

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-3\(46\)-7-21](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-3(46)-7-21)
УДК 69.059.3

EDN: EVACHB

ПРИМЕНЕНИЕ ПЛАСТИН ИЗ УГЛЕПЛАСТИКА ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ДЕРЕВЯННОГО ЭЛЕМЕНТА: АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ANSYS

М.В. АРИСКИН, канд. техн. наук
К.А. ОВЧИННИКОВ✉
Н.В. КНЯЗЕВ

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

Аннотация

Введение. В статье представлено комплексное исследование эффективности применения углепластиковых пластин для усиления деревянных конструкций с дефектами, выполненное с использованием численного моделирования в программном комплексе ANSYS.

Цель. Оценка влияния различных вариантов усиления на распределение напряженно-деформированного состояния.

Материалы и методы. Для моделирования были выбраны деревянные балки с типичными дефектами, локализованными в верхней и нижней зонах сечения, что позволяет всесторонне оценить влияние дефектов на структурную целостность.

Результаты. Рассмотрены варианты усиления, предусматривающие использование пластин из углепластика в сочетании с эпоксидной смолой, что позволило существенно снизить напряжения сжатия, растяжения и пластические деформации. Проведен сравнительный анализ семи различных конструктивных решений, результаты которого выявили оптимальные схемы перераспределения нагрузок и уменьшения прогибов балки. Особое внимание уделено учету нелинейного характера деформаций древесины, что позволяет более точно воспроизвести реальные эксплуатационные условия.

Выводы. Полученные данные демонстрируют высокую эффективность предлагаемого метода усиления, открывая перспективы для дальнейших экспериментальных исследований, практического применения в реконструкции деревянных конструкций и разработки новых нормативных рекомендаций в области строительных технологий. Кроме того, проведенное исследование выявляет потенциал применения современных компьютерных методов анализа в решении сложных инженерных задач, связанных с восстановлением поврежденных деревянных конструкций, что позволяет оптимизировать конструктивные решения и снизить затраты на ремонт.

Ключевые слова: деревянная балка, углепластик, эпоксидная смола, численное моделирование, ANSYS, нелинейная деформация, усиление конструкций, композитные материалы

Для цитирования: Арискин М.В., Овчинников К.А., Князев Н.В. Применение пластин из углепластика для усиления деревянного элемента: анализ эффективности на основе численного моделирования в ANSYS. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2025;46(3):7–21. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-3\(46\)-7-21](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-3(46)-7-21)

Вклад авторов

Арискин М.В. – постановка задачи исследования, разработка методики численного моделирования, анализ и интерпретация полученных данных, формулировка выводов.

Овчинников К.А. – построение расчетных моделей в ANSYS, выполнение численных экспериментов, обработка и систематизация результатов.

Князев Н.В. – подбор и анализ литературных источников, подготовка иллюстративного материала, участие в обсуждении результатов и оформлении текста статьи.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 19.03.2025

Поступила после рецензирования 14.05.2025

Принята к публикации 22.05.2025

CARBON FIBER PLATES FOR REINFORCING WOODEN ELEMENTS: AN EFFICIENCY ANALYSIS BY MEANS OF ANSYS SIMULATION

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

K.A. OVCHINNIKOV✉

N.V. KNYAZEY

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

Abstract

Introduction. This paper explores the efficiency of using carbon fiber reinforced polymer plates to reinforce defective wooden structures.

Aim. To assess the impact of different reinforcement solutions on the distribution of stress-strain state.

Materials and methods. Numerical modeling was applied using ANSYS simulation software. Wooden beams with typical defects localized in the upper and lower areas of the cross-section were selected for modeling, which provides a comprehensive assessment of the impact of defects on structural integrity.

Results. Options for reinforcement are considered, which involve the use of carbon fiber plates in combination with epoxy resin, thereby significantly reducing compressive and tensile stresses, as well as plastic deformation. Seven different constructional solutions were compared, and the results revealed the optimal schemes for load redistribution and beam deflection reduction. Particular attention was paid to nonlinear wood deformation, which enables the real operating conditions to be reproduced more accurately.

Conclusions. The data obtained demonstrate the high efficiency of the proposed reinforcement solution, thus opening up prospects for further experimental research, practical application in the reconstruction of wooden structures, as well as the development of new regulatory guidelines in the field of construction technologies. In addition, the study reveals the potential of modern computer analysis methods in solving complex engineering problems related to the restoration of damaged wooden structures, thus enabling the optimization of design solutions and reduction of repair costs.

Keywords: wooden beam, carbon fiber reinforced polymer, epoxy resin, numerical modeling, ANSYS software, nonlinear deformation, structural reinforcement, composite materials

For citation: Ariskin M.V., Ovchinnikov K.A., Knyazev N.V. Carbon fiber plates for reinforcing wooden elements: an efficiency analysis by means of ANSYS simulation. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2025;46(3):7–21. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-3\(46\)-7-21](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-3(46)-7-21)

Authors contribution statement

Ariskin M.V. – setting the research aim, developing the numerical modeling methodology, analyzing and interpreting the data, and formulating conclusions.

Ovchinnikov K.A. – building computational models in the ANSYS software, performing numerical experiments, processing and systematizing results.

Knyazev N.V. – selection and review of literature, preparation of illustrative material, participation in the results discussion and article text formatting.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

Authors declare no conflict of interest.

Received 19.03.2025

Revised 14.05.2025

Accepted 22.05.2025

Введение

В современных условиях повышения требований к надежности строительных конструкций актуальной становится проблема усиления деревянных элементов с дефектами. Повреждения древесины могут значительно снижать несущую способность и долговечность элементов. Данная проблема требует разработки эффективных методов их восстановления и усиления. Одним из перспективных направлений является применение композитных материалов. Данный метод неоднократно показывал свою эффективность в области усиления деревянных элементов. В России проводились испытания по усилению с помощью стеклоткани [1]. Также исследовался вопрос влияния количества слоев ленты из углеволокна на увеличение несущей способности [2]. Проводились эксперименты по определению достаточного процента армирования углеволокном [3]. Но вопрос усиления существующих элементов с дефектами полимерными материалами освещен недостаточно в нашей стране. За рубежом проводились исследования по увеличению несущей способности деревянных элементов исторических зданий, которые имели значительные дефекты [4, 5]. Отсутствие нормативной базы и недостаточное количество исследований делает данное направление перспективным. В статье рассмотрены деревянные элементы с несколькими видами дефектов, усиленные пластинами из углепластика и эпоксидной смолой. Настоящее исследование направлено на оценку влияния различных вариантов усиления деревянных балок с дефектами на напряженно-деформированное состояние с использованием численного моделирования в ANSYS [6, 7].

Методика исследования*Описание расчетной модели*

Для исследования выбрана деревянная балка длиной 1200 мм и сечением 100 × 100 мм. Моделирование выполнено для семи вариантов конструкции:

Вариант 1. Контрольная балка без дефектов.

Вариант 2. Балка с дефектом в нижней зоне в середине пролета.

Вариант 3. Балка с дефектом в нижней зоне, заполненным эпоксидной смолой, усиленная пластиной из углепластика на 1/3 длины в центральной части в нижней зоне.

Вариант 4. Балка с дефектом в верхней зоне в середине пролета.

Вариант 5. Балка с дефектом в верхней зоне, заполненным эпоксидной смолой, усиленная пластиной из углепластика на 1/3 длины в центральной части в верхней зоне.

Вариант 6. Балка с дефектами в верхней и нижней зонах в центре пролета.

Вариант 7. Балка с дефектами в обеих зонах, заполненными эпоксидной смолой, усиленная пластинами из углепластика с двух сторон.

Расчетные схемы представлены на рис. 1.

Параметры материалов и граничные условия

Для моделирования принимались усредненные значения на основе существующих данных [8–10], которые в дальнейшем будут уточняться в ходе испытаний.

Древесина:

– Модуль упругости вдоль волокон $E_x = 10$ ГПа, поперек волокон $E_y = 300$ МПа, в радиальном направлении $E_z = 300$ МПа. Коэффициенты Пуассона: $\nu_{xy} = 0,3$; $\nu_{yz} = 0,3$; $\nu_{xz} = 0,5$. Модули сдвига: $G_{xy} = 600$ МПа, $G_{yz} = 600$ МПа, $G_{xz} = 50$ МПа.

– Учет нелинейный характер деформаций при приближении нагрузки к предельным значениям [11].

Углепластик:

– Модуль упругости $E = 230$ ГПа.

Эпоксидная смола:

– Модуль упругости $E = 3,8$ ГПа.

Балка закреплена по схеме «шарнир – шарнир». Нагрузка представлена двумя сосредоточенными силами по 8700 Н, приложенными на расстоянии 400 и 800 мм от левой опоры.

Для учета совместной работы пластины из углеволокна, эпоксидной смолы и древесины выбран тип контактной поверхности – bonded, который позволяет смоделировать работу склеенных между собой элементов.

Программное обеспечение

Численное моделирование выполнено в ANSYS с учетом физической нелинейности древесины.

Результаты моделирования

Для каждого из семи вариантов были определены следующие параметры:

- деформация по оси Y (мм);
- нормальные напряжения (МПа) для сжатия и растяжения;
- пластические деформации (%).

Полученные результаты показывают, что наибольшие деформации наблюдаются в балках с дефектами без усиления, тогда как применение углепластиковых пластин значительно снижает прогиб и перераспределяет напряжения. Вариант 7 (комбинированное усиление обеих зон) продемонстрировал оптимальные показатели по снижению как деформаций,

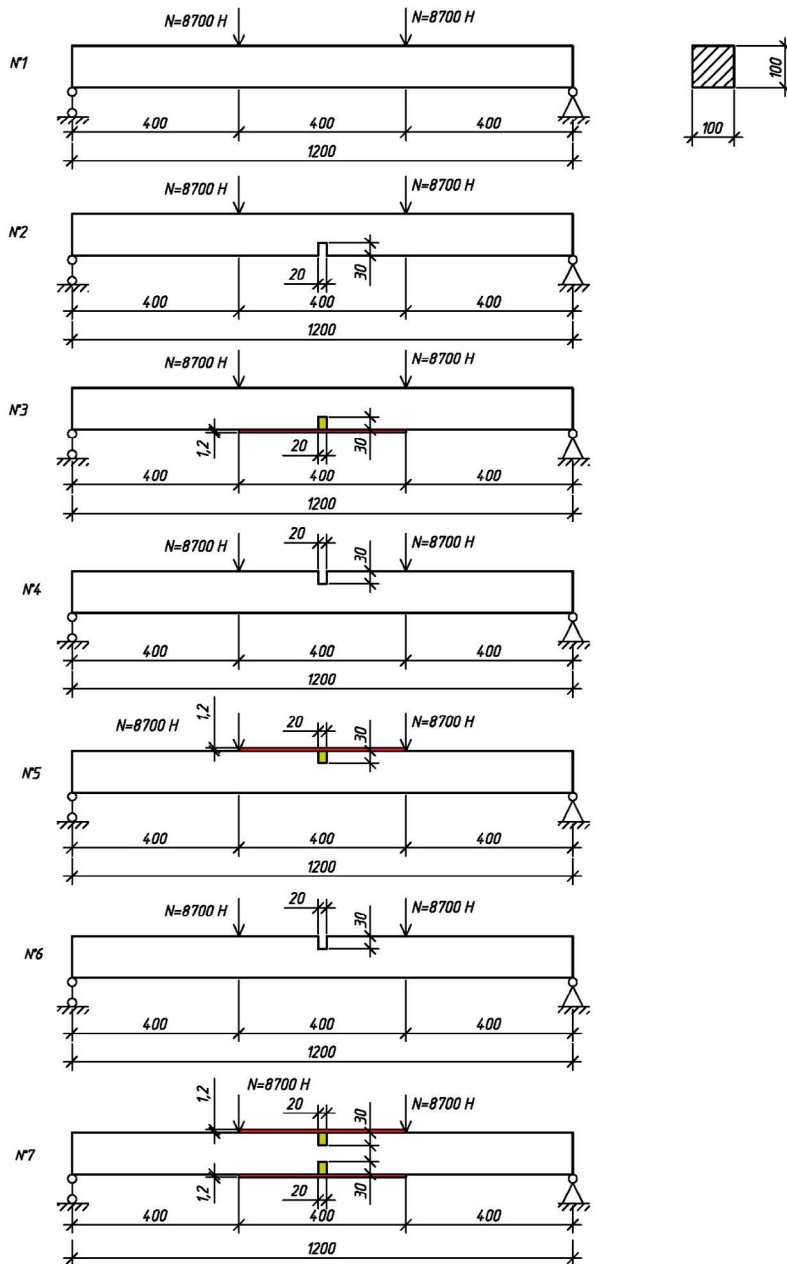


Рис. 1. Расчетные схемы

Fig. 1. Calculation diagrams

так и напряжений. Рис. 2–8 иллюстрируют расчетные схемы и характер распределения напряженно-деформированного состояния для каждого из вариантов.

В табл. 1 представлены результаты численного моделирования для семи вариантов конструкции балки.

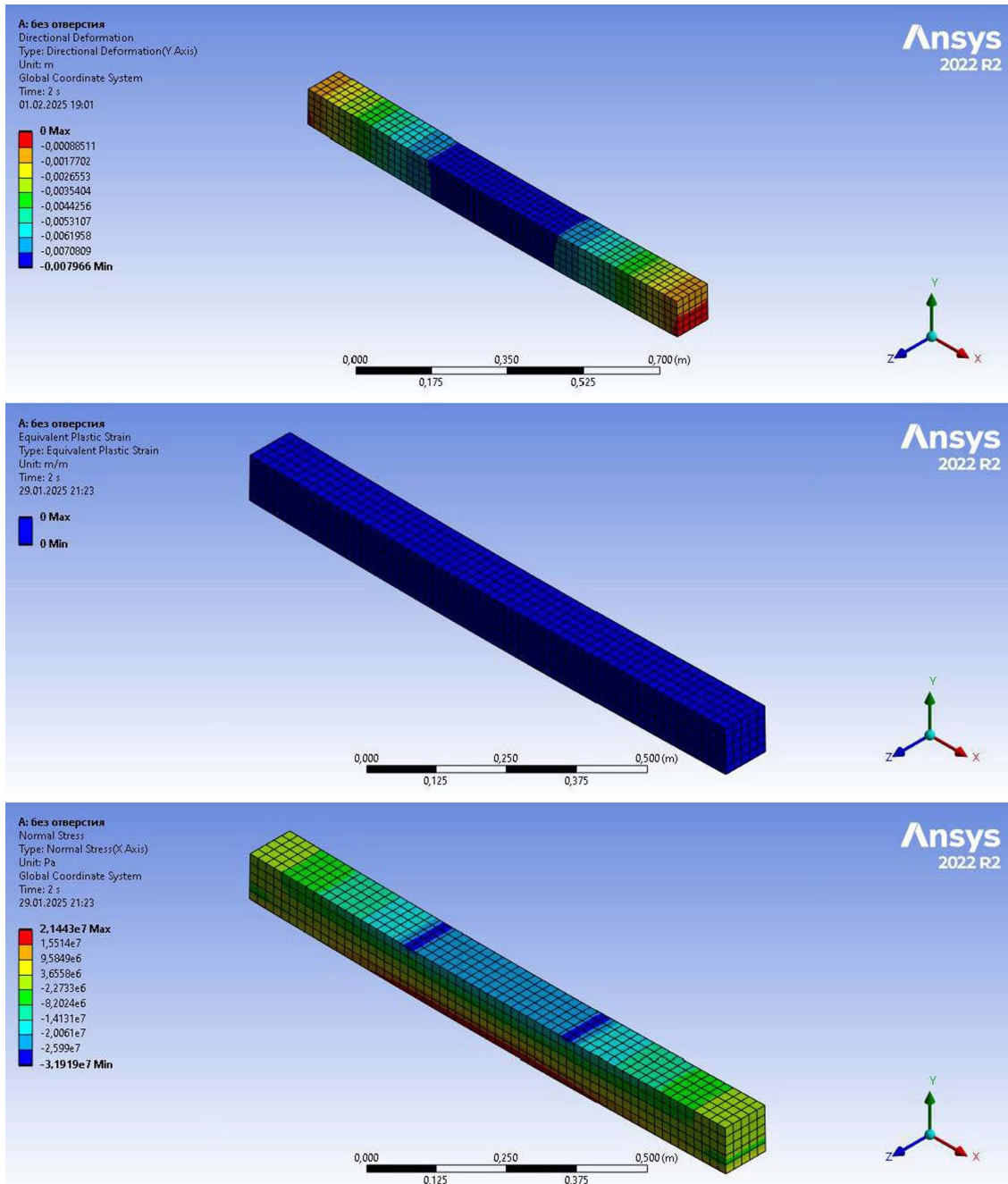


Рис. 2. Вариант 1. Контрольная балка без дефектов
Fig. 2. Option 1. Control beam without defects

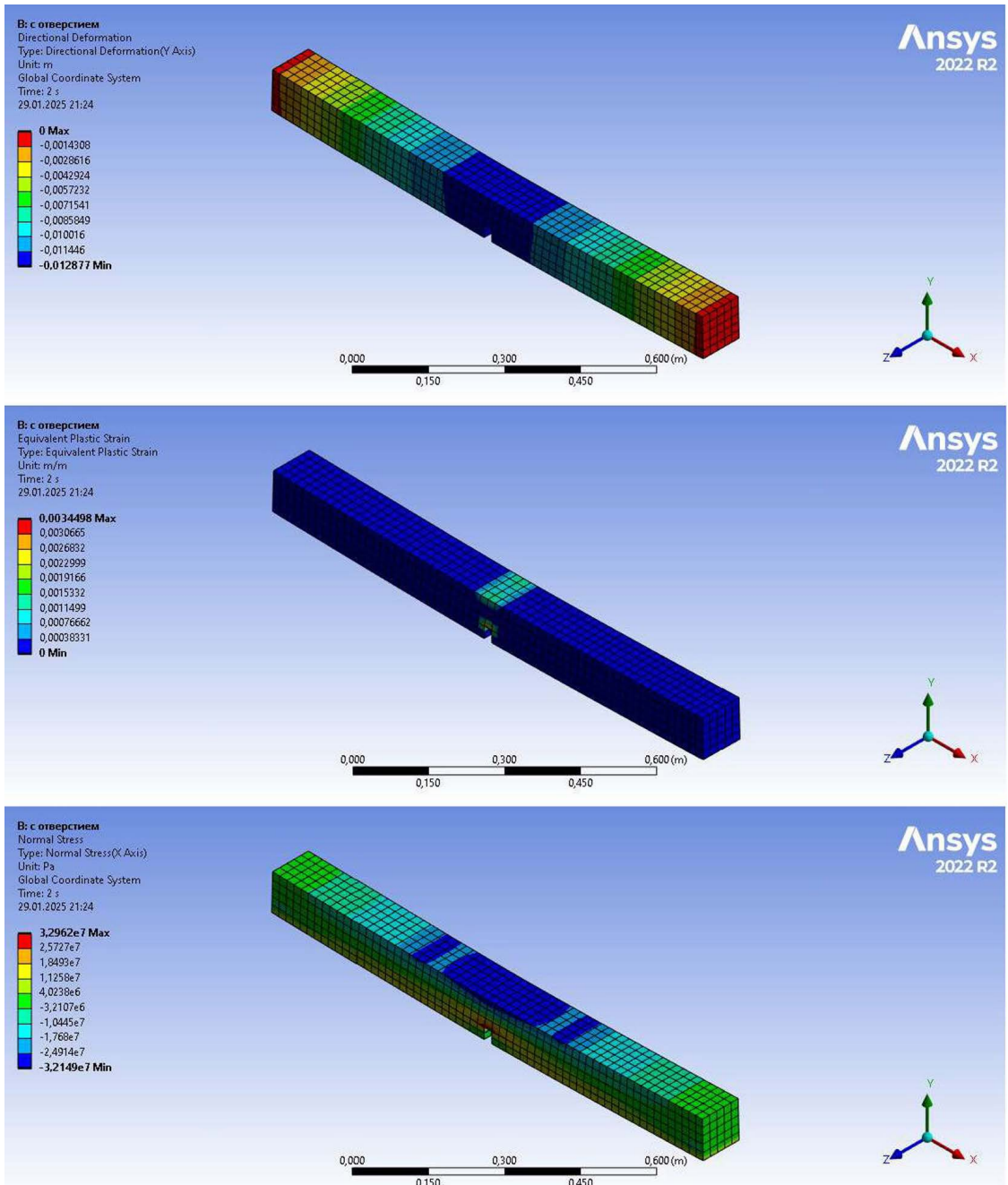


Рис. 3. Вариант 2. Балка с дефектом в нижней зоне в середине пролета
 Fig. 3. Option 2. Beam with a defect in the lower zone in the middle of the span

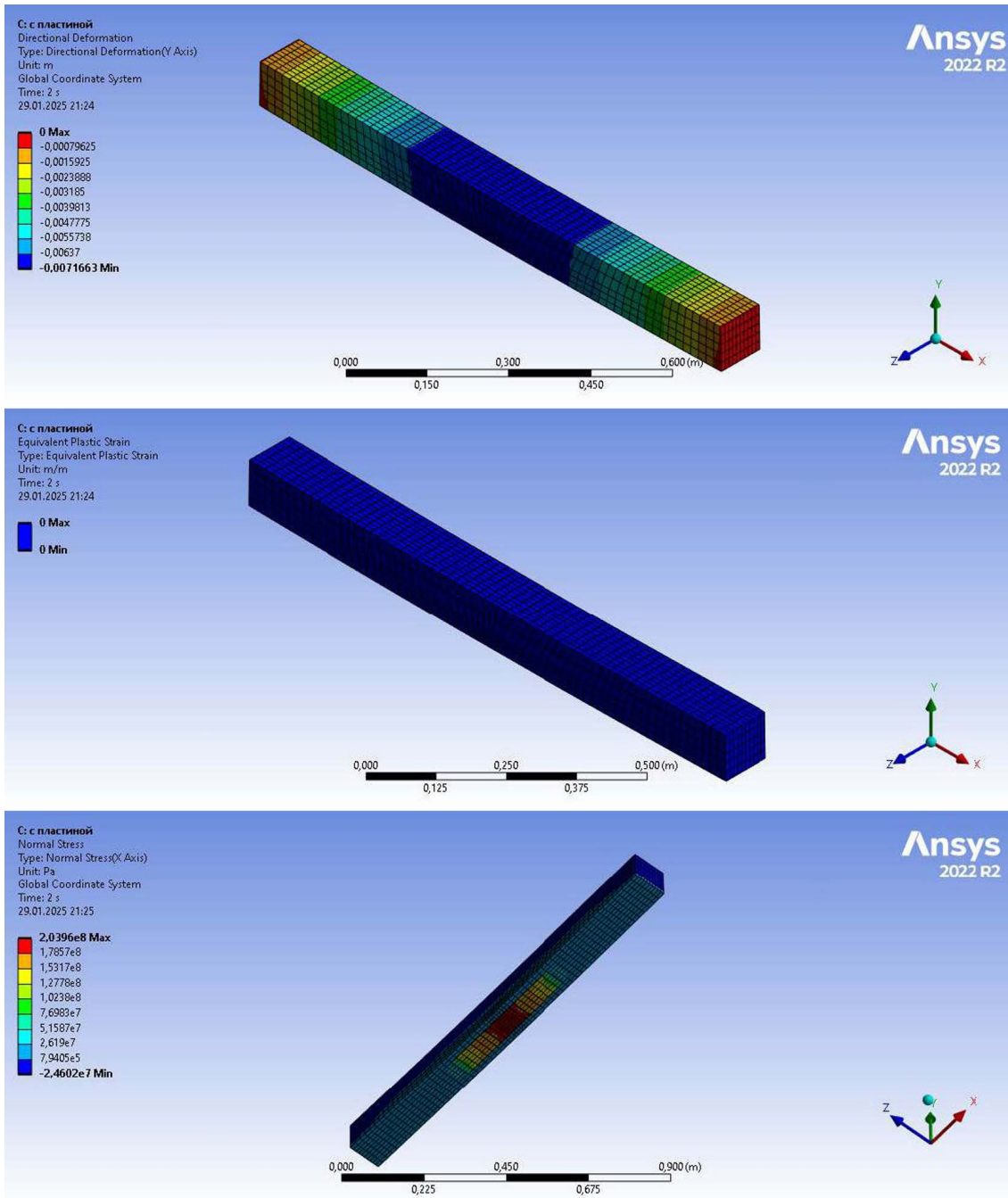


Рис. 4. Вариант 3. Балка с дефектом в нижней зоне, заполненным эпоксидной смолой, усиленная пластиной из углепластика на 1/3 длины в центральной части в нижней зоне

Fig. 4. Option 3. Beam with a lower area defect filled with epoxy resin, which is reinforced with a carbon fiber plate covering 1/3 of the length in the central part of the lower area

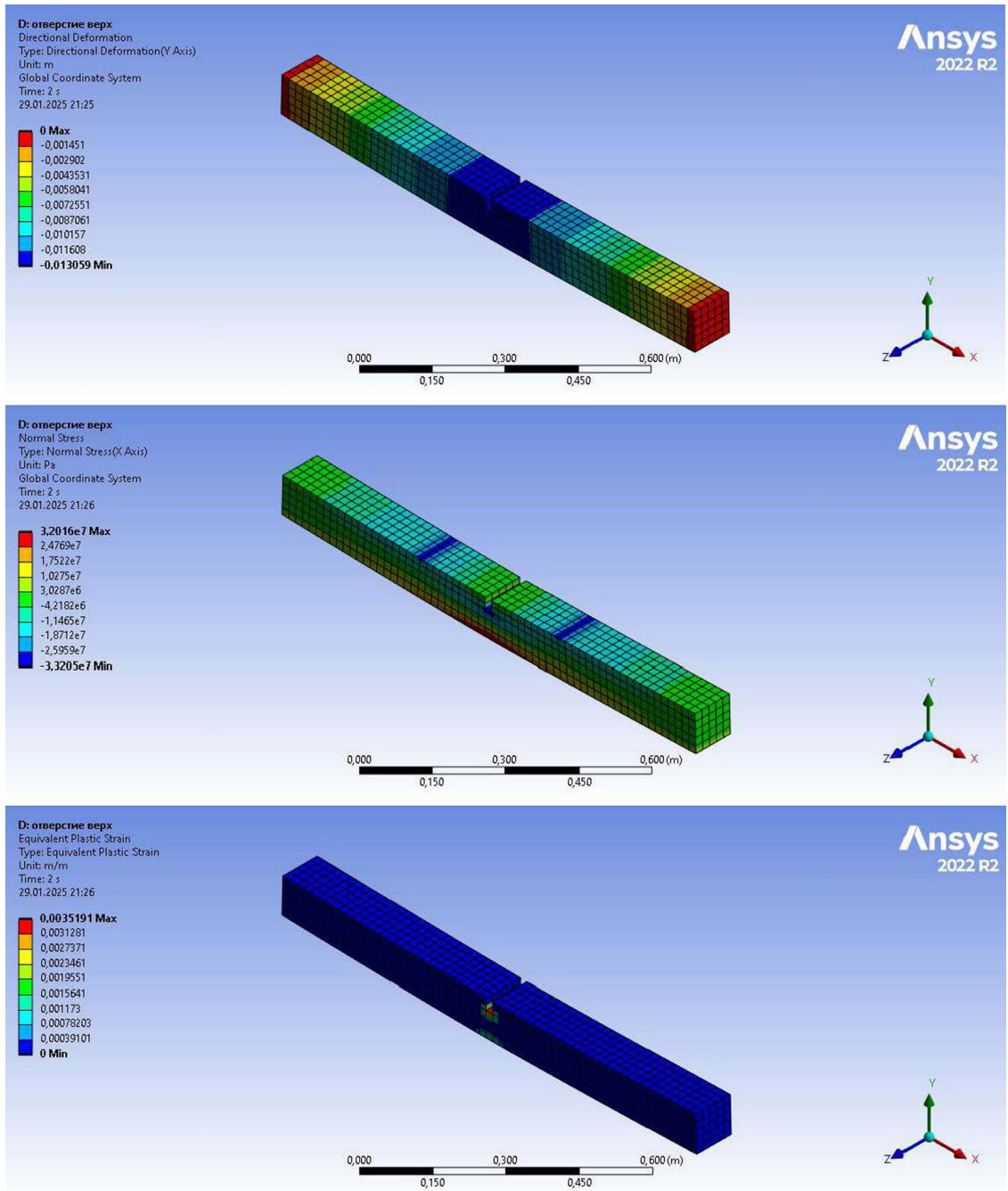


Рис. 5. Вариант 4. Балка с дефектом в верхней зоне в середине пролета
Fig. 5. Option 4. Beam with a defect in the upper area in the middle of the span

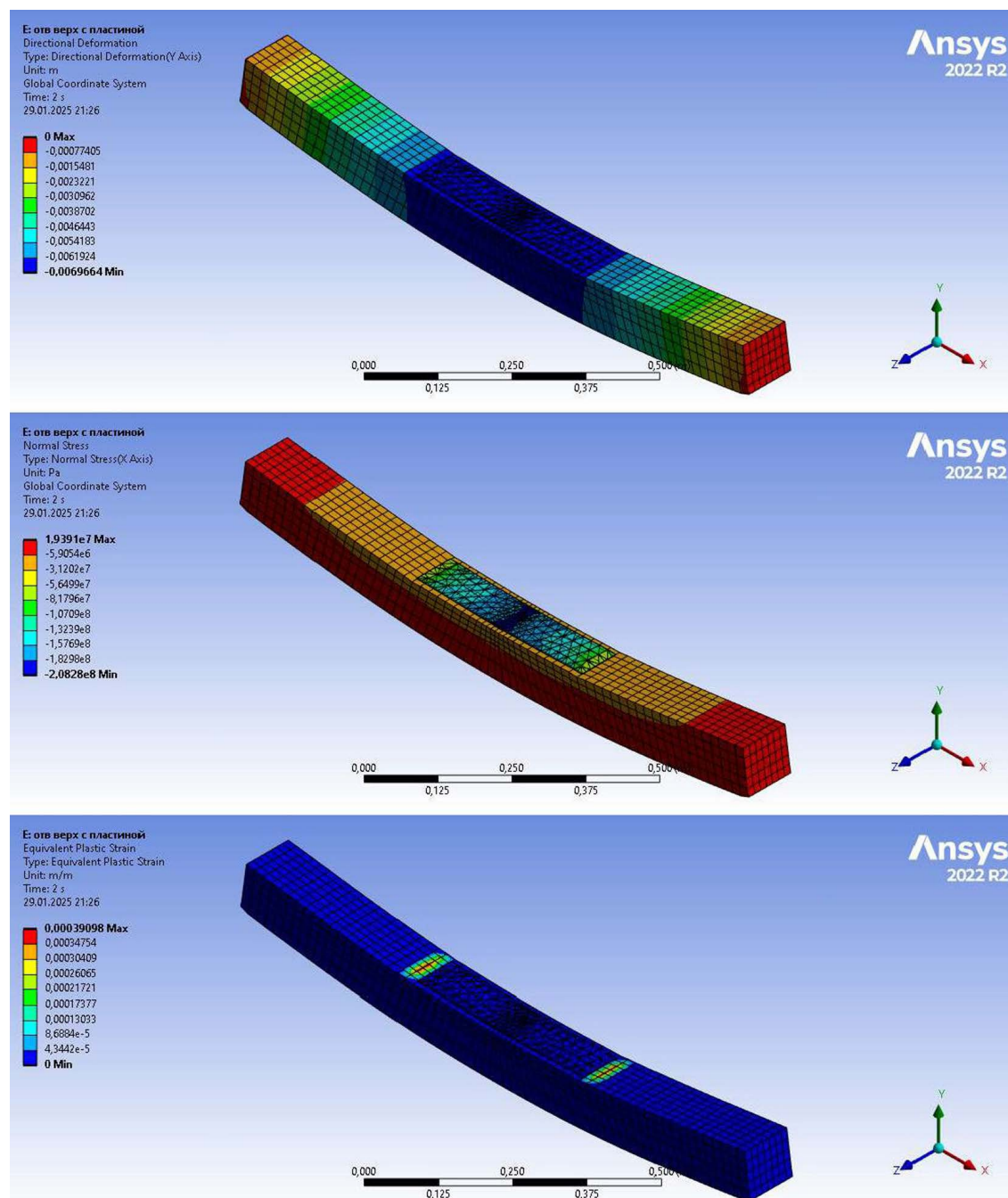


Рис. 6. Вариант 5. Балка с дефектом в верхней зоне, заполненным эпоксидной смолой, усиленная пластиной из углепластика на 1/3 длины в центральной части в верхней зоне
Fig. 6. Option 5. Beam with an upper area defect filled with epoxy resin, which is reinforced with a carbon fiber plate covering 1/3 of the length in the central part of the upper area

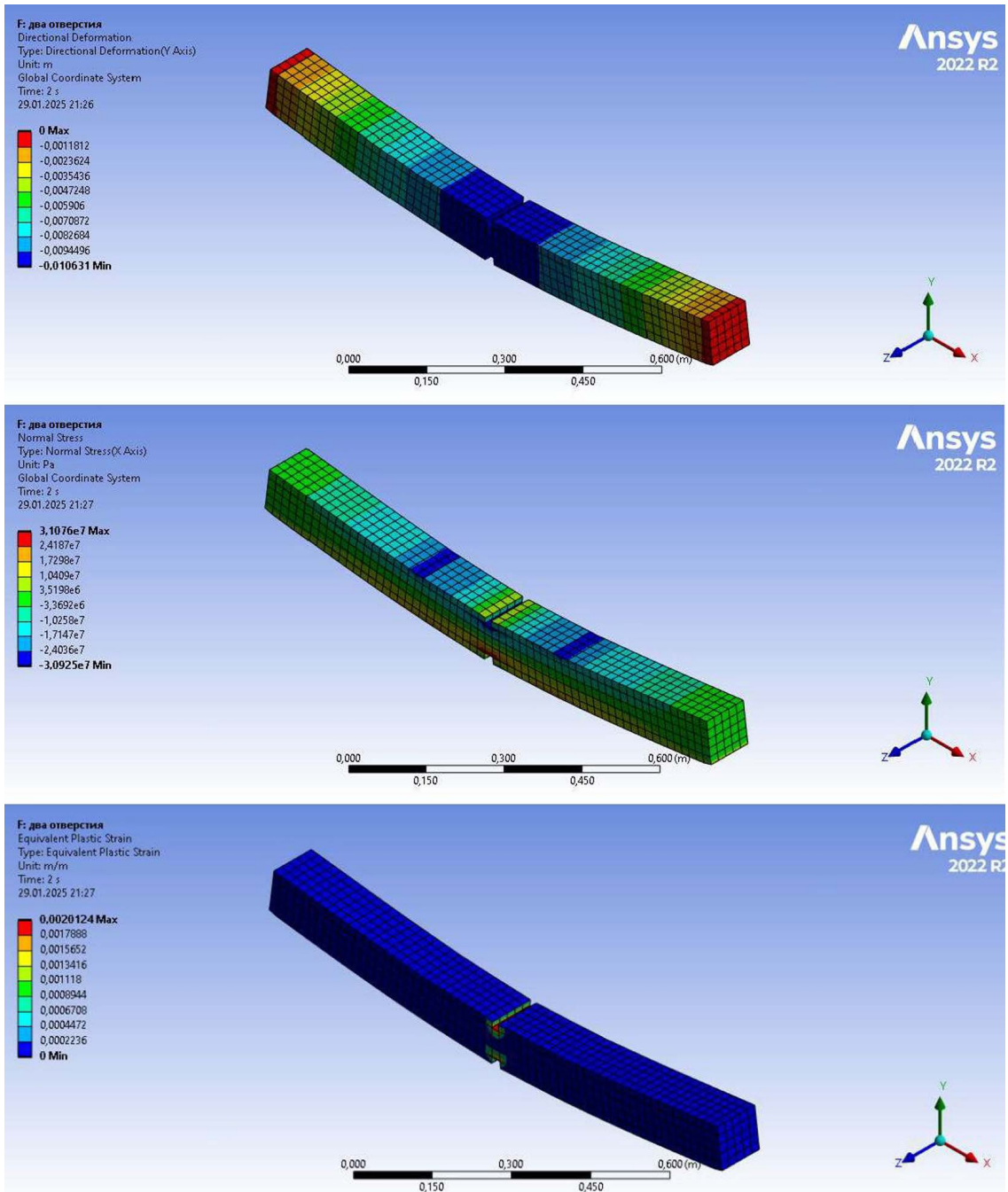


Рис. 7. Вариант 6. Балка с дефектами в верхней и нижней зонах в центре пролета
Fig. 7. Option 6. Beam with defects in the upper and lower areas in the center of the span

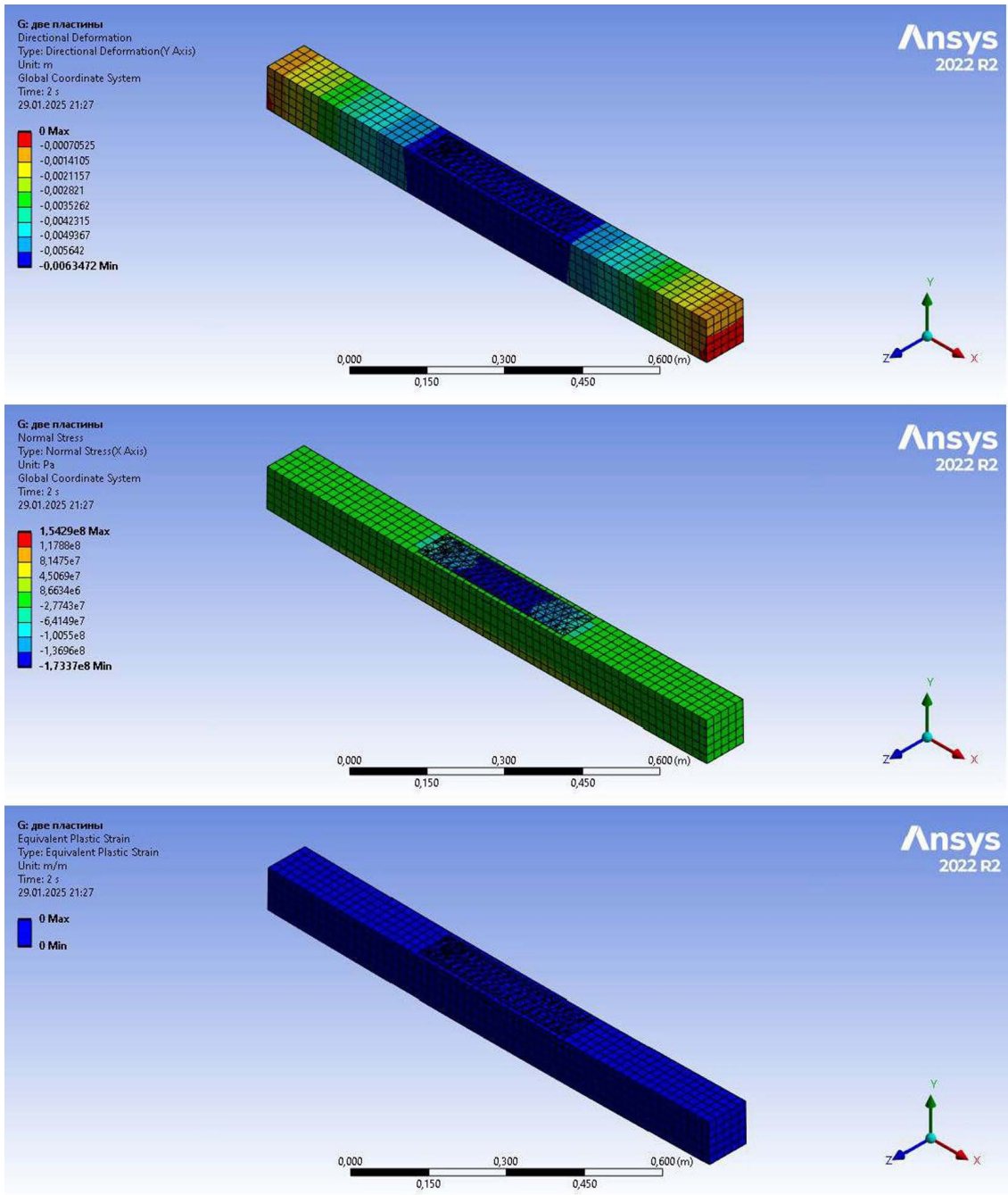


Рис. 8. Вариант 7. Балка с дефектами в обеих зонах, заполненными эпоксидной смолой, усиленная пластинами из углепластика с двух сторон
Fig. 8. Option 7. Beam with the defects in both zones, filled with epoxy resin, reinforced with carbon fiber plates on both sides

Таблица 1

Результаты моделирования

Table 1

Modeling results

Параметр	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
Деформации по оси Y (мм)	7,966	12,877	7,1663	13,059	6,966	10,631	6,3472
Нормальные напряжения (МПа)							
– Сжатие	31,92	32,149	24,6	33,205	27,729	30,93	29,303
– Растяжение	21,44	32,962	28,506	32,016	19,391	31,076	24,352
Пластические деформации, %	0	0,35	0	0,35	0,039	0,2	0

Анализ данных

1. Деформации по оси Y (мм):

- Наибольшие деформации наблюдаются в вариантах № 2 (12,877 мм) и № 4 (13,059 мм), что связано с наличием дефектов в нижней и верхней зонах соответственно.
- Наименьшие деформации зафиксированы в вариантах № 5 (6,966 мм) и № 7 (6,3472 мм), где применено усиление углепластиковыми пластинами. Это подтверждает эффективность усиления для снижения прогибов.

2. Нормальные напряжения (МПа):

- Наибольшие напряжения сжатия наблюдаются в варианте № 4 (33,205 МПа), что связано с дефектом в верхней зоне.
- Наибольшие напряжения растяжения зафиксированы в варианте № 2 (32,962 МПа) и № 4 (32,016 МПа), что также связано с наличием дефектов.
- В вариантах с усилением (№ 3, 5 и 7) напряжения сжатия и растяжения снижены, что свидетельствует о перераспределении нагрузок благодаря углепластиковым пластинам.

3. Пластические деформации (%):

- Пластические деформации наблюдаются в вариантах № 2 (0,35 %), № 4 (0,35 %) и № 6 (0,2 %), что указывает на локальное разрушение древесины в зонах дефектов.
- В вариантах с усилением (№ 3, 5 и 7) пластические деформации отсутствуют или минимальны, что подтверждает эффективность применения углепластика для предотвращения разрушения.

Обсуждение результатов

Анализ результатов моделирования свидетельствует о том, что применение пластин из углепластика в сочетании с эпоксидной смолой позволяет существенно уменьшить локальные напряжения и деформации в зонах дефектов. Варианты с усилением показывают перераспределение напряжений, что препятствует возникновению пластических деформаций и предотвращает разрушение конструкции. Особенно эффективным является комбинированное усиление (вариант 7), при котором наблюдаются минимальные значения деформаций и отсутствуют пластические деформации. Эти результаты подтверждают

перспективность использования композитных материалов для восстановления и усиления деревянных конструкций.

Перспективы и направления дальнейших исследований

Дальнейшие исследования должны быть направлены на:

- экспериментальную проверку численных результатов;
- оптимизацию геометрических параметров углепластиковых пластин;
- детальное исследование влияния различных типов дефектов на эффективность усиления;
- разработку рекомендаций и нормативных документов по применению композитных материалов в реконструкции деревянных конструкций.

Заключение

Проведенное исследование подтверждает высокую эффективность применения пластин из углепластика для усиления деревянных балок с дефектами. Учет нелинейного поведения древесины при приближении к предельным нагрузкам позволяет более точно оценить распределение напряженно-деформированного состояния, а комбинированное использование углепластика и эпоксидной смолы обеспечивает значительное снижение деформаций и предотвращает локальные разрушения. Результаты моделирования открывают перспективы для дальнейших экспериментальных исследований и практического применения разработанных методик в реконструкции, реставрации и модернизации деревянных конструкций.

Список литературы

1. Рощина С.И., Сергеев М.С., Лукина А.В., Лисятников М.С. Исследование деревокомпозитных конструкций с применением эпоксидных олигомеров модифицированных углеродными нанотрубками. Научно-технический вестник Поволжья. 2013;(2):189–192.
2. Лобов Д.М., Крицин А.В., Тихонов А.В. Особенности армирования деревянных элементов, усиленных углеродным волокном, при статическом изгибе. Известия КГАСУ. 2013;(2):132–138.
3. Klyuev S., Lobov D. External Reinforcement of Wooden Beam Structures with Carbon Fiber Composite Materials. Construction of Unique Buildings and Structures. 2023;109:10911.
4. Rescalvo F.J., Valverde-Palacios I., Suarez E., Gallego A. Experimental and analytical analysis for bending load capacity of old timber beams with defects when reinforced with carbon fiber strips. Composite Structures. 2018;186:29–38. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.078>.
5. Brol J., Wdowiak-Postulak A. Old timber reinforcement with FRPs. Materials. 2019;12(24):4197. <https://doi.org/10.3390/ma12244197>.
6. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. Москва: ДМК; 2005.
7. ANSYS 2022/R2. Workbench User's Guide. Southpointe: ANSYS, Inc.; 2022. Available at: https://moodle.umontpellier.fr/pluginfile.php/1850414/mod_resource/content/0/Workbench_Users_Guide.pdf.
8. Ашкенази Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов. Москва: Лесная промышленность; 1978.
9. ТУ 23.99.14-041-38276489-2017. Технические условия на углепластиковые материалы. Москва; 2017.
10. Epoxy resin. DesignerData [internet]. Available at: <https://designerdata.nl/materials/plastics/thermo-sets/epoxy-resin> (дата обращения: 16.03.2025).
11. Пятикрестовский К.П., Травуш В.И. О программировании нелинейного метода расчета деревянных конструкций. Academia. Архитектура и строительство. 2015;(2):115–119.

References

1. *Roshchina S.I., Sergeev M.S., Lukina A.V., Lisyatnikov M.S.* Study of wood composite structures using epoxy oligomers modified with carbon nanotubes. Scientific and Technical Volga region Bulletin. 2013;(2):189–192. (In Russian).
2. *Lobov D.M., Kritsin A.V., Tikhonov A.V.* Features of reinforcement of wooden elements reinforced with carbon fiber under static bending. News KSUAE. 2013;(2):132–138. (In Russian).
3. *Klyuev S., Lobov D.* External Reinforcement of Wooden Beam Structures with Carbon Fiber Composite Materials. Construction of Unique Buildings and Structures. 2023;109:10911.
4. *Rescalvo F.J., Valverde-Palacios I., Suarez E., Gallego A.* Experimental and analytical analysis for bending load capacity of old timber beams with defects when reinforced with carbon fiber strips. Composite Structures. 2018;186:29–38. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.11.078>.
5. *Brol J., Wdowiak-Postulak A.* Old timber reinforcement with FRPs. Materials. 2019;12(24):4197. <https://doi.org/10.3390/ma12244197>.
6. *Basov K.A.* ANSYS: user's guide. Moscow: DMK Publ.; 2005. (In Russian).
7. ANSYS 2022/R2. Workbench User's Guide. Southpointe: ANSYS, Inc.; 2022. Available at: https://moodle.umontpellier.fr/pluginfile.php/1850414/mod_resource/content/0/Workbench_Users_Guide.pdf.
8. *Ashkenazi E.K.* Anisotropy of wood and wood materials. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ.; 1978. (In Russian).
9. TU 23.99.14-041-38276489-2017. Technical conditions for carbon fiber materials. Moscow; 2017. (In Russian).
10. Epoxy resin. DesignerData [internet]. Available at: <https://designerdata.nl/materials/plastics/thermo-sets/epoxy-resin> [accessed 16 March 2025].
11. *Pyatikrestovsky K.P., Travush V.I.* On programming a nonlinear method for calculating wooden structures. Academia. Architecture and Construction. 2015;(2):115–119. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Максим Васильевич Арискин, канд. техн. наук, доцент кафедры строительных конструкций, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

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

Maxim V. Ariskin, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Building Structures, Penza State University of Architecture and Construction, Penza

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

Кирилл Алексеевич Овчинников[✉], аспирант кафедры строительных конструкций, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

e-mail: kirillovchinnikov25@gmail.com

Kirill A. Ovchinnikov[✉], Postgraduate Student, Department of Building Structures, Penza State University of Architecture and Construction, Penza

e-mail: kirillovchinnikov25@gmail.com

Николай Владимирович Князев, аспирант кафедры строительных конструкций, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

e-mail: schedou2306@mail.ru

Nikolay V. Knyazev, Postgraduate Student, Department of Building Structures, Penza State University of Architecture and Construction, Penza

e-mail: schedou2306@mail.ru

[✉]Автор, ответственный за переписку / Corresponding author