкостью к действию воды, кислот, щелочей, быть прочным при статическом и динамическом нагружении, а также экологически безопасным.

Исследования последних лет позволяют выделить эффективность наномодификации [28-38], в частности, углеродными нанотрубками (УНТ) в том числе карбоксилированными (кУНТ). Углеродные наноструктурные наполнители привлекают особое внимание, поскольку ожидается, что композиты на их основе будут обладать улучшенными механическими свойствами. Следовательно, упрочнение древесины материалами на основе полимеров является актуальной задачей. Таким образом, требуется создание полимерной композиции с наноструктурным наполнителем для модификации древесины, а также разработка самого процесса модификации.

Перед проведением натурных опытов, было принято решение выполнить эксперименты на модифицированных образцах.

Материалы и методы

Основные этапы экспериментального исследования включают в себя:

1. Подбор компонентного состава полимерной композиции.
2. Определение возможности повышения прочности и снижения деформативности деревянной конструкции, модифицированной полимерной композицией на основе смолы с добавлением УНТ/кУНТ.
3. Определение разрушающей нагрузки образцов модифицированной древесины, при непрерывном статическом нагружении.

Каждый этап является важным звеном эксперимента. На первом этапе определяется компонентный состав полимерной композиции. Оцениваются ее технологические свойства. На втором, исследуются технологические режимы модификации древесины. Третий этап предусматривает изучение под нагрузкой совместной работы древесно-полимерного композита. На четвертом, анализируются прочностные свойства модифицированных образцов и образцов без модификации.

В настоящем исследовании были рассмотрены исходные связующие (смолы) полимерной композиции: Анакрол 901, Анакрол 90W2, меламиновая смола, Эталак. Для улучшения физико-механических свойств данных полимеров вводились УНТ/кУНТ, массовую долю которых необходимо было определить экспериментально. Основываясь на опыте предыдущих исследований, для установления степени влияния углеродных нанотрубок на физико-механические и технологические свойства полимерной композиции были определены следующие соотношения УНТ от общей массы связующего: 0 %; 0,2 %; 0,3 %; 0,4 %; 0,5 %; 0,8 %; 1,0 %; 1,1 %.

На втором этапе изготавливались образцы согласно ГОСТ 16483.10–73 «Древесина. Методы определения предела прочности при сжатии вдоль волокон» и ГОСТ 21523.8-93 «Древесина. Метод определения модуля упругости модифицированной древесины при сжатии». Модификация деревянных образцов (см. фото 1) в настоящей работе выполнялась термохимическим способом по следующей методике:

- отбор цельнодеревянных образцов из эксплуатируемых конструкций требуемых геометрических размеров;
- погружение в емкость с заполненной полимерной композицией и модификация с различными технологическими режимами;
- полимеризация состава холодным или термokatалитическим способом путем прогрева, в зависимости от требования к отверждению исходных смол.



Фото 1 – Модифицированные деревянные образцы

Было исследовано три технологических режима:

- 30 мин (в течение 30 минут образец подвергался нагнетанию полимерной композицией с использованием воздействия избыточного давления);
- 15-5-15 мин (в течение 15 минут образец подвергался нагнетанию полимерной композицией затем образец «отдыхал» 5 минут, затем повторялось нагнетание полимерной композиции в течение 15 минут);
- 10-5-10-5-10 мин (в течение 10 минут образец подвергался нагнетанию полимерной композицией затем образец «отдыхал» 5 минут, затем повторялось нагнетание полимерной композиции в течение 10 минут с чередованием).

Определение прочностных свойств модифицированных деревянных образцов и характера их разрушения предполагало проведение испытаний при кратковременном действии нагрузок. Результатом таких испытаний являлось определение разрушающей нагрузки (критического напряжения) и значения деформации у образцов. Исследования проводились на испытательной машине РЭМ-100-А-1. Машина испытательная универсальная предназначена для механических испытаний в режиме растяжения, сжатия и изгиба образцов и изделий из материалов, разрушающая нагрузка для которых не превышает 100 кН. Образцы нагружали равномерно с постоянной скоростью перемещения нагружающей головки машины (см. фото 2). Скорость перемещения нагружающей головки испытательной машины составляла 4 мм/мин.



Фото 2 – Испытание модифицированных образцов

Полученные экспериментальные данные прочностных свойств образцов модифицированной древесины сравнивались с результатами испытаний образцами без модификации. По результатам испытаний была проведена статистическая обработка опытных данных.

Результаты исследования и их анализ

В ходе лабораторных испытаний установлено, что наибольшую прочность на сжатие показали образцы, модифицированные полимерной композицией с включением кУНТ 0,5 % от массы связующего. Результаты испытаний различных составов показаны на рисунках 1-4.

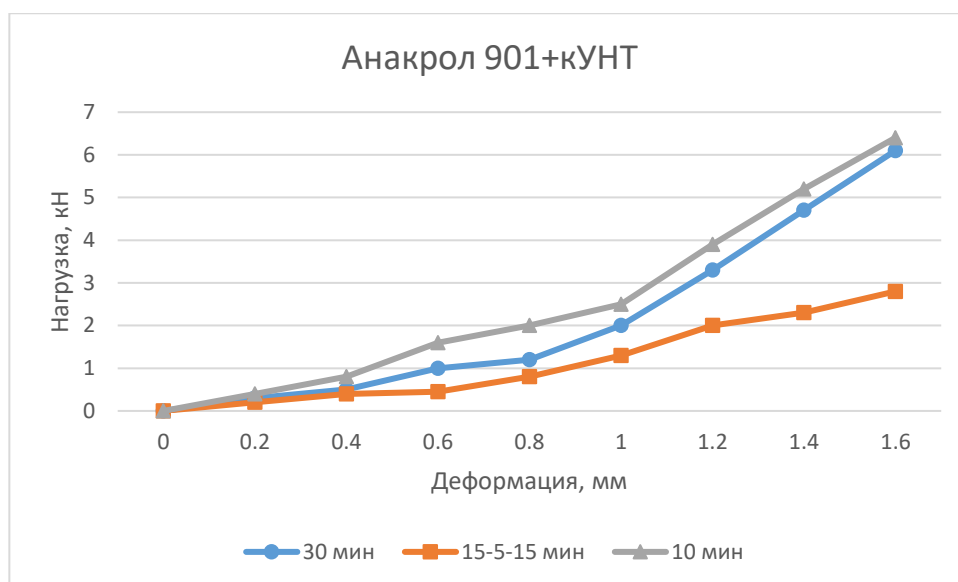


Рисунок 1 – Результаты испытаний образцов модифицированной древесины на сжатие вдоль волокон для различных технологических режимов для Анакром 901+кУНТ

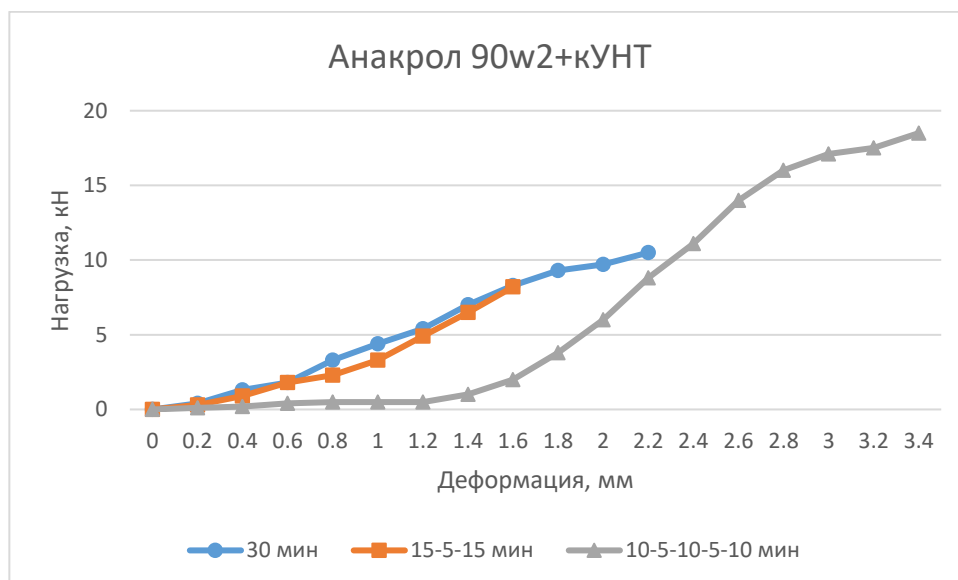


Рисунок 2 – Результаты испытаний образцов модифицированной древесины на сжатие вдоль волокон для различных технологических режимов для Анакром 90w2+кУНТ

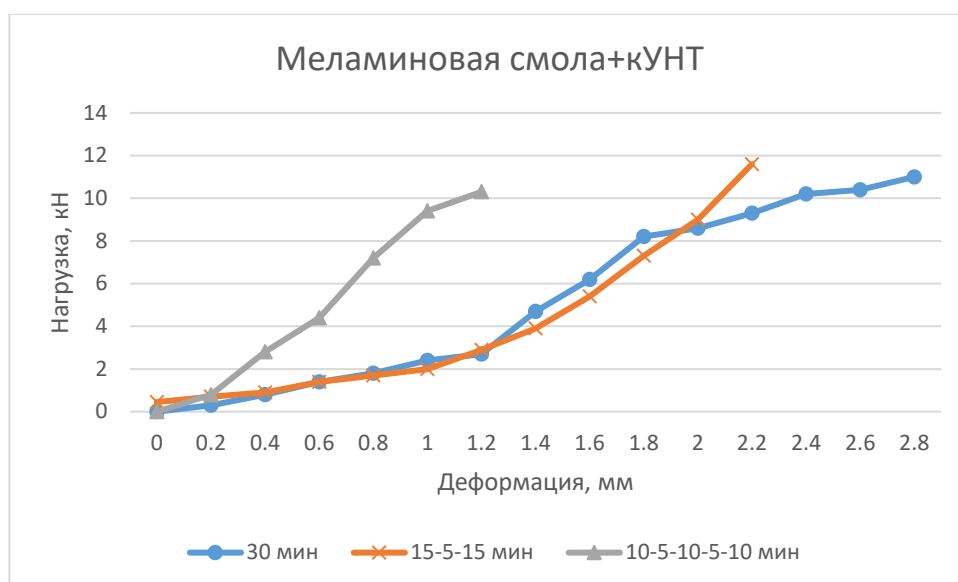


Рисунок 3 – Результаты испытаний образцов модифицированной древесины на сжатие вдоль волокон для различных технологических режимов для меламиновая смола+кУНТ

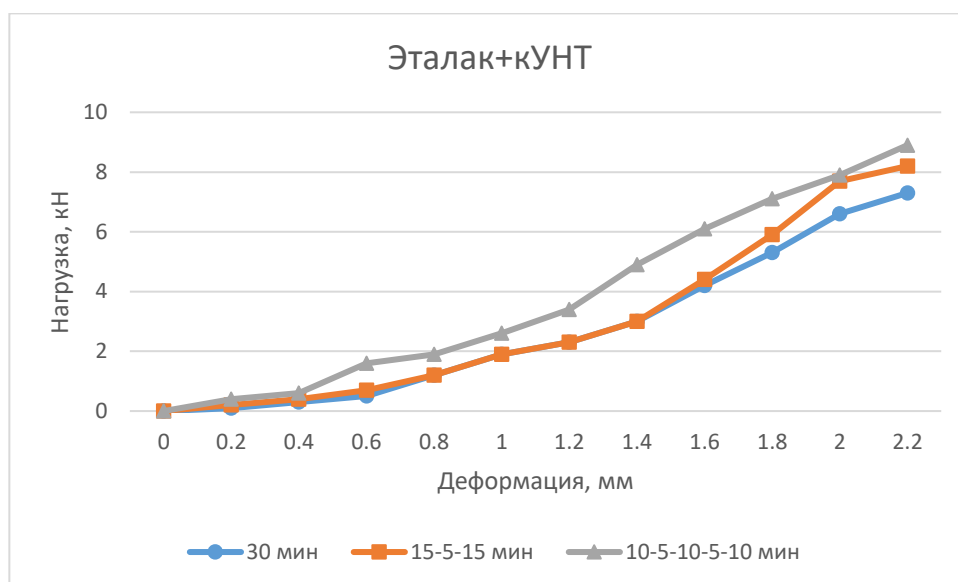


Рисунок 4 – Результаты испытаний образцов модифицированной древесины на сжатие вдоль волокон для различных технологических режимов для Эталак+кУНТ

Было проведено пять серий испытаний модифицированных деревянных образцов на сжатие (по 5 шт. в каждой серии). Установлено, что значение прочности при сжатии вдоль волокон образцов, модифицированных полимерной композицией на основе Анакрол 90w2+кУНТ больше на 25-30 %, чем у образцов без модификации.

Выводы

В результате проведенного экспериментального исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. Подобран компонентный состав полимерной композиции – 100 вес.ч. Анакрол 90W2 и 0,5 вес.ч. кУНТ.
2. На образцах определена возможность повышения прочности и снижения деформативности деревянной конструкции, модифицированной полимерной композицией на основе смолы с добавлением кУНТ. В качестве модификации выбрана технология импрегнирования низковязкой полимерной композиции в тело древесины с использованием импульсного воздействия избыточного давления по режиму 10-5-10-5-10 мин.

3. Определены разрушающие нагрузки образцов модифицированной древесины, при непрерывном статическом нагружении. Значение прочности при сжатии вдоль волокон образцов, модифицированных полимерной композицией на основе Анакрол 90w2+кУНТ больше на 25-30 %, чем у образцов без модификации.

Полученные результаты прочности и деформативности модифицированных деревянных образцов на сжатие вдоль волокон следует дополнить экспериментальными исследованиями по определению прочности аналогичных образцов на растяжение вдоль волокон, скалывание вдоль волокон и статический изгиб. После проведения серии опытов на образцах можно будет перейти к натурным испытаниям деревянных модифицированных конструкций.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01579, <https://rscf.ru/project/22-29-01579/>. Исходные данные для исследования в виде технологии модификации древесины разработаны в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых — кандидатов наук (МК-2972.2021.4). Исследования проводились с использованием оборудования межрегионального многопрофильного и междисциплинарного центра коллективного пользования перспективных и конкурентоспособных технологий по направлениям развития и применения в промышленности/машиностроении отечественных достижений в области нанотехнологий (соглашение №075-15-2021-692 от 5 августа 2021 года).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bukauskas Aurimas, Mayencourt Paul, Shepherd Paul, Sharma Bhavna, Mueller Caitlin, Walker Pete, Bregulla, Julie. Whole Timber Construction: A State of the Art Review. Construction and Building Materials. 2019. No. 213. Pp. 748-769. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.043.
2. Chaoji, Chen and Kuang, Yudi and Zhu, Shuze and Burgert, Ingo and Keplinger, Tobias and Gong, Amy and Li, Teng and Berglund, Lars and Eichhorn, Stephen and Hu, Liangbing. Structure–property–function relationships of natural and engineered wood. Nature Reviews Materials. 2020. No. 5. Pp. 1-25. doi:10.1038/s41578-020-0195-z.
3. Donaldson, Lloyd. Wood cell wall ultrastructure The key to understanding wood properties and behaviour. IAWA Journal. 2019. No. 40. Pp. 645-672. doi:10.1163/22941932-40190258.
4. Walsh-Korb, Zarah and Avérous, Luc. Recent developments in the conservation of materials properties of historical wood. Progress in Materials Science. 2018. No. 102. doi:10.1016/j.pmatsci.2018.12.001.
5. Roshchina S., Lukin M., Lisyatnikov M. Compressed-Bent Reinforced Wooden Elements with Long-Term Load. Proceedings of EECE 2019 : Energy, Environmental and Construction Engineering. St. Petersburg, Russia. 2019. Pp. 81-91. doi:10.1007/978-3-030-42351-3_7.
6. Лукина А.В. Совершенствование технологии восстановления деструктированной древесины в элементах деревянных конструкций: специальность 05.21.05 "Древесиноведение, технология и оборудование деревопереработки": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лукина Анастасия Васильевна. Архангельск, 2014. 22 с.
7. Tanasa, Fulga and Teacă, Carmen-Alice and Zănoagă, Mădălina. Protective coatings for wood. 2021. doi:10.1016/b978-0-444-63237-1.00006-1.
8. Lisyatnikov M.S., Roshchina S.I., Chukhlanov V.Y., Ivaniuk A.M. Repair compositions based on methyl methacrylate modified with polyphenylsiloxane resin for concrete and reinforced concrete structures. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vladimir, 2020. 012113 p. doi:10.1088/1757-899X/896/1/012113.
9. Lukin M., Prusov E., Roshchina S. [et al.]. Multi-Span composite timber beams with rational steel reinforcements. Buildings. 2021. Vol. 11. No. 2. Pp. 1-12. doi:10.3390/buildings11020046.
10. Friedrich, Daniel. Thermoplastic moulding of Wood-Polymer Composites (WPC): A review on physical and mechanical behaviour under hot-pressing technique. Composite Structures. 2021. No. 262. P. 113649. doi:10.1016/j.compstruct.2021.113649.
11. Lee, Seng Hua and Ashaari, Zaidon and Lum, Wei and Ang, Aik and Juliana, A.H. and PENG, TAN and Chin, Kit Ling and M. Tahir, Paridah. Thermal treatment of wood using vegetable oils: A review. Construction and Building Materials. 2018. No. 181. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.06.058.
12. Roshchina S., Gribanov A., Lukin M. [et al.]. Investigation of the Stress–Strain State of Wooden Beams with Rational Reinforcement with Composite Materials. Lecture Notes in Civil Engineering. 2022. Vol. 182. Pp. 475-483. doi:10.1007/978-3-030-85236-8_42.
13. Wang, Xianju and Tu, Dengyun and Chen, Chuanfu and Zhou, Qiaofang and Huang, Huixian and Zheng, Zehao and Zhu, Zhipeng. A thermal modification technique combining bulk densification and heat treatment for poplar

- wood with low moisture content. *Construction and Building Materials*. 2021. No. 291. P. 123395. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123395.
14. Lukin M., Sergeev M., Lisyatnikov M. Compressed-Bent Reinforced Wooden Elements with Long-Term Load. *Proceedings of ECE 2020 : Energy, Environmental and Construction Engineering*. St. Petersburg, Russia, 2020. Pp. 115-123. doi:10.1007/978-3-030-72404-7_12.
15. Лукина А.В., Сергеев М.С. Исследование напряженно-деформированного состояния композитных деревянных балок // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения: материалы Международных академических чтений. Курск: Курский государственный университет, 2021. С. 183-190.
16. Broda, Magdalena and Mazela, Bart. Application of methyltrimethoxysilane to increase dimensional stability of waterlogged wood. *Journal of Cultural Heritage*. 2017. No. 25. Pp. 149-156. doi:10.1016/j.culher.2017.01.007.
17. Сергеев М.С., Лукина А.В., Грибанов А.С., Стрекалкин А.А. Развитие исследования деревокомпозитных балок с симметричным армированием // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. №7. С. 46-49.
18. Britch M. and Gorbachov N. and Koznacheev Ivan and Makarenko D. Elastic tensions in a wood material subjected to thermo-mechanical treatment by pressure drop. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2019. No. 16. P. 100457. doi:10.1016/j.tsep.2019.100457.
19. Патент № 2697564 С1 Российская Федерация, МПК C08L 63/02, C08K 5/17, C08K 5/10. Компонентный состав полимерной композиции для восстановления деструктивных участков элементов деревянных конструкций : № 2018124141 : заявл. 02.07.2018 : опубл. 15.08.2019 / С.И. Рощина, Е.А. Смирнов, М.В. Лукин [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых" (ВлГУ).
20. Патент № 2713115 С1 Российская Федерация, МПК B27K 3/08. Способ локальной модификации древесины в строительных конструкциях: № 2018139477 : заявл. 07.11.2018 : опубл. 03.02.2020 / С. И. Рощина, А.С. Грибанова, М.С. Лисятников [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых" (ВлГУ).
21. Lukina A., Roshchina S., Lisyatnikov M. [et al.]. Technology for the Restoration of Wooden Beams by Surface Repair and Local Modification. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 403. Pp. 1371-1379. doi:10.1007/978-3-030-96383-5_153.
22. Болтовский В.С., Остроух О.В., Кардаш Ю.Н. Термохимическое модифицирование древесины диановой смолой // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. 2018. Т. 54. №1. С. 103-108.
23. Lukina A., Roshchina S., Griбанov A. Method for Restoring Destructed Wooden Structures with Polymer Composites. *Proceedings of ECE 2020 : Energy, Environmental and Construction Engineering*. St. Petersburg, Russia. 2020. Pp. 476-474. doi:10.1007/978-3-030-72404-7_45.
24. Qiu H. and Han Y. and Fan D. and Li G. and Chu F. Progress in Chemical Modification of Fast-Growing Wood. *Cailiao Daobao/Materials Review*. 2018. No. 32. Pp. 2701-2708. doi:10.11896/j.issn.1005-023X.2018.15.023.
25. Griбанov A., Glebova T., Roschina S. Restoration of Destructive Wood in Supporting Zones of Wooden Beams. *Proceedings of ECE 2019: Energy, Environmental and Construction Engineering*. St. Petersburg, Russia, 2019. Pp. 157-166. doi:10.1007/978-3-030-42351-3_14.
26. Sandberg Dick and Kutnar Andreja and Mantanis George. Wood modification technologies - A review. *iForest - Biogeosciences and Forestry*. 2017. No. 10. Pp. 895-908. doi:10.895-908. 10.3832/for2380-010.
27. Griбанov A.S., Roshchina S.I., Naichuk A.Y., Melekhov V.I. Wooden beams with local wood modification. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vladimir, 2020. 012067 p. doi:10.1088/1757-899X/896/1/012067.
28. Miklečić Josip and Turkulin H. and Jirous-Rajkovic, Vlatka. Weathering performance of surface of thermally modified wood finished with nanoparticles-modified waterborne polyacrylate coatings. *Applied Surface Science*. 2017. No. 408. doi:10.1016/j.apsusc.2017.03.011.
29. Łukawski, Damian and Lekawa-Raus, Agnieszka and Lisiecki, Filip and Koziol, Krzysztof and Dudkowiak, Alina. Towards the development of superhydrophobic carbon nanomaterial coatings on wood. *Progress in Organic Coatings*. 2018. No. 125. Pp. 23-31. doi:10.1016/j.porgcoat.2018.08.025.
30. Papadopoulos Antonios and Bikiaris Dimitrios and Mitropoulos Athanasios and Kyzas George. Elastic tensions in a wood material subjected to thermo-mechanical treatment by pressure drop. *Nanomaterials*. 2019. No. 9. P.607. doi:10.3390/nano9040607.
31. Teng Teck Jin and Mat Arip, Mohamad Nasir and Sudesh, Kumar and Nemoikina, Anna and Jalaludin, Zaihan and Ng, Eng-Poh and Lee, Hooi-Ling. Conventional Technology and Nanotechnology in Wood Preservation: A Review. *Bioresources*. 2018. No. 13. Pp. 9220-9252. doi:10.15376/biores.13.4.Teng.
32. Muhammad, Adamu and Rahman, Md and Hamdan, Sinin and Bakri, Muhammad Khusairy and Md Yusof, Fahmi Asyadi. Impact of Polyvinyl Alcohol/Acrylonitrile on Bamboo Nanocomposite and Optimization of Mechanical Performance by Response Surface Methodology. *Construction and Building Materials*. 2020. No. 258. P. 119693. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119693.
33. Chen, Fengjuan and Gong, Amy and Zhu, Mingwei and Chen, Guang and Lacey, Steven and Jiang, Feng and Li, Yongfeng and Wang, Yanbin and Dai, Jiaqi and Yao, Yonggang and Song, Jianwei and Liu, Boyang and Fu,

Kun and Das, Siddhartha and Hu, Liangbing. Mesoporous. Three-Dimensional Wood Membrane Decorated with Nanoparticles for Highly Efficient Water Treatment. *ACS nano*. 2017. No. 11. doi:10.1021/acsnano.7b01350.

34. Gao, Chang and Huang, Liang and Yan, Libo and Jin, Ruoyu and Chen, Haoze. Mechanical properties of recycled aggregate concrete modified by nano-particles. *Construction and Building Materials*. 2020. No. 241. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118030.

35. Esmailpour, Ayoub and Majidi, Roya and Taghiyari, Hamid Reza and Ganjkhani, Mehdi and Mohseni, Seyed Majid and Papadopoulos, Antonios. Improving Fire Retardancy of Beech Wood by Graphene. *Polymer*. 2020. No. 12. P. 303. doi:10.3390/polym12020303.

36. Kolya, Haradhan and Kang, Chunwon. Polyvinyl acetate/reduced graphene oxide-poly (diallyl dimethylammonium chloride) composite coated wood surface reveals improved hydrophobicity. *Progress in Organic Coatings*. 2021. No. 156. P. 106253. doi:10.1016/j.porgcoat.2021.106253.

37. Papageorgiou, Dimitrios and Kinloch, Ian and Young, Robert. Mechanical Properties of Graphene and Graphene-based Nanocomposites. *Progress in Materials Science*. 2017. No. 90. doi:10.1016/j.pmatsci.2017.07.004.

38. Iqbal, Akm and Sakib, Nazmus and Iqbal, A.K.M. and Nuruzzaman, Dewan. Graphene-based nanocomposites and their fabrication, mechanical properties and applications. *Materialia*. 2020. No. 12. P. 100815. doi:10.1016/j.mtla.2020.100815.

REFERENCES

1. Bukauskas, Aurimas and Mayencourt, Paul and Shepherd, Paul and Sharma, Bhavna and Mueller, Caitlin and Walker, Pete and Bregulla, Julie. Whole Timber Construction: A State of the Art Review. *Construction and Building Materials*. 2019. No. 213. Pp. 748-769. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.043.

2. Chaoji, Chen and Kuang, Yudi and Zhu, Shuze and Burgert, Ingo and Keplinger, Tobias and Gong, Amy and Li, Teng and Berglund, Lars and Eichhorn, Stephen and Hu, Liangbing. Structure–property–function relationships of natural and engineered wood. *Nature Reviews Materials*. 2020. No. 5. Pp. 1-25. doi:10.1038/s41578-020-0195-z.

3. Donaldson, Lloyd. Wood cell wall ultrastructure The key to understanding wood properties and behaviour. *IAWA Journal*. 2019. No. 40. Pp. 645-672. doi:10.1163/22941932-40190258.

4. Walsh-Korb, Zarah and Avérous, Luc. Recent developments in the conservation of materials properties of historical wood. *Progress in Materials Science*. 2018. No. 102. doi:10.1016/j.pmatsci.2018.12.001.

5. Roshchina S., Lukin M., Lisiatnikov M.. Compressed-Bent Reinforced Wooden Elements with Long-Term Load. *Proceedings of EECE 2019 : Energy, Environmental and Construction Engineering*. St. Petersburg, Russia, 2019. Pp. 81-91. doi:10.1007/978-3-030-42351-3_7.

6. Lukina A.V. Sovershenstvovanie tehnologii vosstanovleniya destruktirovannoj drevesiny v jelementah derevjannyh konstrukcij [Improving the technology of restoration of destructed wood in the elements of wooden structures] : specialty 05.21.05 "Wood science, technology and equipment of wood processing" : abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Lukina Anastasia Vasilievna. Arkhangelsk, 2014. 22 p. (rus).

7. Tanasa, Fulga and Teacă, Carmen-Alice and Zănoagă, Mădălina. Protective coatings for wood. 2021. doi:10.1016/b978-0-444-63237-1.00006-1.

8. Lisiatnikov M.S., Roshchina S.I., Chukhlanov V.Y., Ivaniuk A.M. Repair compositions based on methyl methacrylate modified with polyphenylsiloxane resin for concrete and reinforced concrete structures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vladimir, 2020. 012113 p. doi:10.1088/1757-899X/896/1/012113.

9. Lukin M., Prusov E., Roshchina S. [et al.]. Multi-Span composite timber beams with rational steel reinforcements. *Buildings*. 2021. Vol. 11. No. 2. Pp. 1-12. doi:10.3390/buildings11020046.

10. Friedrich, Daniel. Thermoplastic moulding of Wood-Polymer Composites (WPC): A review on physical and mechanical behaviour under hot-pressing technique. *Composite Structures*. 2021. No. 262. P. 113649. doi:10.1016/j.compstruct.2021.113649.

11. Lee, Seng Hua and Ashaari, Zaidon and Lum, Wei and Ang, Aik and Juliana, A.H. and PENG, TAN and Chin, Kit Ling and M. Tahir, Paridah. Thermal treatment of wood using vegetable oils: A review. *Construction and Building Materials*. 2018. No. 181. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.06.058.

12. Roshchina S., Gribanov A., Lukin M. [et al.]. Investigation of the Stress–Strain State of Wooden Beams with Rational Reinforcement with Composite Materials. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2022. Vol. 182. Pp. 475-483. doi:10.1007/978-3-030-85236-8_42.

13. Wang, Xianju and Tu, Dengyun and Chen, Chuanfu and Zhou, Qiaofang and Huang, Huixian and Zheng, Zehao and Zhu, Zhipeng. A thermal modification technique combining bulk densification and heat treatment for poplar wood with low moisture content. *Construction and Building Materials*. 2021. No. 291. P. 123395. doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123395.

14. Lukin M., Sergeev M., Lisiatnikov M.. Compressed-Bent Reinforced Wooden Elements with Long-Term Load. *Proceedings of EECE 2020 : Energy, Environmental and Construction Engineering*. St. Petersburg, Russia, 2020. Pp. 115-123. doi:10.1007/978-3-030-72404-7_12.

15. Lukina A.V., Sergeev M.S.. Issledovanie naprjazhenno-deformirovannogo sostojaniya kompozitnyh derevjannyh balok [Study of the stress-strain state of composite wooden beams] Bezopasnost' stroitel'nogo fonda Rossii. Problemy i reshenija : materialy Mezhdunarodnyh akademicheskikh chtenij [Security of the building stock in

- Russia. Problems and Solutions: Proceedings of the International Academic Readings]. Kursk: Kursk State University, 2021. Pp. 183-190.
16. Broda, Magdalena and Mazela, Bart. Application of methyltrimethoxysilane to increase dimensional stability of waterlogged wood. *Journal of Cultural Heritage*. 2017. No. 25. Pp. 149-156. doi:10.1016/j.culher.2017.01.007.
17. Sergeev M.S., Lukina A.V., Gribanov A.S., Strekalkin A.A.. Razvitie issledovaniya derevokompozitnykh balok s simmetrichnym armirovaniem [Development of the study of wood-composite beams with symmetrical reinforcement]. *Bulletin of the Belgorod State Technological University*. V.G. Shukhov. 2018. No. 7. Pp. 46-49. (rus).
18. Britch M. and Gorbachov, N. and Koznacheev, Ivan and Makarenko, D. Elastic tensions in a wood material subjected to thermo-mechanical treatment by pressure drop. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2019. No. 16. P. 100457. doi:10.1016/j.tsep.2019.100457.
19. Patent No. 2697564 C1 Russian Federation, IPC C08L 63/02, C08K 5/17, C08K 5/10. Komponentnyy sostav polimernoy kompozicii dlja vosstanovleniya destruktivnykh uchastkov jelementov derevjannykh konstrukcij [Component composition of the polymer composition for the restoration of destructive areas of elements of wooden structures] : No. 2018124141 : Appl. 07/02/2018 : publ. 08.15.2019 / S. I. Roshchina, E. A. Smirnov, M. V. Lukin [and others]; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletov" (VISU). (rus).
20. Patent No. 2713115 C1 Russian Federation, IPC B27K 3/08. Sposob lokal'noj modifikacii drevesiny v stroitel'nykh konstrukcijah [The method of local modification of wood in building structures] : No. 2018139477 : Appl. 11/07/2018 : publ. 02/03/2020 / S. I. Roshchina, A. S. Gribanova, M. S. Lisiatnikov [and others]; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletov" (VISU). (rus).
21. Lukina A., Roshchina S., Lisiatnikov M. [et al.]. Technology for the Restoration of Wooden Beams by Surface Repair and Local Modification. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 403. Pp. 1371-1379. doi:10.1007/978-3-030-96383-5_153.
22. Boltovsky V.S., Ostroukh O.V., Kardash Yu.N. Termohimicheskoe modifizirovanie drevesiny dianovoj smoloy [Thermochemical modification of wood with dianova resin]. *The weight. National acad. Sciences of Belarus. Ser. chem. navuk*. 2018. Vol. 54, No. 1. Pp. 103-108 (rus).
23. Lukina A., Roshchina S., Gribanov A. Method for Restoring Destructed Wooden Structures with Polymer Composites. *Proceedings of EECE 2020 : Energy, Environmental and Construction Engineering*. St. Petersburg, Russia, 2020. Pp. 476-474. doi:10.1007/978-3-030-72404-7_45.
24. Qiu H. and Han, Y. and Fan, D. and Li, G. and Chu, F. Progress in Chemical Modification of Fast-Growing Wood. *Cailiao Daobao/Materials Review*. 2018. No. 32. Pp. 2701-2708. doi:10.11896/j.issn.1005-023X.2018.15.023.
25. Gribanov A., Glebova T., Roschina S. Restoration of Destructive Wood in Supporting Zones of Wooden Beams. *Proceedings of EECE 2019 : Energy, Environmental and Construction Engineering*. St. Petersburg, Russia, 2019. Pp. 157-166. doi:10.1007/978-3-030-42351-3_14.
26. Sandberg, Dick and Kutnar, Andreja and Mantanis, George. Wood modification technologies - A review. *iForest - Biogeosciences and Forestry*. 2017. No. 10. Pp. 895-908. doi:10.1007/s10332-017-2380-010.
27. Gribanov A.S., Roshchina S.I., Naichuk A.Y., Melekhov V.I. Wooden beams with local wood modification. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vladimir, 2020. 012067 p. doi:10.1088/1757-899X/896/1/012067.
28. Miklečić, Josip and Turkulin, H. and Jirous-Rajkovic, Vlatka. Weathering performance of surface of thermally modified wood finished with nanoparticles-modified waterborne polyacrylate coatings. *Applied Surface Science*. 2017. No. 408. doi:10.1016/j.apsusc.2017.03.011.
29. Łukawski, Damian and Lekawa-Raus, Agnieszka and Lisiecki, Filip and Koziol, Krzysztof and Dudkowiak, Alina. Towards the development of superhydrophobic carbon nanomaterial coatings on wood. *Progress in Organic Coatings*. 2018. No. 125. Pp. 23-31. doi:10.1016/j.porgcoat.2018.08.025.
30. Papadopoulos, Antonios and Bikiaris, Dimitrios and Mitropoulos, Athanasios and Kyzas, George. Elastic tensions in a wood material subjected to thermo-mechanical treatment by pressure drop. *Nanomaterials*. 2019. No. 9. P. 607. doi:10.3390/nano9040607.
31. Teng, Teck Jin and Mat Arip, Mohamad Nasir and Sudesh, Kumar and Nemoikina, Anna and Jalaludin, Zaihan and Ng, Eng-Poh and Lee, Hooi-Ling. Conventional Technology and Nanotechnology in Wood Preservation: A Review. *Bioresources*. 2018. No. 13. Pp. 9220-9252. doi:10.15376/biores.13.4.Teng.
32. Muhammad, Adamu and Rahman, Md and Hamdan, Sinin and Bakri, Muhammad Khusairy and Md Yusof, Fahmi Asyadi. Impact of Polyvinyl Alcohol/Acrylonitrile on Bamboo Nanocomposite and Optimization of Mechanical Performance by Response Surface Methodology. *Construction and Building Materials*. 2020. No. 258. P. 119693. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119693.
33. Chen, Fengjuan and Gong, Amy and Zhu, Mingwei and Chen, Guang and Lacey, Steven and Jiang, Feng and Li, Yongfeng and Wang, Yanbin and Dai, Jiaqi and Yao, Yonggang and Song, Jianwei and Liu, Boyang and Fu, Kun and Das, Siddhartha and Hu, Liangbing. Mesoporous. Three-Dimensional Wood Membrane Decorated with Nanoparticles for Highly Efficient Water Treatment. *ACS nano*. 2017. No. 11. doi:10.1021/acsnano.7b01350.

34. Gao, Chang and Huang, Liang and Yan, Libo and Jin, Ruoyu and Chen, Haoze. Mechanical properties of recycled aggregate concrete modified by nano-particles. Construction and Building Materials. 2020. No. 241. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118030.
35. Esmailpour, Ayoub and Majidi, Roya and Taghiyari, Hamid Reza and Ganjkhani, Mehdi and Mohseni, Seyed Majid and Papadopoulos, Antonios. Improving Fire Retardancy of Beech Wood by Graphene. Polymer. 2020. No. 12. P. 303. doi:10.3390/polym12020303.
36. Kolya, Haradhan and Kang, Chunwon. Polyvinyl acetate/reduced graphene oxide-poly (diallyl dimethylammonium chloride) composite coated wood surface reveals improved hydrophobicity. Progress in Organic Coatings. 2021. No. 156. P. 106253. doi:10.1016/j.porgcoat.2021.106253.
37. Papageorgiou, Dimitrios and Kinloch, Ian and Young, Robert. Mechanical Properties of Graphene and Graphene-based Nanocomposites. Progress in Materials Science. 2017. No. 90. doi:10.1016/j.pmatsci.2017.07.004.
38. Iqbal, Akm and Sakib, Nazmus and Iqbal, A.K.M. and Nuruzzaman, Dewan. Graphene-based nanocomposites and their fabrication, mechanical properties and applications. Materialia. 2020. No. 12. P. 100815. doi:10.1016/j.mtla.2020.100815.

Информация об авторах:

Лисятников Михаил Сергеевич

ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир, Россия
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций.
E-mail: mlisyatnikov@mail.ru

Лукин Михаил Владимирович

ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир, Россия
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций.
E-mail: mikail_lukin_22@mail.ru

Чибрикин Данила Александрович

ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир, Россия
ассистент кафедры строительных конструкций.
E-mail: mikail_lukin_22@mail.ru

Рощина Светлана Ивановна

ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», г. Владимир, Россия
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций.
E-mail: rsi3@mail.ru

Information about authors:

Lisyatnikov Mikhail S.

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia,
candidate of technical science, docent, associated professor of the department of building construction.
E-mail: mlisyatnikov@mail.ru

Lukin Mikhail V.

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia,
candidate of technical science, docent, associated professor of the department of building construction.
E-mail: mikail_lukin_22@mail.ru

Chibrikin Danila A.

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia,
assistant of the department of building construction.
E-mail: dachibrikin@outlook.com

Roshchina Svetlana I.

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia,
doctor of technical sciences, professor, head of the department of building structures.
E-mail: rsi3@mail.ru