



Research Article

Received: July 26, 2023

Accepted: August 26, 2023

Published: September 12, 2023

ISSN 2304-6295

# External Reinforcement of Wooden Beam Structures with Carbon Fiber Composite Materials

Klyuev, Sergey Vasil'yevich<sup>1</sup>   
Lobov, Dmitry Mikhaylovich<sup>1, 2\*</sup> 

<sup>1</sup> Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov, Belgorod, Russian Federation; klyuyev@yandex.ru

<sup>2</sup> Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russian Federation; d.m.lobov@yandex.ru

Correspondence:\* email [d.m.lobov@yandex.ru](mailto:d.m.lobov@yandex.ru); contact phone [+79108707796](tel:+79108707796)

## Keywords:

Carbon Fiber; Carbon Composite Materials; Strengthening of Wooden Structures; External Reinforcement of Wooden Beams

## Abstract:

**The object of the study** is wooden beam structures strengthened by external reinforcement of composite materials based on carbon fiber. This work aims to analyze the distribution of axial strains along the height of the cross-section of a strengthened wooden beam. **Method.** As part of the experimental study, models of wooden beams strengthened with composite material were tested for static bending. The axial strains of the wooden beam were measured using strain gauges at each loading stage during the testing process. The theoretical values of axial strains at different points along the height of the cross-section were calculated. The cross-sectional characteristics of a reinforced wooden beam were determined for a composite section made of other modulus materials using the reduced section method. **Results.** The dependence of the change of the strength of wooden beam structures when varying both the parameters of the cross-section geometry and the parameters of external reinforcement is obtained. Diagrams of axial strains at different points along the height of the cross-section were constructed at each stage of sample loading based on the results of the obtained experimental data. The strength increase using the reinforcement system is assessed based on the analysis of tests of reinforced wooden beams and control samples that are not subject to reinforcement. A comparison of the theoretical and experimental values of axial strains of wooden beam structures strengthened by external reinforcement of composite materials based on carbon fiber has been made.

## 1 Introduction

Применение композитного материала в качестве элемента внешнего армирования находит большое распространение при усилении строительных конструкций. В настоящее время системы внешнего армирования композитными материалами активно используются с целью усиления или восстановления несущей способности бетонных, железобетонных и каменных конструкций зданий и сооружений.

При усилении изгибаемых элементов система внешнего армирования из композитного материала располагается преимущественно в растянутой зоне и выполняет роль дополнительного армирования. При усилении сжатых элементов система внешнего армирования выполняет роль обоймы. Анализ и дальнейшее совершенствование методов расчета железобетонных конструкций, усиленных системами внешнего армирования, представлен в работах [1]-[3]. В работах [4], [5] рассматриваются вопросы применения системы внешнего армирования при усилении бетонных элементов, в работе [6], [7] результаты исследований усиления каменных конструкций. В работах рассматриваются методы расчета, позволяющие

Klyuev S.; Lobov D.

External Reinforcement of Wooden Beam Structures with Carbon Fiber Composite Materials; 2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **109** Article No 10911. doi: 10.4123/CUBS.109.11



выполнить учет начального напряженно-деформированного состояния усиливаемых конструкций, учет фактических нагрузок, деформаций, прогибов, дефектов, имеющих на момент выполнения работ по усилению конструкций. Результаты научных исследований легли в основу разработки нормативных документов и практических рекомендаций по проектированию и расчету распространяющийся на системы усиления внешнего армирования железобетонных и каменных конструкций зданий и сооружений различного назначения. Нормативных документов, распространяющихся на усиление этим методом деревянных конструкций, на данный момент нет. Таким образом, одна из возможных областей применения метода усиления деревянных конструкций, охватывающая как давно известные, так и перспективные большепролетные клееные деревянные конструкции, на данный момент не отражена в нормативных документах, остается до конца не изученной и является актуальным научным направлением.

На сегодняшний день исследования в области усиления деревянных конструкций ведутся по нескольким направлениям:

1. Усиление деревянных элементов путем армирования с применением стальной арматуры. В работах [8]-[12] рассматриваются вопросы совместной работы деревянных элементов со стальной арматурой, исследуется напряженно-деформированное состояние деревянных балок усиленных балок. Приводятся результаты численного и экспериментального исследования, осуществляется сравнение полученных экспериментальных данных с результатами теоретических расчетов.

2. В работах [13], [14] исследуется напряженно-деформированное состояние композитного сечения деревянных ребер с обшивками. Приводится методика и результаты исследования критической силы для деревянных ребер, работающих в составе стеновых панелей или объемных модулей совместно с обшивками.

3. Исследования, направленные на изучение деревянных изгибаемых элементов, усиленных композитным материалом на действие нормальных напряжений. В работе [15] было проведено изучение потенциала использования полимерных материалов армированными разнонаправленными волокнами (FRP) в качестве усиления деревянных клеёных балок на воздействие динамических нагрузок. В результате исследования было выявлено, что использование композитных материалов в качестве элементов усиления способствовало значительному повышению несущей способности. Также использование двунаправленных стекловолоконных тканей способствовало локальному усилению деревянных элементов в местах повреждений, расположения дефектов, что позволяло отсрочить выход из строя усиленного образца. По результатам исследования было отмечено, что ткани из стекловолокна способствуют увеличению предельной деформации разрушения древесины на растяжение. В работах [16]-[20] рассматривается аналитическое и экспериментальное исследование деревянных клеёных балок на изгиб, усиленных полимерными материалами в виде стержней, ламелей, тканых материалов. Представлены результаты несущей способности деревянных балок, усиленных композитными материалами на действие нормальных напряжений, получены диаграммы зависимости прогиба от действующей нагрузки. В работах [21]-[23] рассматриваются вопросы усиление деревянных балочных конструкций композитными материалами применительно к конструкциям мостовых сооружений.

4. Исследования, направленные на изучение составных деревянных элементов, объединенные совместной работой соединением из композитного материала. Данные исследования направлены, как на применение композитного материала при изготовлении деревянных элементов составного сечения по высоте, с размещением композитного материала в шве сплачивания, результаты представлены в работах [24]-[26], так и на усиление деревянных изгибаемых элементов на действие касательных напряжений с размещением композитного материала в виде обоймы по боковой поверхности в приопорной зоне деревянной балки, результаты представлены в работах [27]-[29].

Данная работа посвящена вопросам применения композитных материалов на основе углеродного волокна при усилении деревянных балочных конструкций. Исследованию подлежали модели деревянных балок, подверженные действию статического изгибающего момента. Усиление деревянных балок осуществлялось на действие нормальных напряжений с размещением композитного материала в растянутой зоне поперечного сечения. Целью исследования является выполнить дальнейшее совершенствование методов расчета деревянных балок, усиленных композитным материалом.

## 2 Materials and Methods

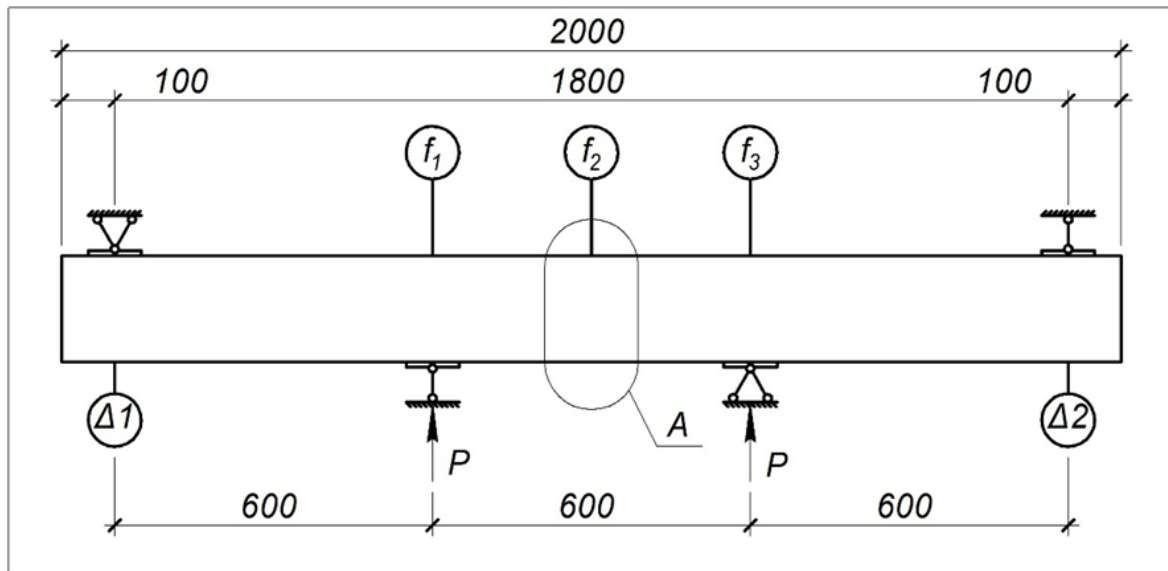
В рамках проводимого исследования было осуществлено планирование многофакторного эксперимента. По результатам были подобраны параметры для испытаний пяти серий балок, каждая серия состояла из трех образцов. При назначении размеров моделям балок использовался принцип подобия реальным конструкциям. При изменении соотношения высоты балки к пролету наблюдается переход от разрушения в пролете от действия нормальных напряжений к разрушению на опоре от действия касательных разрушений. Для оценки возможности применения системы усиления внешнего армирования композитным материалом при усилении деревянных балок на действие изгибающего момента одним из варьируемых параметров выступало соотношение высоты балок к пролету. С целью анализа распределения как осевых деформаций, так и нормальных напряжений по высоте поперечного сечения балок осуществлялось варьированием параметрами соотношения высоты балки к пролету в диапазоне значений от 1 / 12 до 1 / 18. При увеличении процента армирования композитным материалом деревянных балок происходит увеличение их прочности и жесткости. С целью построения зависимости изменения прочности на действие нормальных напряжений от параметров внешнего армирования осуществлялось варьированием коэффициентом армирования композитным материалом в диапазоне значений от 0.90 до 2.30 %. Серии балок, подлежащих испытанию, состояли из усиленных образцов и контрольных балок, не подлежащих усилению. Геометрические параметры образцов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Геометрические параметры образцов  
Table 1. Geometric parameters of the samples

Серия / Series	Геометрические размеры, мм / Geometric dimensions, mm			Отношение, h/l / Ratio, h/l	Кол-во слоев усиления / Number of reinforcement layers	Коэффициент армирования, $\mu$ , % / Reinforcement coefficient $\mu$ , %
	b	h	l			
B1	50	150	1800	1/12	2 слоя / 2 layers	1.87
B2	40	100	1800	1/18	1 слой / 1 layer	1.40
B3	50	150	1800	1/12	1 слой / 1 layer	0.93
B4	50	125	1800	1/14.4	1 слой / 1 layer	1.12
B5	50	125	1800	1/14.4	2 слоя / 2 layers	2.24

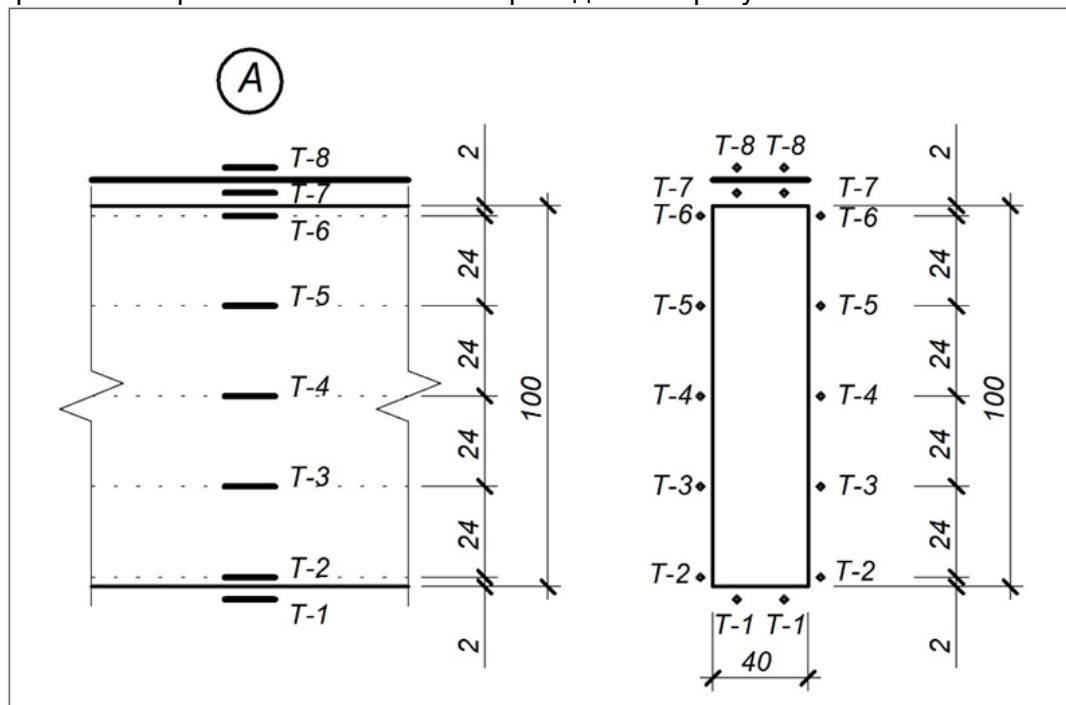
Для изготовления образцов использовались доски из цельной древесины сосны с влажностью 10–12%. Измерение влажности осуществлялось игольчатым электровлагомером марки ИВ-1-1 (производитель ФГУП "НИИ Новатор с Опытным заводом", Мирный, Архангельская область, Россия). В качестве элемента усиления внешнего армирования использовались ламели марки MBrace® Lam (химический концерн BASF, Людвигсхафен, Германия) на основе углеродных волокон приклеиваемые к нижней растянутой грани деревянного элемента с использованием двухкомпонентного клея марки Mbrace® Laminate Adhesive (химический концерн BASF, Людвигсхафен, Германия) на эпоксидной основе.

В качестве расчетной схемы испытаний была принята однопролетная шарнирно опертая балка. С целью получения корректных значений осевых деформаций поперечного сечения в середине пролета балки была принята двучечная схема приложения нагрузки для создания на участке измерения деформаций зоны чистого изгиба. Испытание моделей деревянных балок проводилось на универсальной испытательной машине марки УИМ-50 (производитель "WERKSTOFFPRUFMASCHINEN", Лейпциг, Германия) с приложением нагрузки снизу-вверх. Усилие, создаваемое силовым цилиндром испытательной машины, посредством стальной траверсы перераспределялось на балку в две точки, расположенные в третях пролета. Значение прикладываемой нагрузки на образец, в процессе проведения испытаний, фиксировалось по шкале силоизмерителя испытательной машины. Нагрузка на образцы прикладывалась ступенями, время загрузки на каждой ступени принято равным 1 минуте, время выдерживания под нагрузкой на каждой ступени составляло 5 минут. Схема испытательного стенда приведена на рисунке 1.



**Рис. 1 – Схема испытательного стенда деревянных балок**  
**Fig. 1 - Scheme of a setup for testing of wooden beams**

На каждой ступени действия нагрузки производилось измерение осевых деформаций по высоте поперечного сечения в восьми точках с использованием средств тензометрии. Тензорезисторы марки PL-60–11 (производитель Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd, Токио, Япония) приклеивались на боковую поверхность балки в середине пролета в зоне максимального изгибающего момента. В качестве регистрирующего устройства использовалась тензостанция марки ZET 017-T8 (производитель ООО “ЭТМС”, Москва, Россия), при проведении испытания тензорезисторы подключались через мост Уитсона по полумостовой схеме. При выполнении измерений тензорезисторы расположенные на одном уровне по высоте противоположных граней объединялись в один регистрирующий канал. Расположение тензорезисторов на поперечном сечении балки приведены на рисунке 2.



**Рис. 2 – Схема расположения тензорезисторов по высоте поперечного сечения балки**  
**Fig. 2 - Scheme of location of strain gauges along the height of the cross section of the beam**

Значения экспериментальных осевых деформаций полученных по результатам испытаний сравнивались с теоретическими значениями, рассчитанными по методу приведенного сечения.



Метод приведенного сечения применялся при расчете армированных деревянных конструкций со стальной арматурой и описан в работах [14-17, 30].

Изгибающий момент действующий в поперечном сечении для случая чистого изгиба двухслойной балки определяется по формуле:

$$M = \int_{F_1} \sigma_1 \cdot y \cdot dF + \int_{F_2} \sigma_2 \cdot y \cdot dF \quad (1)$$

Выполнив преобразования, получаем уравнение:

$$M = \frac{E_1 \cdot J_1 + E_2 \cdot J_2}{\rho} \quad (2)$$

Радиус кривизны балки:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{E_1 \cdot J_1 + E_2 \cdot J_2} \quad (3)$$

Значения осевых деформаций выражаются из зависимости гипотезы плоских сечений:

$$\varepsilon = \frac{y}{\rho} \quad (4)$$

Положение приведенного центра тяжести определяется по формуле:

$$y_c = \frac{E_1 \cdot S_1 + E_2 \cdot S_2}{E_1 \cdot F_1 + E_2 \cdot F_2} \quad (5)$$

По результатам выполнения расчетов были получены значения теоретических осевых деформаций поперечного сечения деревянных балок, усиленных композитным материалом на основе углеродного волокна. При выполнении расчетов в качестве модуля упругости композитного материала принималось значение, полученное на основании стандартных испытаний образцов композитного материала на растяжение. В качестве модуля упругости древесины принималось значение на изгиб, полученное по результатам испытаний контрольных не усиленных балок.

### 3 Results and Discussion

По результатам проведенных испытаний были получены экспериментальные значения осевых деформаций в крайних волокнах древесины. После вычислений по формуле (4) были получены значения теоретических осевых деформаций в крайних волокнах древесины, рассчитанных по методу приведенного сечения.

Результаты экспериментальных и теоретических значений осевых деформаций крайних волокон древесины для каждой ступени нагружения приведены в таблицах 2-5.

**Таблица 2. Значения осевых деформаций древесины для балок серии B1**  
**Table 2. Values of axial strains of wood for beams of the B1 series**

Нагрузка, P, кН / Load, P, kN	Осевые деформации сжатия древесины, $\varepsilon_c \times 10^{-4}$ / Axial compressive deformations of wood, $\varepsilon_c \times 10^{-4}$			Осевые деформации растяжения древесины, $\varepsilon_p \times 10^{-4}$ / Axial tensile deformations of wood, $\varepsilon_t \times 10^{-4}$		
	Эксперимент / Experiment	Теория / Theory	Разница, % / Difference, %	Эксперимент / Experiment	Теория / Theory	Разница, % / Difference, %
0	0	0	0	0	0	0
1.5	-1.83	-2.32	-21.12	1.19	1.36	-12.50
3.0	-4.60	-4.68	-1.71	2.87	2.73	5.13
4.5	-7.22	-7.07	2.12	4.52	4.10	10.24
6.0	-9.97	-9.49	5.06	6.05	5.48	10.40
7.5	-12.48	-11.96	4.35	7.52	6.87	9.46
9.0	-15.12	-14.46	4.56	9.08	8.26	9.93
10.5	-17.33	-17.00	1.94	10.94	9.66	13.25





12.0	-20.17	-19.58	3.01	12.45	11.07	12.47
13.5	-22.96	-22.20	3.42	14.35	12.48	14.98
15.0	-25.45	-24.86	2.37	15.82	13.90	13.81
16.5	-27.96	-27.57	1.41	17.66	15.32	15.27
18.0	-30.17	-30.31	-0.46	19.17	16.75	14.45
19.5	-32.73	-33.11	-1.15	21.36	18.19	17.43
21.0	-35.29	-35.95	-1.84	22.83	19.63	16.30
22.5	-36.50	-38.84	-6.02	23.97	21.08	13.71

Таблица 3. Значения осевых деформаций древесины для балок серии B2  
Table 3. Values of axial strains of wood for beams of the B2 series

Нагрузка, P, кН / Load, P, kN	Осевые деформации сжатия древесины, $\epsilon_c \times 10^{-4}$ / Axial compressive deformations of wood, $\epsilon_c \times 10^{-4}$			Осевые деформации растяжения древесины, $\epsilon_p \times 10^{-4}$ / Axial tensile deformations of wood, $\epsilon_t \times 10^{-4}$		
	Эксперимент / Experiment	Теория / Theory	Разница, % / Difference, %	Эксперимент / Experiment	Теория / Theory	Разница, % / Difference, %
0	0	0	0	0	0	0
1.0	-4.85	-3.83	26.63	3.17	2.82	12.41
2.0	-9.47	-7.89	20.03	6.26	5.76	8.68
3.0	-13.65	-12.22	11.70	8.97	8.81	1.82
4.0	-18.15	-16.84	7.78	11.179	11.99	-1.67
5.0	-22.66	-21.77	4.09	15.03	15.30	-1.76
6.0	-27.66	-27.06	2.22	18.16	18.75	-3.15
7.0	-32.72	-32.75	-0.09	21.29	22.33	-4.66
8.0	-37.26	-38.87	-4.14	24.11	26.05	-7.45

Таблица 4. Значения осевых деформаций древесины для балок серии B3  
Table 4. Values of axial strains of wood for beams of the B3 series

Нагрузка, P, кН / Load, P, kN	Осевые деформации сжатия древесины, $\epsilon_c \times 10^{-4}$ / Axial compressive deformations of wood, $\epsilon_c \times 10^{-4}$			Осевые деформации растяжения древесины, $\epsilon_p \times 10^{-4}$ / Axial tensile deformations of wood, $\epsilon_t \times 10^{-4}$		
	Эксперимент / Experiment	Теория / Theory	Разница, % / Difference, %	Эксперимент / Experiment	Теория / Theory	Разница, % / Difference, %
0	0	0	0	0	0	0
1.5	-1.85	-2.78	-33.45	1.46	2.07	-29.47
3.0	-4.54	-5.60	-18.93	3.36	4.17	-19.42
4.5	-7.18	-8.46	-15.13	5.26	6.28	-16.24
6.0	-9.61	-11.37	-15.48	7.03	8.41	-16.41
7.5	-12.35	-14.31	-13.70	9.14	10.57	-13.53
9.0	-14.77	-17.31	-14.67	10.74	12.74	-15.70
10.5	-17.45	-20.34	-14.21	12.65	14.94	-15.33
12.0	-20.06	-23.42	-14.35	14.56	17.15	-15.10
13.5	-22.74	-26.55	-14.35	16.56	19.39	-14.60
15.0	-25.37	-29.73	-14.67	18.34	21.65	-15.29
16.5	-28.23	-32.95	-14.32	20.68	23.94	-13.62
18.0	-30.91	-35.23	-12.26	22.78	25.64	-11.15
19.5	-34.45	-38.55	-10.64	25.04	27.87	-10.15
21.0	-36.78	-40.85	-9.96	26.00	30.10	-13.62

Таблица 5. Значения осевых деформаций древесины для балок серии B4  
Table 5. Values of axial strains of wood for beams of the B4 series

Нагрузка, P, кН / Load, P, kN	Осевые деформации сжатия древесины, $\epsilon_c \times 10^{-4}$ / Axial compressive deformations of wood, $\epsilon_c \times 10^{-4}$			Осевые деформации растяжения древесины, $\epsilon_p \times 10^{-4}$ / Axial tensile deformations of wood, $\epsilon_t \times 10^{-4}$		
	Эксперимент / Experiment	Теория / Theory	Разница, % / Difference, %	Эксперимент / Experiment	Теория / Theory	Разница, % / Difference, %

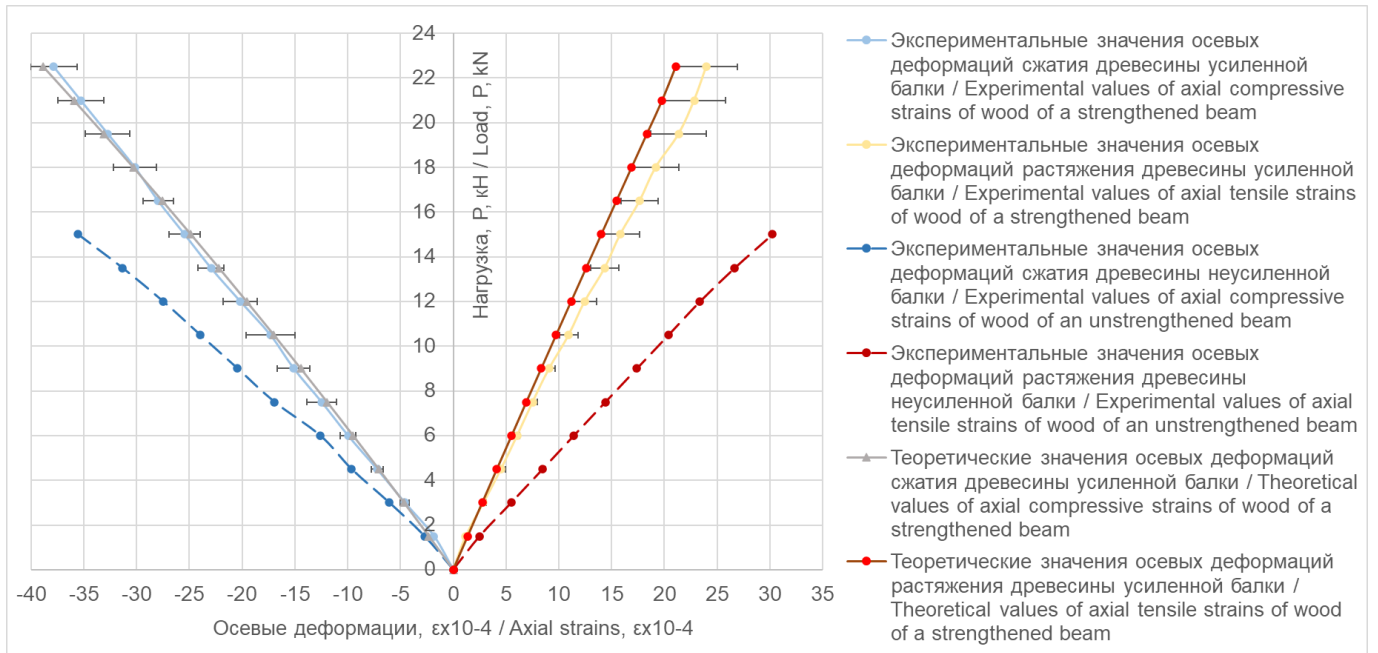


0	0	0	0	0	0	0
1.5	-2.32	-2.33	-0.43	1.53	1.52	0.66
3.0	-4.95	-4.70	5.32	3.21	3.05	5.25
4.5	-7.63	-7.11	7.31	4.87	4.59	6.10
6.0	-10.10	-9.56	5.65	6.56	6.15	6.67
7.5	-12.71	-12.07	5.30	8.23	7.72	6.61
9.0	-15.18	-14.62	3.83	9.77	9.31	4.94
10.5	-18.04	-17.21	4.82	11.59	10.90	6.33
12.0	-20.45	-19.86	2.97	13.12	12.52	4.79
13.5	-22.80	-22.56	1.06	14.64	14.14	3.54
15.0	-25.65	-25.31	1.34	16.55	15.78	4.88
16.5	-28.21	-28.12	0.32	18.25	17.44	4.64
18.0	-30.62	-30.99	-1.19	19.88	19.10	4.08
19.5	-33.29	-33.91	-1.83	21.70	20.78	4.43
21.0	-35.98	-36.89	-2.47	23.59	22.48	4.94
22.5	-38.00	-39.61	-4.06	26.45	24.10	9.75

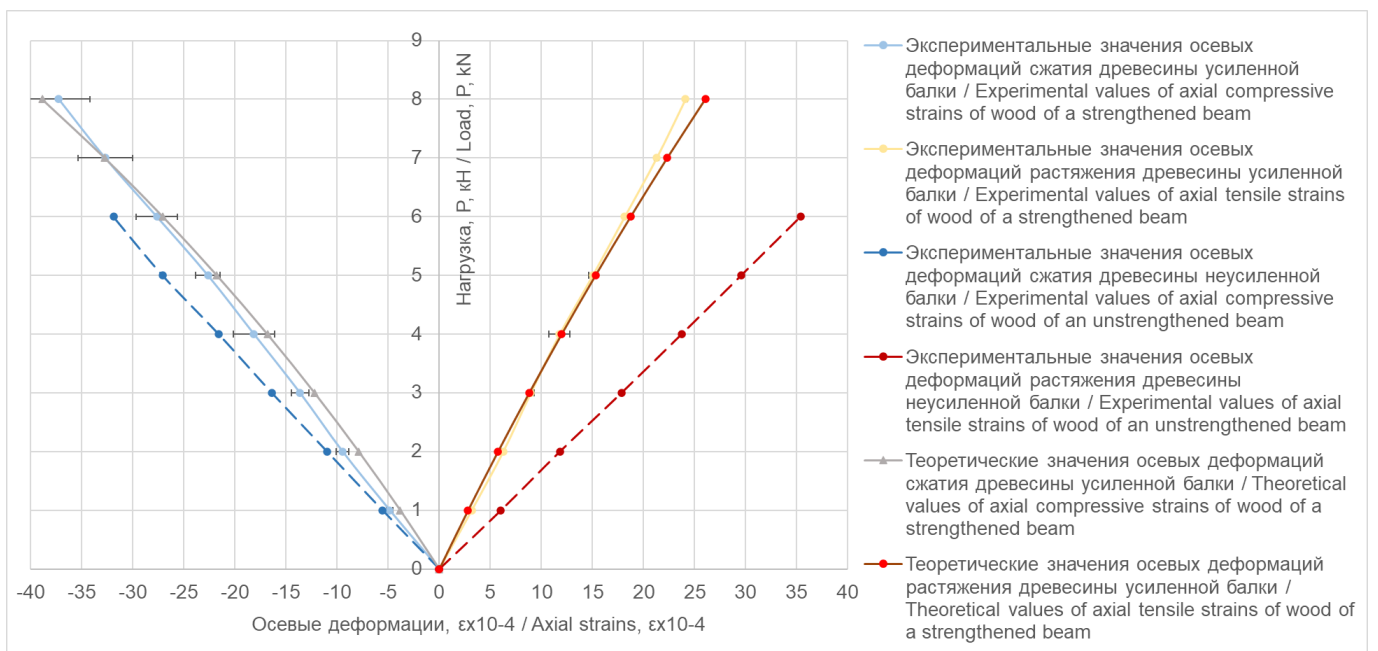
Таблица 6. Значения осевых деформаций древесины для балок серии B5  
Table 6. Values of axial strains of wood for beams of the B5 series

Нагрузка, P, кН / Load, P, kN	Осевые деформации сжатия древесины, $\varepsilon_c \times 10^{-4}$ / Axial compressive deformations of wood, $\varepsilon_c \times 10^{-4}$			Осевые деформации растяжения древесины, $\varepsilon_p \times 10^{-4}$ / Axial tensile deformations of wood, $\varepsilon_t \times 10^{-4}$		
	Эксперимент / Experiment	Теория / Theory	Разница, % / Difference, %	Эксперимент / Experiment	Теория / Theory	Разница, % / Difference, %
0	0	0	0	0	0	0
1.5	-2.36	-2.64	-10.61	1.99	2.11	-5.69
3.0	-5.14	-5.39	-4.64	4.24	4.29	-1.17
4.5	-7.90	-8.24	-4.13	6.43	6.53	-1.53
6.0	-10.87	-11.21	-3.03	8.80	8.83	-0.34
7.5	-13.80	-14.29	-3.43	11.14	11.20	-0.54
9.0	-16.44	-17.50	-6.06	13.28	13.64	-2.64
10.5	-19.59	-20.85	-6.04	15.51	16.15	-3.96
12.0	-22.61	-24.34	-7.11	17.67	18.74	-5.71
13.5	-25.68	-27.98	-8.22	19.87	21.41	-7.19
15.0	-28.78	-31.79	-9.47	22.09	24.16	-8.57
16.5	-32.18	-35.77	-10.04	24.38	26.99	-9.67
18.0	-35.73	-39.94	-10.54	26.71	29.92	-10.73
19.5	-38.16	-43.13	-11.52	30.28	32.34	-6.37

По данным таблиц построены графики зависимости теоретических и экспериментальных осевых деформаций крайних волокон древесины от величины действующей нагрузки. Графики зависимости представлены на рисунках 3-7.

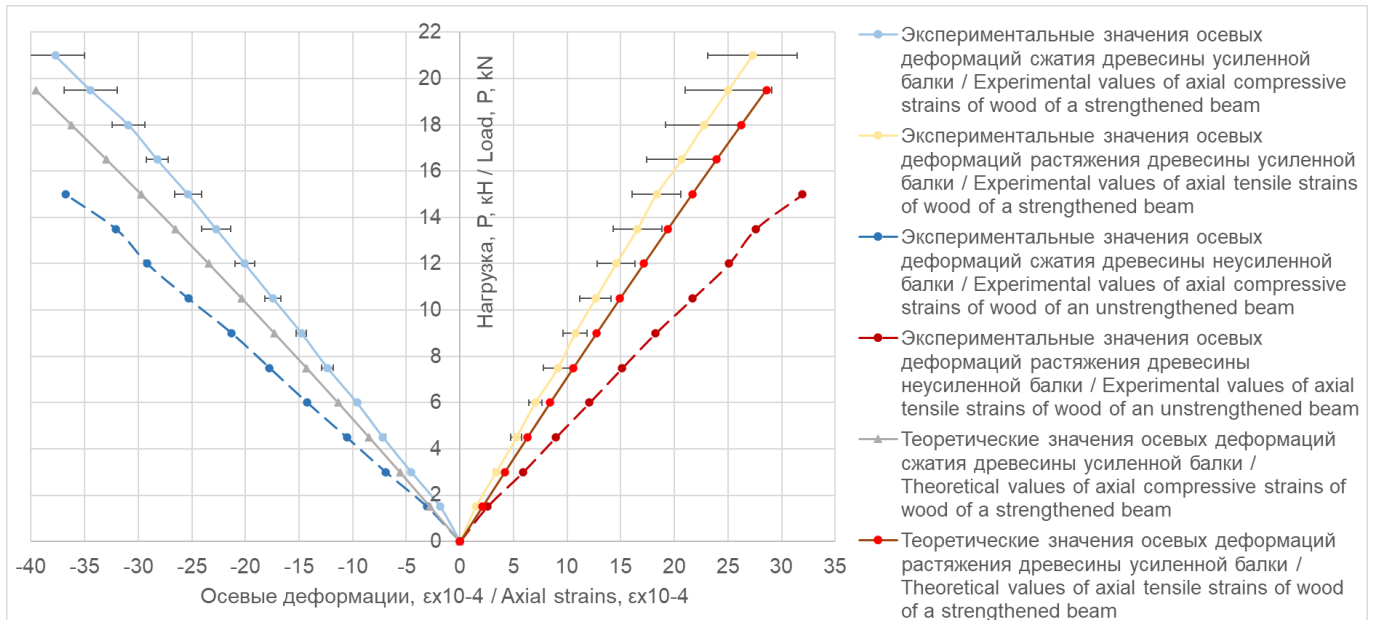


**Рис. 3 – График зависимости осевых деформаций древесины для балок серии В1**  
**Fig. 3 - Graph of axial strains of wood for beams of the B1 series**

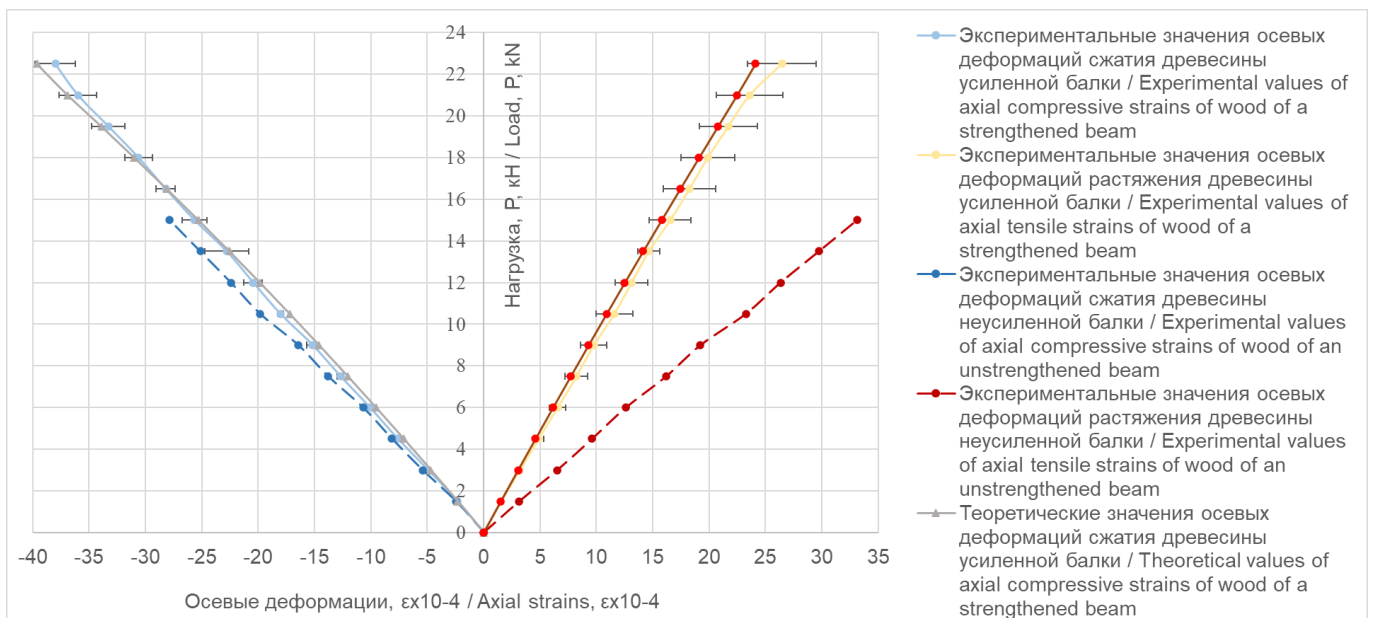


**Рис. 4 – График зависимости осевых деформаций древесины для балок серии В2**  
**Fig. 4 - Graph of axial strains of wood for beams of the B2 series**

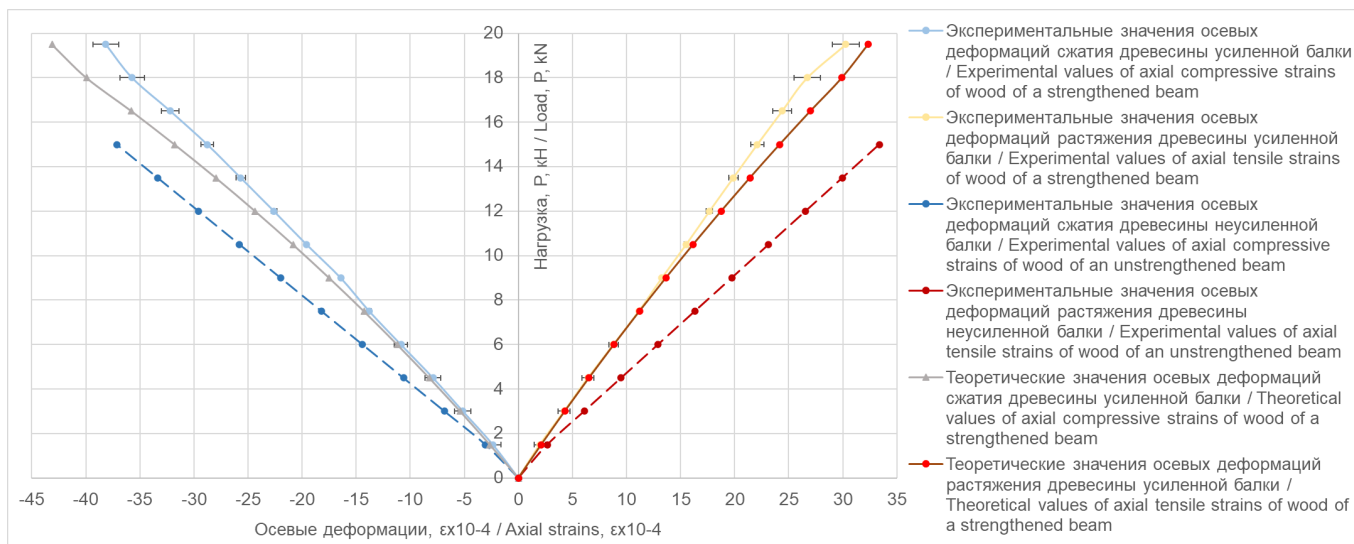




**Рис. 5 – График зависимости осевых деформаций древесины для балок серии В3**  
**Fig. 5 - Graph of axial strains of wood for beams of the B3 series**



**Рис. 6 – График зависимости осевых деформаций древесины для балок серии В4**  
**Fig. 6 - Graph of axial strains of wood for beams of the B4 series**



**Рис. 7 – График зависимости осевых деформаций древесины для балок серии B5**  
**Fig. 7 - Graph of axial strains of wood for beams of the B5 series**

## 4 Conclusions

Из анализа полученных значений осевых деформаций поперечного сечения деревянных балок, усиленных композитным материалом, установлено следующее:

1. Распределение экспериментальных осевых деформаций по высоте поперечного сечения осуществляется по линейному закону, т. е. по результатам испытаний подтверждается гипотеза плоских сечений для неоднородных материалов.
2. Прочность деревянных изгибаемых элементов, усиленных с применением композитного материала на основе углеродного волокна сравнительно выше прочности не усиленных образцов, требует специальной методики расчета;
3. При изменении процента армирования от 0.90 до 2.30 % наблюдается увеличение прочности в сравнении с не усиленными образцами от 28 до 45 %;
4. Экспериментальные значения осевых деформаций деревянных балок, усиленных композитным материалом, дают высокую сходимость с результатами теоретических значений, полученных по методу приведенного сечения;
5. Разрушение не усиленных образцов имеет хрупкий характер и происходит по растянутым волокнам древесины. При достижении волокон древесины сжатой зоны предела текучести при возрастании нагрузки происходит рост площадки текучести, снижение нейтральной оси в сторону растянутой зоны и как следствие достиганием растянутыми волокнами древесины предела прочности с последующим их разрывом. Разрушение усиленных образцов происходит по сжатой зоне древесины и имеет пластический характер;
6. Система внешнего армирования снижает влияние естественных пороков строения древесины на работу деревянных балочных конструкций под нагрузкой.

## References

1. Rimshin, V.I., Kurbatov, V.L., Ketsko, E.S., Truntov, P.S. (2021) Extile Industry Building Strengthening with External Rein-Forcement with Composite Materials. *Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*, **6**, 242–249. [https://doi.org/10.47367/0021-3497\\_2021\\_6\\_242](https://doi.org/10.47367/0021-3497_2021_6_242)
2. Kuzina, E., Rimshin, V. (2019) Experimental and Calculated Evaluation of Carbon Fiber Reinforcing for Increasing Concrete Columns Carrying Capacity. *E3S Web of Conferences: 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019, Tashkent*, EDP Sciences, **97**, 04007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199704007>
3. Merkulov, S.I., Esipov, S.M., Solodov, N.V., Esipova, D.V. (2023) On the Effect of Operating Conditions on the Coupling of Non-metallic External Reinforcement with Reinforced Concrete Structure. *Innovations and Technologies in Construction*, Springer Nature Switzerland AG, **307**, 235–242. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-20459-3\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-031-20459-3_30)

Klyuev S.; Lobov D.

External Reinforcement of Wooden Beam Structures with Carbon Fiber Composite Materials; 2023; *Construction of Unique Buildings and Structures*; **109** Article No 10911. doi: 10.4123/CUBS.109.11



4. Klyuev, S.V., Bratanovskiy, S.N., Trukhanov, S.V., Manukyan, H.A. (2019) Strengthening of Concrete Structures with Composite Based on Carbon Fiber. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, **16(7)**, 2810–2814. <https://doi.org/10.1166/jctn.2019.8132>
5. Merkulov, S.I., Akimov, E.K. (2022) Complex Application of Rod Composite Reinforcement in Bendable Concrete Elements. *Lecture Notes in Civil Engineering*, **182**, 269–273. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8\\_24](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_24)
6. Granovsky, A., Simakov O., Dzhamuev, B. (2019) The FRP and TRC Strengthening of the Masonry Structures. *E3S Web of Conferences: 22nd International Scientific Conference on Construction the Formation of Living Environment, FORM 2019, Tashkent*, EDP Sciences, **97**, 02041. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199702041>
7. Granovsky, A.V., Dzhamuev B.K., Simakov O.A. (2017) The Use of Composite Materials as a System of External Reinforcement for Strengthening of Masonry Constructions. *Industrial and Civil Engineering*, **9**, 48–53. <http://www.pgs1923.ru/ru/index.php?m=4&y=2017&v=09>
8. Griбанov, A.S., Roshchina, S.I., Popova, M.V., Sergeev, M.S. (2018) Laminar Polymer Composites for Wooden Structures. *Magazine of Civil Engineering*, **7(83)**, 3–11 (2018). <https://doi.org/10.18720/MCE.83.1>
9. Roshchina, S., Griбанov, A., Lukin, M., Chibrikin, D., Shunqi, M. (2022) Investigation of the Stress–Strain State of Wooden Beams with Rational Reinforcement with Composite Materials. *Lecture Notes in Civil Engineering*, **182**, 475–483. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8\\_42](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_42)
10. Koshcheev, A., Roshchina, S., Lukin, M., Vatin, N. (2022) Wood and Steel Rope: A Rational Combination in Floor Beams. *Lecture Notes in Civil Engineering*, **182**, 447–462. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8\\_40](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_40)
11. Shorstov, R.A., Yaziev, S.B., Chepurnenko, A.S., Klyuev, A.V. (2022) Flat Bending Shape Stability of Rectangular Cross-Section Wooden Beams When Fastening the Edge Stretched from the Bending Moment. *Construction Materials and Products*, **5**, 5–18. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-4-5-18>
12. Lukin, M., Prusov, E., Roshchina, S. (2021) Multi-Span Composite Timber Beams with Rational Steel Reinforcements. *Buildings*, **11(2)**, 1–12. <https://doi.org/10.3390/buildings11020046>
13. Popov, E.V., Labudin, B.V., Varenik, K.A., Sopilov, V.V., Bobyleva, A.V. (2022) Researching of Wooden Beams with External Reinforcement Based on Toothed Steel Plates. *AIP Conference Proceedings. IV International Scientific and Practical Conference on Innovations in Engineering and Technology (ISPCJET 2021)*, 050006. <https://doi.org/10.1063/5.0106857>
14. Labudin, B.V., Popov, E.V., Shemelyak, P.A. (2022) The Stability of Wood Composite Wall Panels with Elastically Deformable Mechanical Links. *Lecture Notes in Civil Engineering*, **182**, 217–227. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_19)
15. Lacroix, D., Doudak, G. (2020) Towards Enhancing the Post-Peak Performance of Glued-Laminated Timber Beams Using Multi-Directional Fibre Reinforced Polymers. *Engineering Structures*, **215**, 110680. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029619319480>
16. Donadon, B.F., Mascia, N.T., Vilela, R., Trautwein, L.M. (2020) Experimental Investigation of Glued-Laminated Timber Beams with Vectran-FRP Reinforcement. *Engineering Structures*, **202**, 109818. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141029619325672>
17. Lengyel, K. S. A. (2022) Strengthening Timber Structural Members with CFRP and GFRP. *Polymers*, **14(12)**, 2381. <https://www.mdpi.com/2073-4360/14/12/2381>
18. Vetter, Y., Stakheiko, M., Chen, H., Siciliano, S., Lacroix, D. (2021) Analytical Investigation of Wood Material Properties on the Flexural Behaviour of FRP Reinforced Glulam. *Proceedings of the Canadian Society of Civil Engineering Annual Conference*, 303–315. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-19-1004-3\\_25](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-19-1004-3_25)
19. Thongchom, C., Van, C.N., Lai, V.Q., Keawsawasvong, S., Mathuros, A. (2020) Flexural Performance of Timber Beams Reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer Rods. *Computational Intelligence Methods for Green Technology and Sustainable Development*, 201–209. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-19694-2\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-031-19694-2_18)
20. Guo, N., Yang, C., Li, L., Li, G., Zhao, Y. (2021) Experimental Study on Flexural Performance of Regulated Reinforced Glulam Beam after Long-Term Loading. *Sustainability*, **13 (10)**, 5556. <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/10/5556>
21. Khoshimova, F.F., Polikutin, A.E., Panfilov, D.V., Nazarenko, N.G. (2022) Experimental Study of the Workability of Wooden Bridges Unreinforced and Reinforced with Carbon Fiber Tape Under



- Static Loading. *Housing and Utilities Infrastructure*, **1(20)**, 17–26. <https://doi.org/10.36622/VSTU.2022.30.59.002>.
22. Rassokhin, A.S., Ponomarev, A.N., Figovsky, O.L. (2018) Ultra-Light Hybrid Composite Wood-Polymer Structural Materials in Construction. *Magazine of Civil Engineering*, **3(79)**, 132–139. <https://doi.org/10.18720/MCE.79.14>.
23. Labudin, B., Tyurina, O., Mavrin, D., Hasan, W. (2022) Method for Determining the Design Resistance of a Glued-In Twisted Elliptical Bar for Pulling Out in Elements of Wooden Structures. *Lecture Notes in Civil Engineering*, **182**, 181–187. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_15).
24. Linkov, N.V. (2019) Statistical Analysis of the Deformability of the KM-Pasting Compound Based on Plain Weave Fiberglass Fabric. *Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*, **2(380)**, 169–174. [https://tp.ivgpu.com/?page\\_id=13344](https://tp.ivgpu.com/?page_id=13344)
25. Linkov, N.V. (2021) To the Question of the Method for Determining the Strength Characteristics of Adhesive Joints of Wooden Structures. *Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*, **3(393)**, 153–158. [https://doi.org/10.47367/0021-3497\\_2021\\_3\\_153](https://doi.org/10.47367/0021-3497_2021_3_153).
26. Linkov, N.V. (2018) The Use of Fiberglass in a Composite Material for Gaining Wooden Structures. *Proceedings of Higher Education Institutions. Textile Industry Technology*, **3(375)**, 75–80. [https://tp.ivgpu.com/?page\\_id=12648](https://tp.ivgpu.com/?page_id=12648)
27. Stoianov, V.O., Pogoreltsev, A.A. (2018) Investigations of a Beam Reinforced with Polymeric Composites in Sections with Maximum Normal and Tangential Stresses. *Structural Mechanics and Analysis of Constructions*. **3(278)**, 70–74. [http://stroy-mex.narod.ru/index/2018\\_3/0-241](http://stroy-mex.narod.ru/index/2018_3/0-241)
28. Inzhutov, I.S., Zhadanov, V.I., Bakhareva, N.A., Melnikov, P.P. (2017) Research in Stress-Strain State in the Component of a Wooden Glued Large-Span Structure with Use of Carbon Fiber. *Industrial and Civil Engineering*, **11**, 12–17. <http://www.pgs1923.ru/ru/index.php?m=4&y=2017&v=11>
29. Inzhutov, I., Amelchugov, S., Nazirov, R. (2019) Energy Efficiency of Timber Construction Joint with Wooden Screw. *E3S Web of Conferences: 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, SPbWOSCE 2018, St. Petersburg*, EDP Sciences, **110**, 01022. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911001022>.
30. Andreev, V.I. *Mechanics of Inhomogeneous Bodies*. Yurait. Moscow, 2020. 254 p. <https://urait.ru/book/mehanika-neodnorodnyh-tel-468915>