
Научная статья

УДК 691.116

EDN OTJRPQF

Влияние армирования сжатой и растянутых зон композитной арматурой на напряженно-деформированное состояние клееной деревянной балки

Данил Юрьевич Цветков¹, аспирант

Научный руководитель – Сергей Валерьевич Цыбакин², доцент, кандидат технических наук, декан архитектурно-строительного факультета Костромская ГСХА

^{1,2}Костромская государственная сельскохозяйственная академия, Костромская область, Костромской район, пос. Караваево, Россия

takensuch@mail.ru

Аннотация. Исследовано влияние усиления как сжатых, так и растянутых зон клееных деревянных балок композитной арматурой на их напряженно-деформированное состояние. Рассмотрено эффективность различных методов армирования, с акцентом на композитные материалы, такие как углеродное волокно, для повышения прочности и долговечности клееных деревянных балок. В исследовании используется COMSOL Multiphysics для создания модели, сравниваются балки без армирования, армирование в растянутой зоне и симметричное армирование. Результаты демонстрируют, что симметричное армирование значительно улучшает эксплуатационные характеристики балок, что позволяет рассматривать этот метод в качестве жизнеспособного варианта для усиления деревянных конструкций с учетом податливости материала, влияющей на прочность балок при упругом изгибе.

Ключевые слова: деревянная балка, композитная арматура, напряженно-деформированное состояние, армированная балка, клееные деревянные конструкции, COMSOL, программное моделирование

Для цитирования: Цветков Д. Ю. Влияние армирования сжатой и растянутых зон композитной арматурой на напряженно-деформированное состояние клееной деревянной балки // Актуальные исследования молодых ученых – результаты и перспективы : материалы науч.-практ. конф. (Благовещенск, 8 февраля 2024 г.). Благовещенск : Дальневосточный ГАУ, 2024. С. 145–158.

Original article

The effect of reinforcement of compressed and stretched zones with composite reinforcement on the stress-strain state of a glued wooden beam

Danil Yurievich Tsvetkov¹, A graduate student

Scientific supervisor – Sergey V. Tsybakin², Docent, Candidate of Technical Sciences, Dean of the Faculty of Architecture and Civil Engineering of the Kostroma State Agricultural Academy

^{1,2}Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma region, Kostroma district, Karavaevo settlement, Russia

takensuch@mail.ru

Annotation. The effect of reinforcing both compressed and tensile zones of glued laminated timber beams with composite reinforcement on their stress-strain state is investigated. The effectiveness of various reinforcement methods, with emphasis on composite materials such as carbon fiber, for improving the strength and durability of glued timber beams is examined. The study uses COMSOL Multiphysics to create a model, comparing beams with no reinforcement, tensile reinforcement and symmetrical reinforcement. The results demonstrate that symmetrical reinforcement significantly improves the performance of the beams, allowing this method to be considered as a viable option for strengthening timber structures, taking into account the ductility of the material affecting the elastic bending strength of the beams.

Keywords: wooden beam, composite reinforcement, stress-strain state, reinforced beam, glued wooden structures, COMSOL, software modeling

For Citation: Tsvetkov D. Yu. Vliyaniye armirovaniya szhatoy i rastyanutykh zon kompozitnoy armaturoy na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie kleenoy derevyannoy balki [The effect of reinforcement of compressed and stretched zones with composite reinforcement on the stress-strain state of a glued wooden beam]. *Aktual'nye issledovaniya molodykh uchenykh – rezul'taty i perspektivy* : materialy nauch.-prakt. konf. (Blagoveshchensk, 8 fevralya 2024 g.). Blagoveshchensk, Dal'nevostochnyy GAU, 2024, pp. 145–158. (in Russ.).

Учёные в области современного строительства активно ищут пути не только к повышению эффективности и надежности конструкций, но и способ сделать материалы экологичными. Одним из направлений, отвечающих этим требованиям, является использование возобновляемых ресурсов. В данном исследовании фокус внимания прикован к древесине. Строительство из дерева не только подчеркивает экологическую ответственность, но и вносит значительный вклад в сокращение углеродного следа, поскольку дерево в процессе своего роста активно абсорбирует углекислый газ.

Цель исследования: оценка влияния композитной арматуры на напряженно-деформированное состояние клееных деревянных балок,

изучение того, как арматура влияет на конструктивные характеристики и эффективность симметричной арматуры по сравнению с одиночной.

Значимость исследования: удовлетворение потребности в улучшенных строительных материалах, которые поддерживают экологичность.

В последние годы значительное внимание уделяется улучшению характеристик деревянных балок через их армирование, в частности с использованием композитной арматуры. Этот подход позволяет значительно увеличить прочность и долговечность деревянных конструкций, расширяя тем самым спектр их применения в строительстве. Армирование деревянных балок композитными материалами открывает новые возможности для реализации архитектурных и проектных идей, делая возможным создание более легких, прочных и долговечных конструкций.

Существует множество методов армирования клееных деревянных балок, каждый из которых имеет свои преимущества и области применения. В данном исследовании изучается использование композитной арматуры.

Исследования в области армирования клееных деревянных конструкций активно развиваются как в России, так и за рубежом. В России ключевые центры исследований находятся в Москве, Владимире, Иркутске и Новосибирске, в то время как на международном уровне ведущие работы проводятся в Финляндии, Швеции, Германии и США. Это подчеркивает глобальный интерес к повышению эффективности и надежности деревянных конструкций через инновационные методы армирования, среди которых композитная арматура занимает особое место [1].

Наиболее перспективным материалом для усиления деревянных балок можно считать углепластик – композитный материал с армирующей основой из углеродного (графитового) волокна. Полимер, как и дерево, ортогонально анизотропен, за счет армированных волокон имеет три взаимно перпендикулярные плоскости симметрии прочностных упругих свойств в каждой точке условно однородной сплошной среды [2].

Еренчиковым С. А. совместно с другими исследователями был проведен анализ клееной балки, армированной стальными пластинами, в сравнении с неармированной конструкцией. Результаты показали, что использование пластинчатого армирования увеличивает эффективность балки на 16,1 %, что подчеркивает значительное улучшение ее прочностных характеристик благодаря этому методу армирования [3].

Изучив материалы учёных О. М. Устраханова, Г. Г. Ирзаева, М. Ю. Овцова и А. А. Иоддик, можно прийти к выводу, что для усиления прочности и жесткости клееных деревянных балок важно правильно выбирать метод армирования. Несимметричное армирование показывает, что древесина изначально работает упруго, но при увеличении нагрузки требуется более сбалансированный подход, такой как симметричное армирование, для предотвращения преждевременного разрушения. Двойное симметричное армирование, особенно с использованием предварительно напряженной арматуры, значительно снижает напряжения и прогибы, демонстрируя его эффективность в повышении надежности и долговечности балок [4,5,6].

Несмотря на множество преимуществ композитной арматуры, её относительно высокая податливость может негативно влиять на увеличение прочностных характеристик балок при упругом изгибе. Анализ практических испытаний показывает, что методы расчета армированных деревянных балок предоставляют запас по несущей способности, подтверждая эффективность усиления арматурой. Особенно выделяется двойное армирование, значительно увеличивающее прочность и жесткость балок, в то время как одиночное армирование по сравнению с двойным имеет меньшую несущую способность [7,8].

Армирование клееных деревянных балок композитными материалами, в частности углепластиком, значительно увеличивает их прочностные и упругие характеристики по сравнению с балками без армирования.

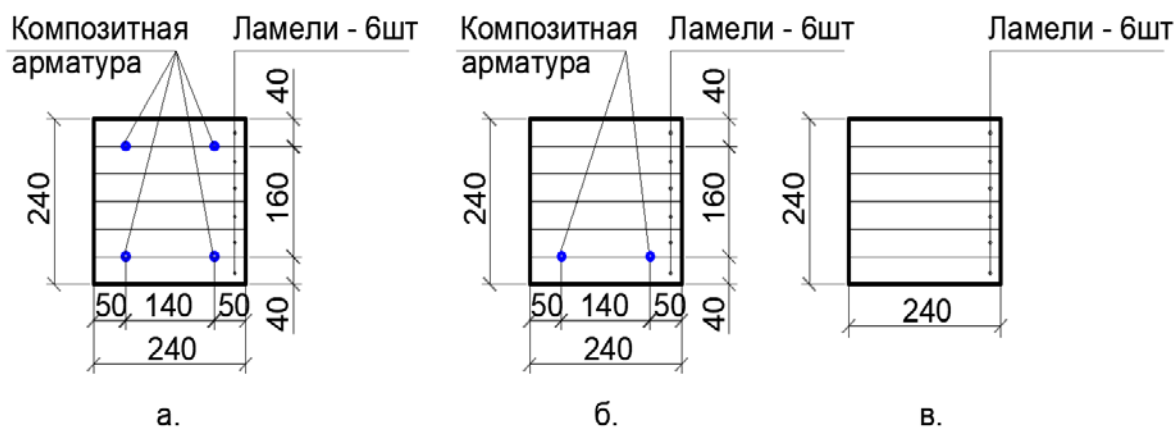
Сравнение армирования только в растянутой зоне и двойного симметричного армирования покажет, что симметричное армирование обеспечивает более высокую эффективность усиления, улучшая несущую способность и жесткость балок, при этом необходимо учитывать податливость композитных материалов, которая может влиять на итоговые прочностные характеристики при упругом изгибе.

Одним из направлений повышения производительности и улучшения качества проектных разработок является применение системы автоматизированного проектирования [9]. Для подтверждения предположений и детального анализа влияния различных методов армирования на прочностные и упругие характеристики клееных деревянных балок, используется моделирование в программном комплексе COMSOL Multiphysics [10,11]. Инструмент, который позволит визуализировать и визуально оценить эффекты от применения углепластика как в растянутой зоне, так и при двойном симметричном армировании по сравнению с балками без армирования, обеспечивая высокую точность и наглядность получаемых результатов. Для создания моделей в COMSOL Multiphysics, опираются на характеристики материалов, извлеченные из следующих источников: СП 64.13330.2017 СНиП П-25-80 «Деревянные конструкции», СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», СП 382.1325800.2017 «Конструкции деревянные клееные на вклеенных стержнях», ГОСТ 31938-2012 «Арматура стеклопластиковая композитная».

Модели обеспечены актуальными данными по физическим и механическим свойствам используемых материалов, что является ключом к достоверности и точности расчетов и анализа влияния армирования на прочность и упругость деревянных балок.

Для проверки гипотез было смоделировано 3 варианта балок: клееная деревянная балка с армированием сжатой и растянутой зон, клееная

деревянная балка с армированием растянутой зоны, клееная деревянная балка без армирования (рис.1).



**Рисунок 1 – а) клееная деревянная балка с армированием сжатой и растянутой зон;
б) клееная деревянная балка с армированием растянутой зоны; в) клееная
деревянная балка без армирования, мм**

Геометрические размеры балок 6000x240x240 мм обусловлены необходимостью соответствия стандартным размерам, используемым в строительной практике, что обеспечивает их широкую применимость и упрощает интеграцию в различные конструкции. В соответствии с требованиями специальных методов постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics [11], при моделировании воздействий на балку в программе COMSOL Multiphysics учитывается разнообразие нагрузок, характерных для строительных конструкций. Это включает в себя расчет как постоянных (собственный вес конструкции), так и переменных нагрузок. После создания геометрии клееной деревянной балки, описывается материал и работа механики в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Затем модель рассчитывается алгоритмами программного комплекса.

На рис. 2, рис. 3, рис. 4 приведены результаты расчёта для клееной деревянной балки, армированной композитной арматурой в сжатой и

растянутой зонах. Изображены деформация балки, напряжение в балке, напряжение в стержнях.

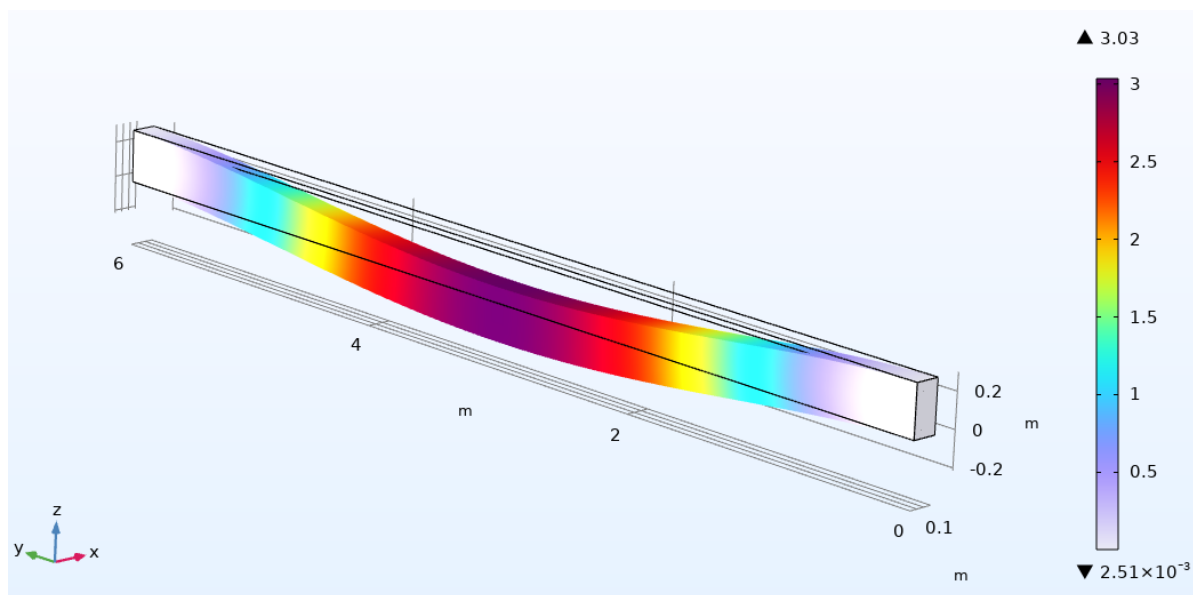


Рисунок 2 – Деформация клееной деревянной балки с симметричным армированием, мм

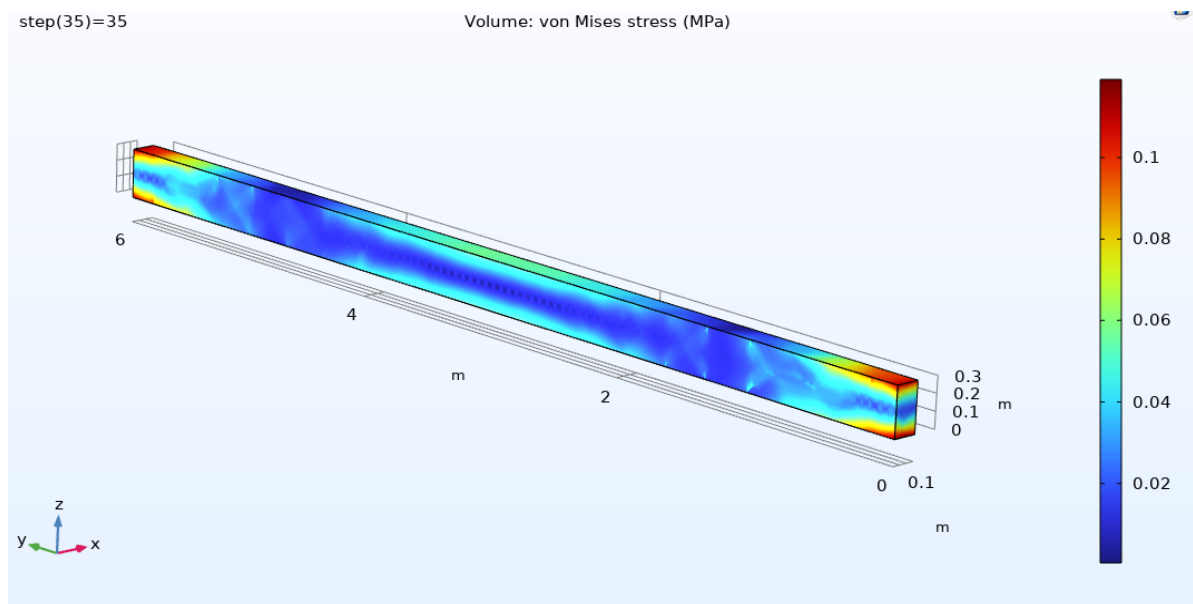


Рисунок 3 – Напряжение в клееной деревянной балке с симметричным армированием, МПа

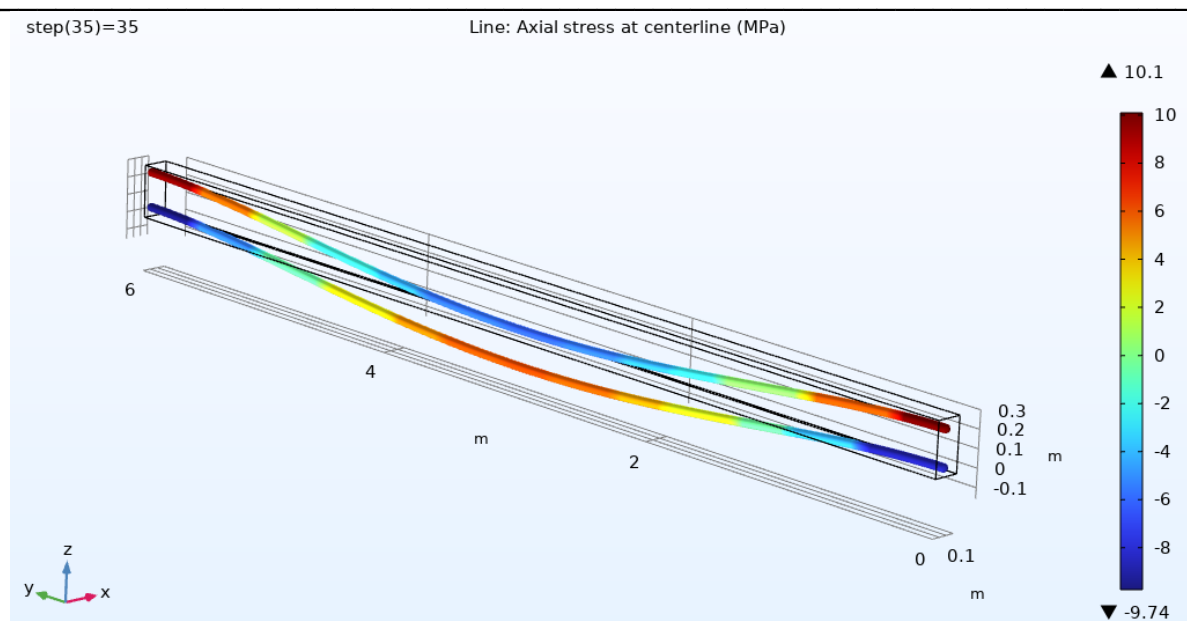
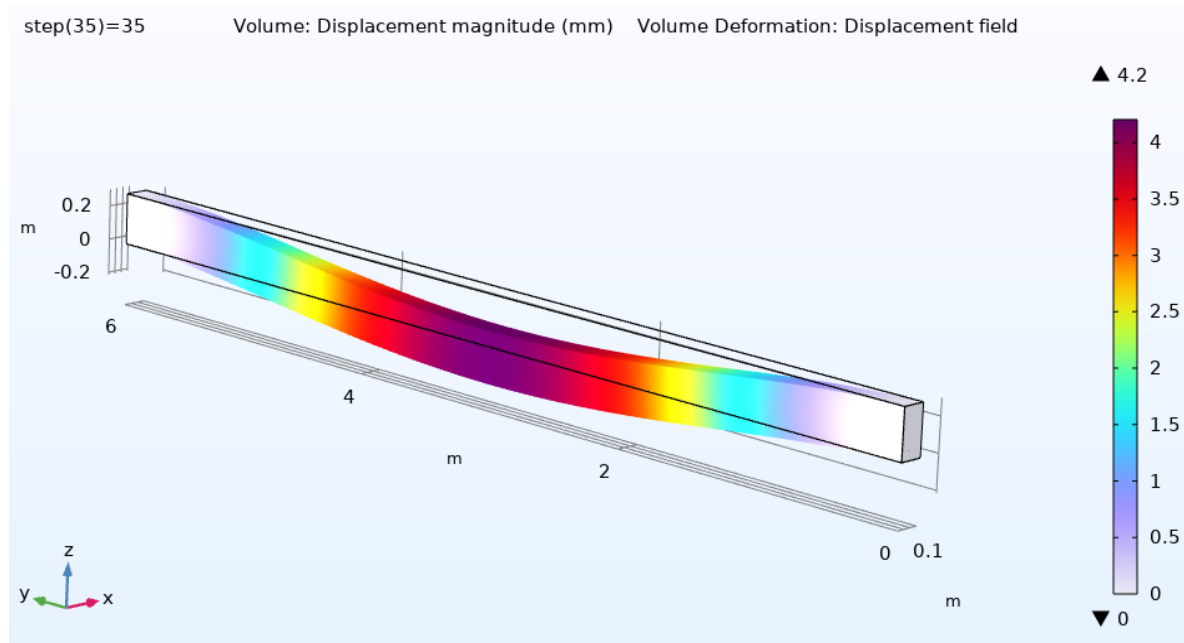


Рисунок 4 – Напряжение в стержнях, МПа

На рис. 5, рис. 6, рис. 7 приведены результаты расчёта для клееной деревянной балки, армированной композитной арматурой в растянутой зоне.



**Рисунок 5 – Деформация клееной деревянной балки
с армированием растянутой зоны, мм**

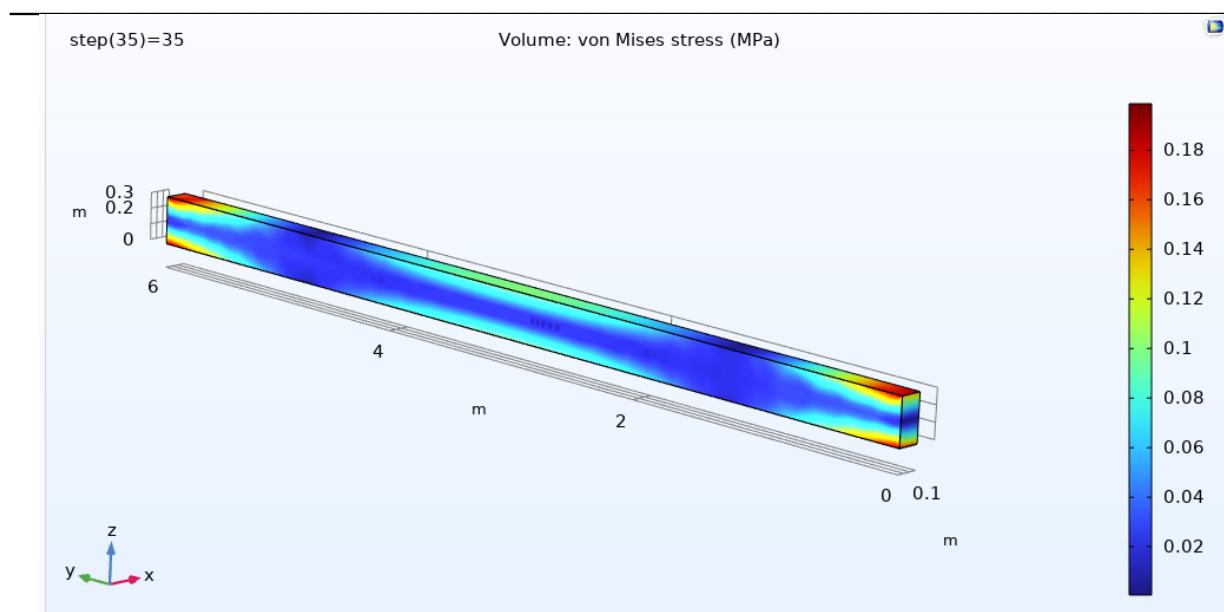


Рисунок 6 – Напряжение в клееной деревянной балке с армированием растянутой зоны, МПа

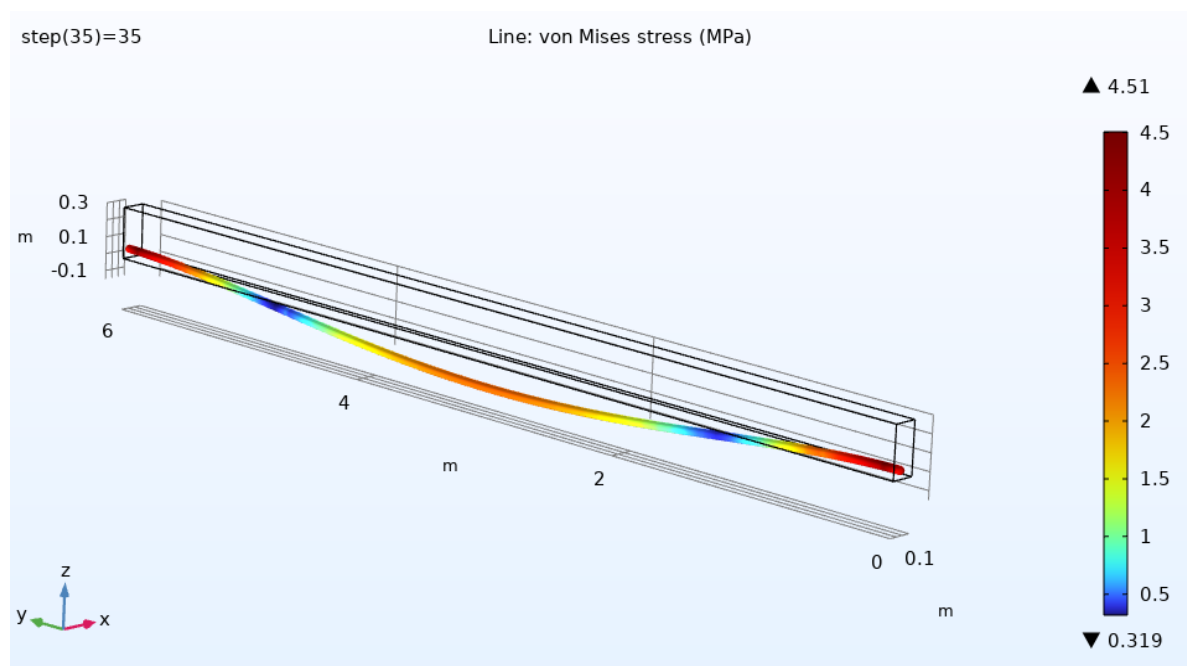


Рисунок 7 – Напряжения в стержнях, МПа

На рис. 8 и рис. 9 приведены результаты расчёта для клееной деревянной балки без армирования.

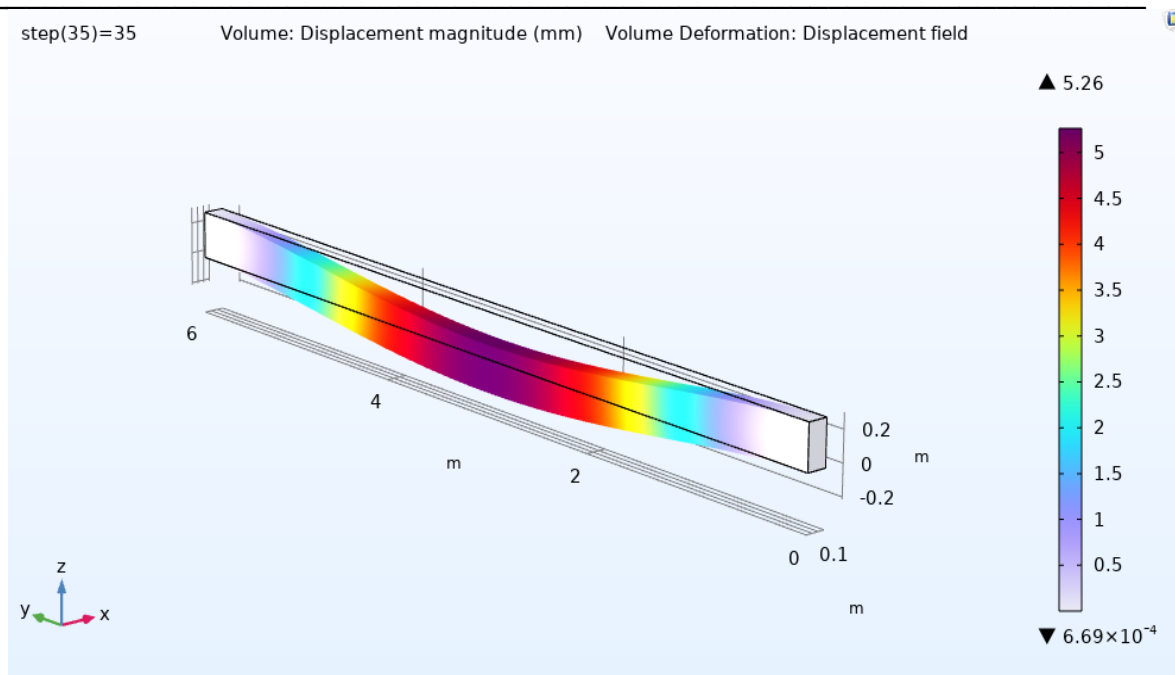


Рисунок 8 – Деформация клееной деревянной балки без армирования, мм

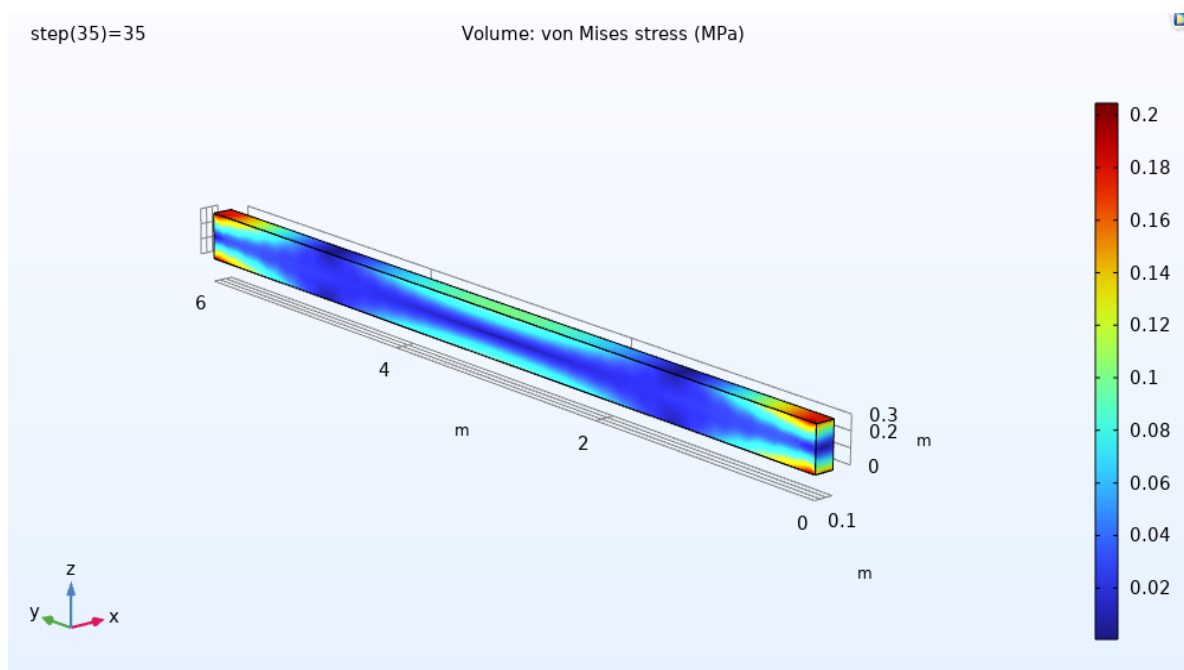


Рисунок 9 – Напряжение в клееной деревянной балке без армирования, МПа

Результаты напряжения и прогиб в клееной деревянной балке сведены в таблицу.

Таблица – Сводная таблица результатов моделирования

Вид балки	Прогиб, мм	Максимальное напряжение в балке, МПа	Максимальное напряжение в стержнях, МПа
С симметричным армированием	3,03	0,1	10,01/-9,74
Армирование растянутой зоны	4,2	0,18	4,5
Без армирования	5,26	0,2	-

Вывод. На основе проведенных исследований и анализа результатов, полученных с помощью моделирования в COMSOL Multiphysics, у балки с симметричным армированием прогиб меньше на 42,4 %. Сравнение балок с армированием в растянутой зоне, симметричное армирование и балок без армирования подтвердило предположение о том, что симметричное армирование обеспечивает наилучшее сочетание прочности и жесткости. Исследование демонстрирует, что симметричное армирование клееных деревянных балок композитными материалами значительно повышает их прочность и долговечность, предлагая жизнеспособный метод укрепления деревянных конструкций в строительстве. Этот подход потенциально способствует более широкому внедрению методов устойчивого строительства. При этом относительная податливость композитной арматуры может негативно сказаться на прочностных характеристиках балок при упругом изгибе.

В дальнейшем планируется продолжить изучение различных материалов и конфигураций армирования с целью оптимизации прочностных и эксплуатационных характеристик армированных деревянных балок. Предполагается провести ряд экспериментов в реальных условиях для оценки влияния различных эксплуатационных и климатических факторов на поведение армированных конструкций. Это поможет не только подтвердить результаты наших моделирований, но и расширить понимание возможностей применения композитной арматуры в строительстве. На основе испытаний и моделей планируется разработка технических решений и регламентов для

производства клееных деревянных балок с армированием композитной арматурой.

Список источников

1. Волик А. Р., Цветинский И. И., Работа армированных клееных балок с различными материалами армирования и их расположением // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Прикладные науки. 2006. № 9. С. 21–25. EDN [VKETSH](#)
2. Устарханов Т. О., Ирзаев Г. Г., Вишталов Р. И. Усиление напряженных зон дощатоклееной балки армированием углеродной тканью // Научные исследования: итоги и перспективы. 2020. Т. 1, № 3. С. 38–44. DOI: [10.21822/2713-220X-2020-1-3-38-44](#). EDN [BRYGIV](#)
3. Бай В. Ф., Еренчиков С. А., Гач Е. А., Исследование работы деревянной балки, армированной стальными пластинами // Архитектура, строительство, транспорт. 2023. № 2 (104). С. 46–53. DOI: [10.31660/2782-232X-2023-2-46-53](#). EDN [SNWMFN](#)
4. Устраханов О. М., Ирзаев Г. Г. Схема армирования дощатоклееной балки стеклопластиковым прутком // Современное строительство и архитектура. 2018. № 3 (11). С. 16–20. DOI: [10.18454/mca.2018.11.2](#). EDN [XVJGFN](#)
5. Овцова М. Ю., Иодчик А. А., Исследование влияния армирования на напряженно-деформированное состояние клееных балок // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2020. № 1. С. 84–87. EDN [TPIWIJ](#)
6. Проценко Е. А., Цыбакин С. В., Титунин А. А. Композитное армирование растянутой зоны клееных балок // Инновационные исследования: опыт, проблемы внедрения результатов и пути решения : сборник статей всерос. науч.-практ. конф. Уфа: Аэтерна, 2022. С. 233–237. EDN [LORJHY](#)
7. Максимов С. П., Башкова Ю. Б., Шкуркина А. И., Вшківков Е. П. Исследование влияния армирования на напряженно-деформированное состояние клееных балок // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2020. № 1. С. 84–87. EDN [TPIWIJ](#)
8. Есипов А. В., Воробьев Я. В., Бараняк А. И., Сальный И. С. Результаты комплексных исследований деревянных армированных балок // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2018. № 2(37). С. 80–86. EDN [XVVICL](#)
9. Хохлова Е. С., Титунин А. А., Федотов А. А. Автоматизированное проектирование изделий из древесины: учебно-методическое пособие. Кострома : Костромской государственный университет, 2017. 48 с. ISBN 978-5-8285-0938-6. EDN [XMQAPB](#)
10. Introduction to COMSOL Multiphysics. COMSOL. 2023

11. Специальные методы постобработки и визуализации в COMSOL Multiphysics. COMSOL. 2023

References

1. Volik A. R., Tsvetinskiy I. I., Rabota armirovannykh kleenyykh balok s razlichnymi materialami armirovaniya i ikh raspolozheniem [Performance of reinforced glulam beams with different reinforcement materials and their arrangement]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya B: Prikladnye nauki*. 2006;9:21–25. (in Russ.). EDN [VKETSH](#)
2. Ustarkhanov T. O., Irzaev G. G., Vishtalov R. I. Usilenie napryazhennykh zon doshatokleenoy balki armirovaniem uglerodnoy tkan'yu [Reinforcement of the stressed zones of a glued board beam with carbon cloth reinforcement] *Nauchnye issledovaniya: itogi i perspektivy*. 2020;1(3):38–44. DOI: 10.21822/2713-220X-2020-1-3-38-44. (in Russ.). EDN [BRYGIV](#)
3. Bay V. F., Erenchikov S. A., Gach E. A., Issledovanie raboty derevyannoy balki, armirovannoy stal'nymi plastinami [Study of the operation of a wooden beam reinforced with steel plates]. *Arkhitektura, stroitel'stvo, transport*. 2023;2(104):46–53. DOI: [10.31660/2782-232X-2023-2-46-53](#). (in Russ.). EDN [SNWMFN](#)
4. Ustrakhanov O. M., Irzaev G. G. Skhema armirovaniya doshatokleenoy balki stekloplastikovym prutkom [Scheme of laminated beam reinforcement with a fiberglass bar]. *Sovremennoe stroitel'stvo i arkhitektura*. 2018;3(11):16–20. DOI: [10.18454/mca.2018.11.2](#). (in Russ.). EDN [XVJGFN](#)
5. Ovtsova M. Yu., Iodchik A. A., Issledovanie vliyaniya armirovaniya na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie kleenyykh balok [Study of the effect of reinforcement on the stress-strain state of glued beams]. *Dal'niy Vostok: problemy razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo kompleksa*. 2020;1:84–87. (in Russ.). EDN [TPIWIJ](#)
6. Proshchenko E. A., Tsybakin S. V., Titunin A. A. Kompozitnoe armirovanie rastyanutoy zony kleenyykh balok [Composite reinforcement of the tensile zone of glulam beams]. *Innovatsionnye issledovaniya: opyt, problemy vnedreniya rezul'tatov i puti resheniya : sbornik statey vsenos. nauch.-prakt. konf.* Ufa, Aeterna, 2022, pp. 233–237. (in Russ.). EDN [LOPJHY](#)
7. Maksimov S. P., Bashkova Yu. B., Shkurkina A. I., Vshkivkov E. P. Issledovanie vliyaniya armirovaniya na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie kleenyykh balok [Study of the effect of reinforcement on the stress-strain state of glued beams]. *Dal'niy Vostok: problemy razvitiya arkhitekturno-stroitel'nogo kompleksa*. 2020;1:84–87. (in Russ.). EDN [TPIWIJ](#)
8. Esipov A. V., Vorob'ev Ya. V., Baranyak A. I., Sal'nyy I. S. Rezul'taty kompleksnykh issledovaniy derevyannykh armirovannykh balok [The results of comprehensive studies of wooden reinforcement beams]. *Akademicheskii vestnik UralNIIproekt RAASN*. 2018;2(37):80–86. EDN [XVVICL](#)
9. Khokhlova E. S., Titunin A. A., Fedotov A. A. Avtomatizirovannoe proektirovanie izdeliy iz drevesiny [Automated design of wood products] :

uchebno-metodicheskoe posobie. Kostroma, Kostromskoy gosudarstvennyy universitet, 2017, 48 p. ISBN 978-5-8285-0938-6. EDN [XMQAPB](#)

10. Introduction to COMSOL Multiphysics. COMSOL, 2023.

11. Spetsial'nye metody postobrabotki i vizualizatsii v COMSOL Multiphysics. COMSOL, 2023.

© Цветков Д. Ю., 2024

Статья поступила в редакцию 23.01.2024; одобрена после рецензирования 15.02.2024; принята к публикации 06.03.2024.

The article was submitted 23.01.2024; approved after reviewing 15.02.2024; accepted for publication 06.03.2024.