

Научная статья

УДК 691.11

DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-167-178

Численное исследование напряженно-деформированного состояния модифицированной деревянной балки

Д.А. Чибрикин¹✉, аспирант; ResearcherID: [ACW-3805-2022](https://orcid.org/0000-0001-9278-4559),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9278-4559>

М.В. Лукин¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [E-8085-2019](https://orcid.org/0000-0002-2033-3473),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2033-3473>

А.В. Лукина¹, канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [O-1352-2016](https://orcid.org/0000-0001-6065-678X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6065-678X>

Т.В. Тюрикова², канд. техн. наук, доц.; ResearcherID: [P-8991-2019](https://orcid.org/0000-0002-3592-310X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3592-310X>

С.И. Рощина¹, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [A-7722-2019](https://orcid.org/0000-0003-0356-1383),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0356-1383>

¹Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, ул. Горького, д. 87, г. Владимир, Россия, 600000; dachibrikin@outlook.com✉, lukin_mihail_22@mail.ru, pismo.33@yandex.ru, rsi3@mail.ru

²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; t.turikova@narfu.ru

Поступила в редакцию 10.05.21 / Одобрена после рецензирования 16.08.21 / Принята к печати 20.08.21

Аннотация. Сохранение памятников деревянного зодчества требует особого внимания, так как в процессе эксплуатации на протяжении 100 лет и более деревянные конструкции подвергаются атмосферным воздействиям, в результате чего ухудшается несущая способность этих конструкций. Для зданий, представляющих историческую ценность, применение внешних систем усиления конструкции влечет потерю архитектурного облика. Предлагаемый способ восстановления несущей способности деструктурированных деревянных балок в опорных зонах основан на их модификации полимерной композицией. Рассмотрены 3 типа балок из сосны: деструктурированная, модифицированная в опорных зонах; деревянная, ослабленная деструкцией; «здоровая». Выполнен численный расчет балок длиной 6 м и сечением 100×200 мм в программном комплексе «Лира». Расчетная модель рассматриваемых балок построена путем адаптации исходных данных для рабочей среды используемого программного комплекса. Вычислительная модель задана как объемное тело, полученное путем триангуляции и «выдавливания» проекционного разреза балки. По разработанной методике расчета деревянных балок определены касательные напряжения в приопорной зоне, а также вертикальные перемещения балок. Проведено сравнение показателей модифицированной балки и эталонной «здоровой» конструкции. Касательные напряжения в усиленной балке превышают на 15–17 % показатели «здоровой» балки. Установлено, что прочность деструктурированной балки, модифицированной на опорах, увеличилась на 16–18 % по сравнению с деструктурированной балкой. На основании полученных результатов определены граничные условия применения модификации деструктурированных деревянных балок в опорных зонах для восстановления их не-

сущей способности. Если потеря несущей способности составляет более 35 %, то данный способ не рекомендуется применять ввиду целесообразности замены таких конструкций.

Ключевые слова: численные исследования, полимерная композиция, модификация деревянной балки, прочность древесины, деревянная балка, деструкция древесины, нагружение деревянной балки, сохранение деревянной архитектуры

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 нелинейной численной модели деревянной балки разработаны в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-2972.2021.4).

Для цитирования: Чибрикин Д.А., Лукин М.В., Лукина А.В., Тюрикова Т.В., Рощина С.И. Численное исследование напряженно-деформированного состояния модифицированной деревянной балки // Изв. вузов. Лесн. журн. 2022. № 3. С. 167–178. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-167-178>

Original article

Numerical Study of the Stress-Strain State of a Modified Wooden Beam

Danila A. Chibrikov¹✉, Postgraduate Student; ResearcherID: [ACW-3805-2022](https://orcid.org/0000-0001-9278-4559),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9278-4559>

Mikhail V. Lukin¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [E-8085-2019](https://orcid.org/0000-0002-2033-3473),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2033-3473>

Anastasiya V. Lukina¹, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [O-1352-2016](https://orcid.org/0000-0001-6065-678X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6065-678X>

Tatiana V. Tyurikova², Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;

ResearcherID: [P-8991-2019](https://orcid.org/0000-0002-3592-310X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3592-310X>

Svetlana I. Roshchina¹, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [A-7722-2019](https://orcid.org/0000-0003-0356-1383),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0356-1383>

¹Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, ul. Gor'kogo, 87, Vladimir, 600000, Russian Federation; dachibrikov@outlook.com✉, lukin_mihail_22@mail.ru, pismo.33@yandex.ru, rsi3@mail.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; t.turikova@narfu.ru

Received on May 10, 2021 / Approved after reviewing on August 16, 2021 / Accepted on August 20, 2021

Abstract. Preservation of wooden architecture monuments requires special attention since during their operation for 100 years and more wooden structures are exposed to environmental influences resulting in weakening their bearing capacity. The use of external reinforcement systems for buildings of historical value leads to a loss of architectural look. The proposed method of restoring the bearing capacity of the destructed wooden beams in the support zones is based on modification with a polymer composition. We have considered 3 types of pine beams: destructed, modified in the support zones; wooden, weakened by destruction; “healthy”. Numerical calculation of beams with a length of 6 m and a cross-section of 100×200 mm is performed in the Lira software package. The calculation model of the beams considered was created by adapting the initial data for the working environment of the



software package used. The computational model is set as a three-dimensional body obtained by triangulation and “extrusion” of beam projection section. Shear stresses in the supporting zone, as well as vertical movements of the beams have been determined according to the developed method of calculation of wooden beams. The parameters of the modified beam and the reference “healthy” structure were compared. Shear stresses in the strengthened beam are 15–17 % higher than in the “healthy” beam. It was found that the strength of the destructed beam modified on supports increased by 16–18 % compared to the destructed beam. The boundary conditions for the modification of destructed wooden beams in the support zones to restore their bearing capacity have been determined on the basis of the obtained results. If the loss of bearing capacity is more than 35 %, then this method is not recommended due to the expediency of replacing such structures.

Keywords: numerical studies, polymer composition, modification of wooden beam, wood strength, wooden beam, wood destruction, loading of wooden beam, preservation of wooden architecture

Acknowledgments: The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-29-01579, <https://rscf.ru/project/22-29-01579/>. Initial data for the study as a nonlinear numerical model of a wooden beam were developed within the framework of the grant of the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists – candidates of sciences (МК-2972.2021.4).

For citation: Chibrikov D.A., Lukin M.V., Lukina A.V., Tyurikova T.V., Roshchina S.I. Numerical Study of the Stress-Strain State of a Modified Wooden Beam. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2022, no. 3, pp. 167–178. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2022-3-167-178>

Введение

В настоящее время в России остро стоит вопрос сохранения памятников деревянного зодчества – зданий, в несущих конструкциях которых использована древесина. В процессе эксплуатации такие конструкции подвергаются негативному воздействию различных сил (например, погодный, антропогенный факторы и др.), в результате чего происходит потеря конструкцией несущей способности. Для зданий, представляющих историческую ценность, применение внешних систем усиления становится причиной потери архитектурного облика. Атмосферное и иное увлажнение особенно сильно влияет на деревянные конструкции: влага снижает прочность, жесткость и долговечность древесины.

В работах [1, 13–15] рассмотрены режимы разрушений деревянных конструкций. Используют различные способы их восстановления и усиления [8, 20, 21, 23, 24, 27]. Известны комплексные исследования по практическому применению полимерных композиций при восстановлении деревянных конструкций [4, 6, 25, 37]. Разработаны технологические инновации в области наноструктурированных материалов для усиления и защиты деревянных конструкций [10, 26, 30, 35]. Проведены эксперименты по модификации поверхности древесины гидрофобным составом [19]. В Швейцарии изучаются балки из древесно-стеклянного композита [22]. Также рассматриваются нанокompозиты на основе бамбука [7]. Выполняются исследования в области химической модификации

древесины в целях повышения ее прочностных характеристик [29]. Существует экспериментальная программа испытаний усиления при изгибе клееного бруса, когда в него вклеиваются полимерные стержни, армированные стекловолокном [31]. Авторами работ [32, 33] изучены многопролетные композитные балки и установлено, что по сравнению с деревянными балками прочность композитных балок с рациональным усилением растянутых зон увеличивается на 24–27 %, а деформированность снижается на 8–13 %. Проанализированы численные исследования прочностных и деформационных характеристик узлового соединения деревянных конструкций, осуществленные в программном комплексе ANSYS [2].

Цель исследования – определить касательные напряжения в приопорных зонах модифицированной деревянной балки, ослабленной деструкцией, и сравнить полученные результаты с эталонной здоровой конструкцией.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – деструктированная деревянная балка, модифицированная полимерной композицией в опорных зонах.

Предмет – прочность древесины, усиленной полимерным композитом, на скалывающие касательные напряжения, возникающие в опорных частях балок.

Предлагаемый способ усиления деструктированной древесины заключается в импрегнировании в дефектную часть элементов деревянных конструкций полимерной композиции и создании древесно-полимерной композиции в деструктированной зоне (рис. 1). Такой подход к восстановлению является наиболее эффективным и перспективным. При этом необходимо провести дополнительные исследования технологии восстановления деревянных конструкций [5].

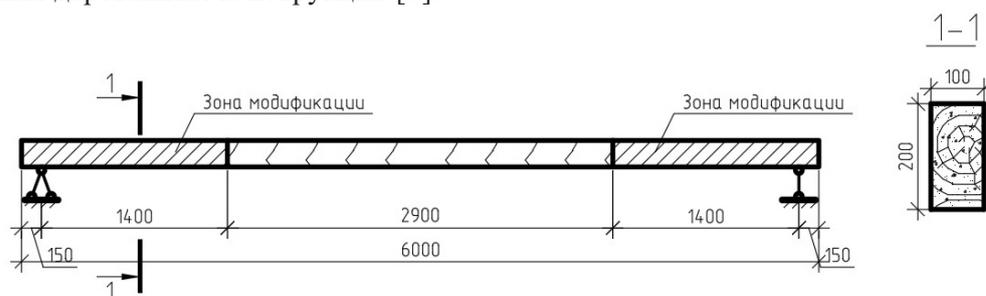


Рис. 1. Восстановление деструктированной балки

Fig. 1. Restoration of a destroyed beam

Численные исследования позволяют оценить характер распределения напряжения в теле балки, а также разрушающую нагрузку с учетом всех особенностей напряженно-деформированного состояния изучаемой конструкции.

Для расчетов был использован метод конечных элементов. Сетка конечных элементов принята размером 10 мм. Конечные элементы для древесины объемные. Диаграммы работы древесины под нагрузкой, вводимые в расчет,

приняты по результатам испытания стандартных образцов на растяжение, сжатие и скалывание. Созданы математические модели балок с разной плотностью и нелинейностью материала при их виртуальном нагружении с использованием программного комплекса «Лира» [3, 12, 16–18, 28].

При нагружении деревянных элементов внешней нагрузкой до разрушения отчетливо проявляются 3 последовательные стадии напряженно-деформированного состояния: условно упругая, упругопластическая, разрушение [9, 11, 34, 36]. Расчетная модель рассматриваемой балки построена путем адаптации исходных данных для рабочей среды программного комплекса «Лира». Вычислительная модель задана как объемное тело, полученное путем триангуляции и «выдавливания» проекционного разреза балки.

Проведены расчеты балок длиной 6 м и поперечным сечением 100×200 мм. По результатам расчетов для дальнейшего анализа и оценки эффективности модифицирования выведены изополя перемещений и напряжений, составлена сравнительная таблица, характеризующая работу балок.

Маркировка балок: Б-1 – «здоровая», Б-2 – деформированная, Б-3 – модифицированная на опорах деформированная. Для всех видов балок были заданы одинаковые условия закрепления и действующая нагрузка (рис. 2).

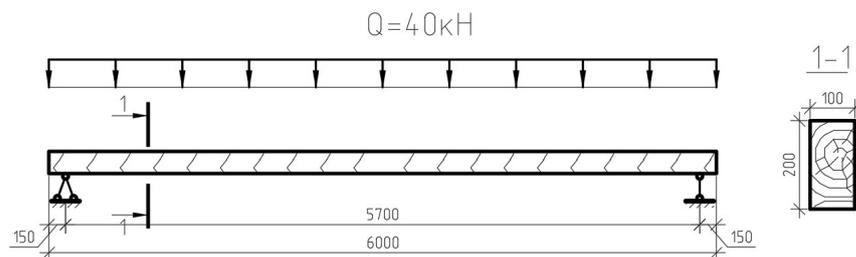


Рис. 2. Расчетная схема балок

Fig. 2. Design scheme of the beams

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе ранее проведенных исследований был определен состав полимерной композиции на основе Анакрола 90w2 с наполнителем КУНТ (карбоксилированные углеродные нанотрубки). Перечень элементов, входящих в состав, был получен на основе серии испытаний опытных образцов через установление физико-механических характеристик. Результаты вносили в уточненную расчетную математическую модель.

Для изучения напряженно-деформированного состояния балок была принята схема нагружения, которая имитирует рабочую нагрузку, равномерно распределенную по пролету. Нагрузки определялись по предельным напряжениям согласно приложению «В» СП 64.13330.2017 (Свод правил. Деревянные конструкции).

Результаты расчетов для модели балки Б-1 представлены на рис. 3, 4.

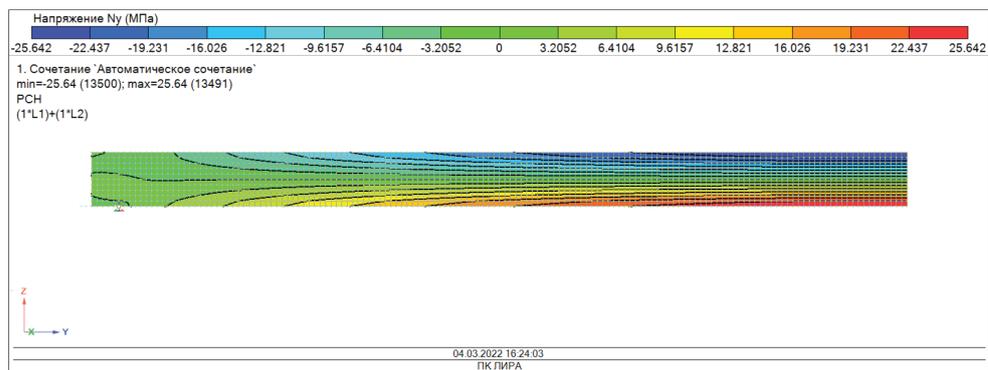
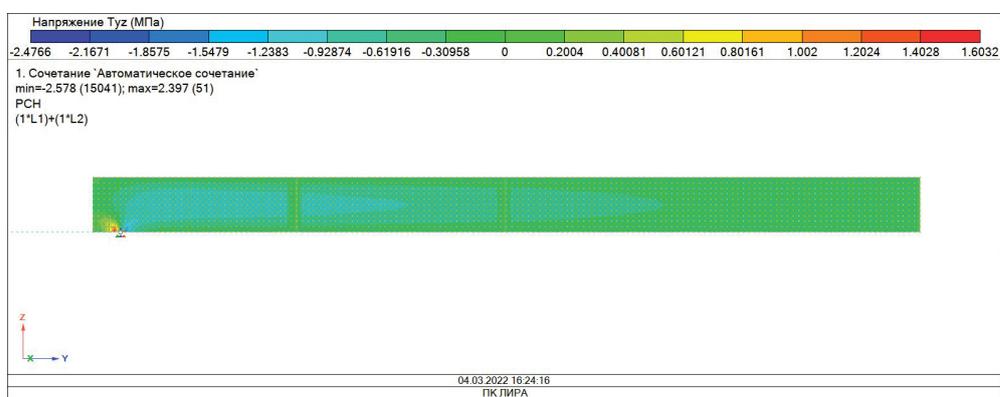
*a**b*

Рис. 3. Изополя напряжений (МПа) на половине пролета балки Б-1: *a* – продольные силы N_y ; *b* – касательные напряжения τ_{yz}

Fig. 3. Stress isofield (MPa) at the half of the beam span Б-1: *a* – longitudinal forces N_y ; *b* – share stresses τ_{yz}

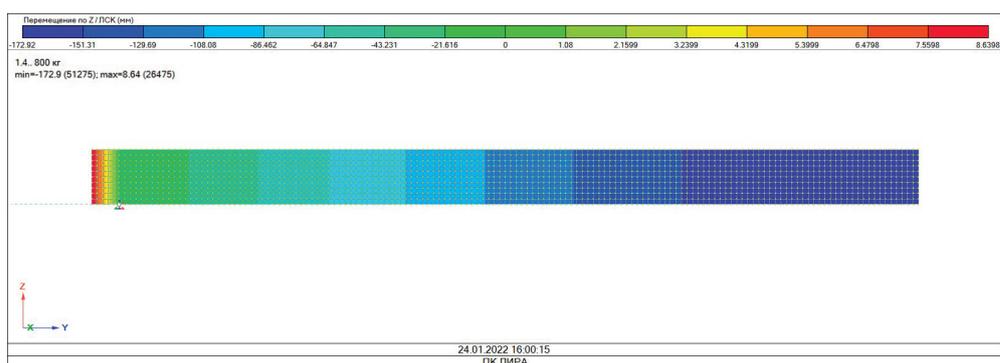
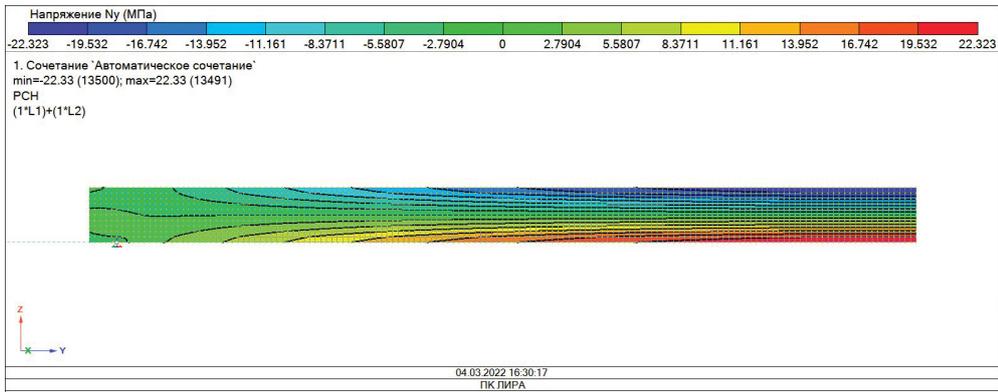


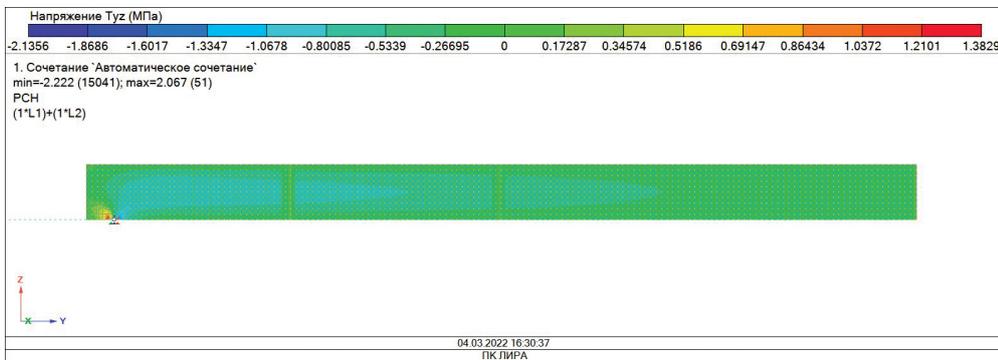
Рис. 4. Мозаика перемещений узлов вдоль оси Z на половине пролета балки Б-1

Fig. 4. Mosaic of node movements along the Z axis at the half of the beam span Б-1

Результаты расчетов для модели балки Б-2 приведены на рис. 5, 6.



a



б

Рис. 5. Изополя напряжений (МПа) на половине пролета балки Б-2: $a - N_y$; $б - \tau_{yz}$

Fig. 5. Stress isofield (MPa) at the half of the beam span Б-2: $a - N_y$; $б - \tau_{yz}$

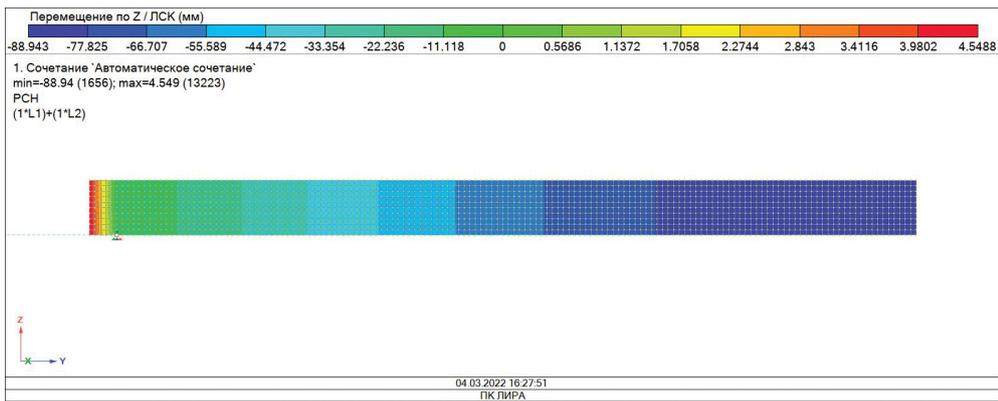
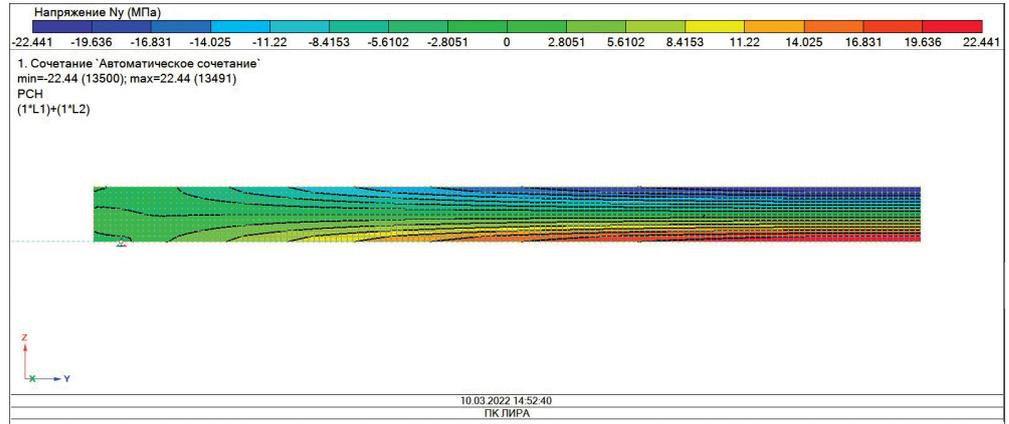


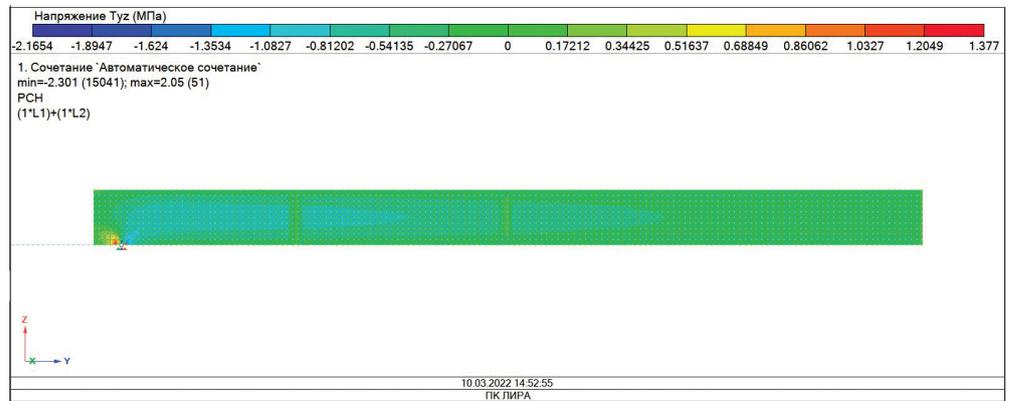
Рис. 6. Мозаика перемещений узлов вдоль оси Z на половине пролета балки Б-2

Fig. 6. Mosaic of node movements along the Z axis at the half of the beam span Б-2

Итоги расчетов для модели балки Б-3 выведены на рис. 7, 8.



а



б

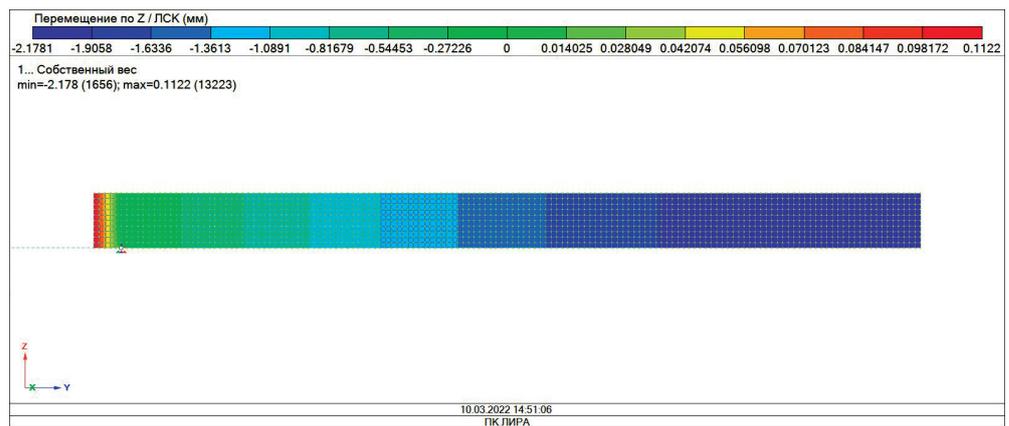
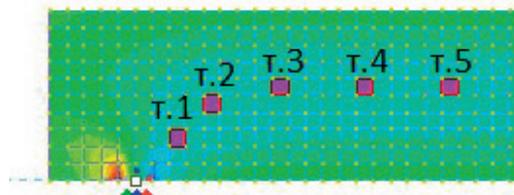
Рис. 7. Изополя напряжений (МПа) на половине пролета балки Б-3: а – N_y ; б – τ_{yz} Fig. 7. Stress isofield (MPa) at the half of the beam span Б-3: а – N_y ; б – τ_{yz} 

Рис. 8. Мозаика перемещений узлов вдоль оси Z на половине пролета балки Б-3

Fig. 8. Mosaic of node movements along the Z axis at the half of the beam span Б-3

В целях изучения скалывающих касательных напряжений, возникающих в опорной конструкции, были рассмотрены по 5 точек для каждой из 3 моделей балок. Общая схема расположения исследуемых точек касательных напряжений τ_{yz} представлена на рис. 9.

Рис. 9. Схема расположения исследуемых точек касательных напряжений τ_{yz}
Fig. 9. The layout of the points of the studied share stresses τ_{yz}



Значения касательных напряжений в опорной конструкции представлены в таблице.

Касательные напряжения (МПа) в исследуемых точках
Shear stresses (MPa) at the studied points

Балка	Точка 1	Точка 2	Точка 3	Точка 4	Точка 5
Б-1	-0,43	-0,42	-0,42	-0,41	-0,40
Б-2	-0,58	-0,57	-0,56	-0,54	-0,52
Б-3	-0,49	-0,48	-0,48	-0,47	-0,47

В ходе исследований определено, что касательные напряжения в деструктурированной балке больше на 30–35 % по сравнению со «здоровой» балкой. Касательные напряжения в усиленной балке превышают на 15–17 % показатели «здоровой» балки. Прирост по прочности у модифицированной балки по сравнению с ослабленной деструкцией балкой составил 16–18 %.

На основании полученных результатов установлены граничные условия применения модификации деструктурированных деревянных балок в опорных зонах опорных конструкций для восстановления их несущей способности. Если потеря несущей способности составляет более 35 %, то данный способ не рекомендуется применять ввиду целесообразности замены таких конструкций.

Выводы

1. Представлена методика расчета деструктурированной деревянной балки, модифицированной в опорных зонах. Методика основана на расчетной модели в виде объемного тела с заданными характеристиками материалов, полученными путем экспериментальных исследований опытных образцов.

2. Прочность деструктурированной балки, модифицированной на опорах, возросла на 16–18 % по сравнению с деструктурированной балкой.

3. Полимерные композиционные материалы возможно использовать для увеличения несущей способности деревянных балочных конструкций, если потеря несущей способности составляет не более 35 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Карельский А.В., Лабудин Б.В., Мелехов В.И. Требования к надежности и безопасной эксплуатации большепролетных клееных деревянных конструкций // Изв. вузов. Лесн. журн. 2012. № 3. С. 143–147.

Karelskiy A.V., Labudin B.V., Melekhov V.I. Reliability Requirements for the Large-Span Laminated Wood Structural Elements. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2012, no. 3, pp. 143–147. (In Russ.). <http://lesnoizhurnal.ru/upload/iblock/d47/pawx2.pdf>

2. Лабудин Б.В., Морозов В.С., Орлов А.О. Компьютерный расчет напряженно-деформированного состояния узлового соединения // Вестн. ПГТУ. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. 2019. № 3. С. 45–51.

Labudin B.V., Morozov V.S., Orlov A.O. Computer Calculation of Stress-Strain State of Node Connection. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies*, 2019, no. 3, pp. 45–51. (In Russ.). <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2019.3.45>

3. Матвеев Р.П., Лабудин Б.В., Морозов В.С., Орлов А.О. Численный анализ прочности и жесткости биомеханической системы «кость – аппарат» // Экология человека. 2017. Т. 24, № 4. С. 58–64.

Matveev R.P., Labudin B.V., Morozov V.S., Orlov A.O. Numerical Analysis of Strength and Rigidity of the Biomechanical System “Bone-Apparatus”. *Ekologiya cheloveka = Human Ecology*, 2017, vol. 24, no. 4, pp. 58–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.33396/1728-0869-2017-4-58-64>

4. Рощина С.И., Лукин М.В., Лукина А.В., Лисятников М.С. Повышение эксплуатационных свойств древесины, ослабленной биоповреждением, путем модификации клеевой композицией на основе эпоксидной смолы // Науч.-техн. вестн. Поволжья. 2014. № 4. С. 182–184.

Roshchina S.I., Lukin M.V., Lukina A.V., Lisyatnikov M.S. Increased Performance Properties Wood Weakened Biodeterioration by Modifying the Adhesive Composition Based on an Epoxy Resin. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, 2014, no. 4, pp. 182–184. (In Russ.).

5. Рощина С.И., Лукин М.В., Лукина А.В., Лисятников М.С. Восстановление деревянной балки импрегнированием полимерной композицией на основе эпоксидной смолы // Лесотехн. журн. 2015. № 3(19). С. 183–190.

Roshchina S.I., Lukin M.V., Lukin A.V., Lisyatnikov M.S. Recovery Wooden Beams Impregnating Polymer Composition Based on Epoxy Resins. *Forestry Engineering Journal*, 2015, no. 3(19), pp. 183–190. (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/14167>

6. Рощина С.И., Смирнов Е.А., Лукин М.В., Лукина А.В., Грибанов А.С. Восстановление деструктивных участков опорных зон деревянных балок путем пропитки полимерным раствором // Науч.-техн. вестн. Поволжья. 2014. № 5. С. 293–296.

Roshchina S.I., Smirnov E.A., Lukin M.V., Lukin A.V., Griбанov A.S. Destructive Recovery Phase Reference Zone Wooden Beams by Impregnation of the Polymer Solution. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*, 2014, no. 5, pp. 293–296. (In Russ.).

7. Adamu M., Rahman Md. R., Hamdan S., Khusairy M., Bakri B., Yusof F.A.B.M. Impact of Polyvinyl Alcohol/Acrylonitrile on Bamboo Nanocomposite and Optimization of Mechanical Performance by Response Surface Methodology. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 258, art. 119693. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119693>

8. Borri A., Corradi M., Speranzini E. Reinforcement of Wood with Natural Fibers. *Composites Part B: Engineering*, 2013, vol. 53, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.039>

9. Chernova T.P., Filippov V.V., Labudin B.V., Melekhov V.I. Stress-Strain State of the Elements of a Timber-to-Timber Joint Connected by Inclined Screwed-In Rods. *Environmen-*

tal and Construction Engineering: Reality and the Future. Ed. by S.V. Klyuev, A.V. Klyuev. Springer, 2021, pp. 101–107. https://doi.org/10.1007/978-3-030-75182-1_14

10. D'Ambrisia A., Focacci F., Luciano R. Experimental Investigation on Flexural Behavior of Timber Beams Repaired with CFRP Plates. *Composite Structures*, 2014, vol. 108, pp. 720–728. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.10.005>

11. Dietsch P., Kreuzinger H. Dynamic Effects in Reinforced Beams at Brittle Failure – Evaluated for Timber Members. *Engineering Structures*, 2020, vol. 209, art. 110018. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110018>

12. Dietsch P., Winter S. Structural Failure in Large-Span Timber Structures: A Comprehensive Analysis of 230 Cases. *Structural Safety*, 2018, vol. 71, pp. 41–46. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2017.11.004>

13. Esmailpour A., Majidi R., Taghiyari H.R., Ganjkhani M., Mohseni Armaki S.M., Papadopoulou A.N. Improving Fire Retardancy of Beech Wood by Graphene. *Polymers*, 2020, vol. 12(2), art. 303. <https://doi.org/10.3390/polym12020303>

14. Franke S., Franke B., Harte A.M. Failure Modes and Reinforcement Techniques for Timber Beams – State of the Art. *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 97, pp. 2–13. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.021>

15. Frese M., Blaß H.J. Statistics of Damages to Timber Structures in Germany. *Engineering Structures*, 2011, vol. 33, iss. 11, pp. 2969–2977. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.02.030>

16. Gentile C., Svecova D., Rizkalla S.H. Timber Beams Strengthened with GFRP Bars: Development and Applications. *Journal of Composites for Construction*, 2002, vol. 6, iss. 1, art. 11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:1(11))

17. Khelifa M., Celzard A. Numerical Analysis of Flexural Strengthening of Timber Beams Reinforced with CFRP Strips. *Composite Structures*, 2014, vol. 111, pp. 393–400. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2014.01.011>

18. Kim Y.J., Harries K.A. Modeling of Timber Beams Strengthened with Various CFRP Composites. *Engineering Structures*, 2010, vol. 32, iss. 10, pp. 3225–3234. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.06.011>

19. Kolya H., Kang C.-W. Polyvinyl Acetate/Reduced Graphene Oxide-Poly (Diallyl Dimethylammonium Chloride) Composite Coated Wood Surface Reveals Improved Hydrophobicity. *Progress in Organic Coatings*, 2021, vol. 156, art. 106253. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106253>

20. Koshcheev A.A., Roshchina S.I., Aleksiievets V., Labudin B.V. Local Deformation and Strength Characteristics of S-Shaped Reinforcement in Wood. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 896, art. 012060. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012060>

21. Koshcheev A.A., Roshchina S.I., Naichuk A.Y., Vatin N.I. The Effect of Eccentricity on the Strength Characteristics of Glued Rods Made of Steel Cable Reinforcement in Solid Wood. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 896, art. 012059. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012059>

22. Kreher K., Natterer J., Natterer J. Timber-Glass-Composite Girders for a Hotel in Switzerland. *Structural Engineering International*, 2004, vol. 14, iss. 2, pp. 149–168. <https://doi.org/10.2749/101686604777963964>

23. Lukin M., Prusov E., Roshchina S., Karelina M., Vatin N. Multi-Span Composite Timber Beams with Rational Steel Reinforcements. *Buildings*, 2021, vol. 11, iss. 2, art. 46. <https://doi.org/10.3390/buildings11020046>

24. Lukin M., Sergeev M., Lisyatnikov M. Non Split Wooden Beam Reinforced with Composite Reinforcement. *Proceedings of EECE 2020*. Cham, Springer, 2021, pp. 115–123. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72404-7_12

25. Lukina A., Roshchina S., Griбанov A. Method for Restoring Destructed Wooden Structures with Polymer Composites. *Proceedings of EECE 2020*. Cham, Springer, 2021, pp. 464–474. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72404-7_45
26. Marzi T. Nanostructured Materials for Protection and Reinforcement of Timber Structures: A Review and Future Challenges. *Construction and Building Materials*, 2015, vol. 97, pp. 119–130. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.016>
27. Nowak T., Jasięko J., Kotwica E., Krzosek S. Strength Enhancement of Timber Beams Using Steel Plates – Review and Experimental Tests. *Drewno*, 2016, vol. 59, no. 196, pp. 75–90. <http://dx.doi.org/10.12841/wood.1644-3985.150.06>
28. Orlando N., Taddia Yu., Benvenuti E., Pizzo B., Alessandri C. End-Repair of Timber Beams with Laterally-Loaded Glued-In Rods: Experimental Trials and Failure Prediction through Modelling. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 195, pp. 623–637. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.045>
29. Papadopoulos A.N., Bikiaris D.N., Mitropoulos A.C., Kyzas G.Z. Nanomaterials and Chemical Modifications for Enhanced Key Wood Properties: A Review. *Nanomaterials*, 2019, vol. 9, iss. 4, art. 607. <https://doi.org/10.3390/nano9040607>
30. Raftery G.M., Harte A.M. Low-Grade Glued Laminated Timber Reinforced with FRP Plate. *Composites Part B: Engineering*, 2011, vol. 42, iss. 4, pp. 724–735. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.01.029>
31. Raftery G.M., Whelanb C. Low-Grade Glued Laminated Timber Beams Reinforced Using Improved Arrangements of Bonded-In GFRP Rods. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 52, pp. 209–220. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.044>
32. Sergeev M.S., Griбанov A.S., Roschina S.I. The Stress Strain State of Composite Multi-Span Beams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 753, art. 032068. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/3/032068>
33. Sergeev M., Rimshin V., Lukin M., Zdralovic N. Multi-Span Composite Beam. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 896, art. 012058. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/896/1/012058>
34. Stupnicki J. Analysis of the Behavior of Wood under External Load, Based on a Study of the Cell Structure. *Acta Polytechnica Scandinavica Civil Engineering and Building Construction Series*, 1962, vol. 53. 19 p.
35. Teng T.-J., Mat Arip M.N., Sudesh K., Nemoikina A., Jalaludin Z., Ng E.-P., Lee H.-L. Conventional Technology and Nanotechnology in Wood Preservation: A Review. *BioResources*, 2018, vol. 13, no. 4, pp. 9220–9252. <https://doi.org/10.15376/biores.13.4.Teng>
36. Vlad-Cristea M., Riedl B., Blanchet P., Jimenez-Pique E. Nanocharacterization Techniques for Investigating the Durability of Wood Coatings. *European Polymer Journal*, 2012, vol. 48, iss. 3, pp. 441–453. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2011.12.002>
37. Yahyaеi-Moayyed M., Taheri F. Experimental and Computational Investigations into Creep Response of AFRP Reinforced Timber Beams. *Composite Structures*, 2011, vol. 93, iss. 2, pp. 616–628. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.08.017>

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

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article