

Определение минимальной длины композитного армирования при усилении растянутой зоны цельнодеревянной балки

А.А. Иодчик, А.А. Чебровский

Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск

Аннотация: В данной статье исследуется напряженное состояние деревянной балки, усиливаемой полимерным композитным армированием из углеродной ленты различной длины. Определяется минимально необходимая длина усиливающей ленты на основе углеродной ткани в наиболее нагруженной нижней растянутой зоне однопролетной цельнодеревянной балки.

Ключевые слова: цельнодеревянная балка, полимерное композитное армирование, лента из углеродной ткани, физико-механические характеристики композита, расчетная погонная нагрузка, место обрыва армирующей ленты, напряженное состояние балки, зона концентрации напряжений, мозаика и эпюра нормальных напряжений, минимальная длина композитного армирования.

В процессе эксплуатации перекрытий гражданских зданий с несущими деревянными балками под воздействием различных факторов: изменившегося температурно-влажностного режима, механических дефектов и повреждений, введения новых положений нормативной документации и др., балки перестают удовлетворять предъявляемым к ним требованиям, и зачастую нуждаются в усилении. Также усиление балок перекрытий необходимо при увеличении эксплуатационных нагрузок, связанном со сменой функционального назначения помещений. Одним из методов усиления деревянных балок, получающих все большее распространение, является использование различных типов композитного армирования. Сегодня композиционными материалами (композитами) принято называть материалы, включающие в себя несколько компонентов (минимум два) и обладающие улучшенными свойствами, которые будут отличаться от базовых свойств компонентов, составляющих композит. Причем компоненты, входящие в состав композита не должны растворяться или как-то иначе поглощаться при взаимодействии друг с другом. В современном строительстве при усилении деревянных конструкций активно используются

композиты на основе углеродной ткани с полимерной матрицей [1, 2]. В качестве внешнего армирования клееных деревянных элементов для восстановления и усиления эксплуатируемых деревянных конструкций зданий и сооружений, в том числе, признанных объектами культурного наследия, используются современные композитные полимерные материалы на основе эпоксидной матрицы и углеродных или стеклянных волокон [3,4]. В настоящее время вопросы эффективности внешнего армирования деревянных конструкций интересуют в том числе, и зарубежных исследователей [5, 6].

По сравнению с другими видами усиления деревянных балок (особенно стальными или иными типами протезов) полимерные композиты, использующие углеродную ткань в качестве армирующего элемента, обладают рядом несомненных преимуществ: незначительным собственным весом, высокими прочностными характеристиками, несложной технологией производства работ и др. В табл. 1 представлены основные физико-механические характеристики одного из композитов на основе углеродной ткани [7, 8]. Применение данного материала наиболее эффективно при усилении как новых, так и находящихся в эксплуатации деревянных балок, имеющих какие-либо пороки и дефекты (трещины, сучки, косослой, врезки и др.) в растянутой зоне [9]. В результате, по сравнению с обычными цельнодеревянными элементами композитное усиление, выполненное непосредственно в наиболее нагруженной растянутой зоне деревянной балки (рис. 1), позволяет увеличить несущую способность конструкции на 22...35 % и снизить деформативность на 17...20 % [10].

В случае композитного армирования однопролетных деревянных балок не по всей длине растянутой зоны, а только на участке действия максимальных нормальных напряжений, определяющее значение имеет правильный выбор длины армирующей углеродной ленты [11].

Таблица 1

Физико-механические показатели композита на основе углеродной ткани

Наименование показателя	Един. измерения	Численное значение
Удельный вес	Н / м ³	1,2·10 ⁴
Расчетное сопротивление растяжению вдоль волокон	Н / мм ²	4·10 ² ...10 ³
Модуль Юнга при работе на растяжение вдоль волокон	Н / мм ²	2,5·10 ⁴ ...10 ⁵

Это важно еще и потому, что в месте обрыва армирующей ленты возникает зона концентрации нормальных напряжений, в результате чего может произойти разрыв растянутых волокон балки при действии нагрузок, не достигших еще своих расчетных значений. В большинстве случаев разрушение таких конструкций происходит по древесине балки, в зоне концентрации растягивающих напряжений в месте обрыва усиливающей углеродной ленты на расстоянии x от опоры.

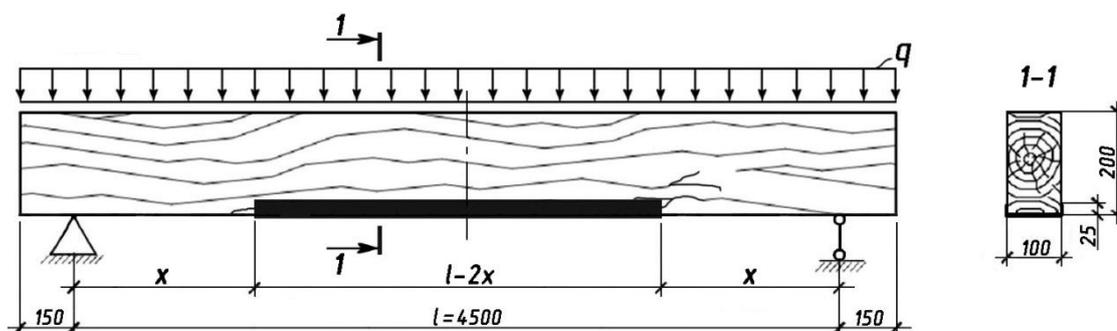


Рис. 1 – Расчетная схема цельнодеревянной балки, усиленной в зоне максимальных растягивающих напряжений углеродной лентой

В данной работе задача численного исследования композитного усиления заключалась в анализе напряженного состояния в зоне обрыва композитного армирования и определения минимально необходимой длины усиливающей углеродной ленты в зоне действия максимальных нормальных напряжений.

В качестве расчетного образца была рассмотрена цельнодеревянная балка из древесины сосны 2-й категории с сечением $b \times h = 100 \times 200$ мм и расчетным пролетом 4500 мм. Расчетная схема – однопролетная свободно опертая балка, загруженная равномерно распределенной нагрузкой. Исследуемая балка усиливалась в растянутой зоне центральной части пролета однонаправленной углеродной лентой FibArm 440/160 с заведением армирующей ленты на боковые поверхности балки на 25 мм (рис. 1). В качестве полимерной матрицы была использована клеевая композиция на основе эпоксидно-диановой смолы ЭД-20.

На основании проведенных ранее исследований [10] принято считать, что оптимальная длина полимерного композитного армирования углеродной лентой (при коэффициенте армирования 0,75 ... 1,5 %) составляет $0,4l \dots 0,6l$, где l – величина расчетного пролета балки (рис. 1). При этом, граница обрыва углеродной ленты должна находиться от опоры балки, соответственно на расстоянии $x = 0,2l \dots 0,3l$. В таком случае величина нормальных напряжений с учетом их концентрации в точке обрыва армирующего материала не превысит значений прочностных характеристик древесины и не приведет к разрыву растянутых волокон по нижней грани балки.

Численные исследования проводились для трех образцов балок с усилением нижней растянутой зоны образцов композитным армированием разной длины. Армирующая углеродная лента крепилась в нижней части балки для восприятия изгибающих моментов близких к максимальному значению.

Условие прочности цельнодеревянной однопролетной балки в точке обрыва армирующей углеродной ленты можно записать, как:

$$\sigma = \frac{M_x}{W_x} \leq R_u, \quad (1)$$

где σ – нормальное напряжение в расчетном сечении балки; M_x – значение изгибающего момента в точке обрыва армирования на расстоянии x от опоры

балки; W_x – момент сопротивления расчетного сечения балки нетто; R_u – расчетное сопротивление древесины изгибу.

Из формулы (1) получим выражение для изгибающего момента:

$$M_x = W_x R_u. \quad (2)$$

Расчетный изгибающий момент M_x на расстоянии x от опоры балки определим по формуле:

$$M_x = \frac{qx(l-x)}{2}, \quad (3)$$

где q – расчетная погонная нагрузка на балку; x – расстояние от опоры балки до точки обрыва армирующей ленты; l – величина расчетного пролета балки.

Выражение для равномерно распределенной погонной нагрузки на балку можно получить, подставив в формулу (3) значение изгибающего момента из формулы (2), в результате запишем:

$$q = \frac{2R_u W_x}{x(l-x)}. \quad (4)$$

Величина момента сопротивления расчетного сечения опытных образцов цельнодеревянных балок будет равна $W_x = 6,67 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$, расчетный пролет балок составляет $l = 4,5 \text{ м}$. Подставив эти значения в формулу (4), определим величины погонных нагрузок q для образцов балок:

- для 1-го образца $q_1 = 5,35 \text{ кН/м}$ (рис. 2);
- для 2-го образца $q_2 = 4,57 \text{ кН/м}$ (рис. 3);
- для 3-го образца $q_3 = 3,76 \text{ кН/м}$ (рис. 4).

Моделирование и расчет образцов балок проводились в программном комплексе ЛИРА-САПР 2017. Были установлены следующие граничные условия – связи в опорных узлах балки: по направлению YZ для шарнирно-подвижной опоры и XYZ для шарнирно-неподвижной опоры. Задавались жесткости для каждого типа конечных элементов (КЭ): для древесины – КЭ 36, для однонаправленной углеродной ленты – пластина КЭ 41. Погонная расчетная нагрузка прикладывалась к верхней грани балки по всей длине

пролета в направлении глобальной оси Z . Физико-механические характеристики древесины и усиливающего элемента приняты по результатам, полученным в ходе испытания образцов.

Для древесины: удельный вес – $5 \cdot 10^3$ Н / м³; модуль Юнга – 104 Н / мм²; модуль сдвига – $6,9 \cdot 10^2$ Н / мм²; коэффициент Пуассона – $1,8 \cdot 10^{-2}$.

Для углеродной ленты: удельный вес – $4,3 \cdot 10^3$ Н / м³; модуль Юнга – $5 \cdot 10^4$ Н / мм²; коэффициент Пуассона – 0,2.

В первой балке длина армирующей углеродной ленты составила 2700 мм или 0,6l. При этом граница обрыва углеродной ленты располагалась на расстоянии 900 мм ($x = 0,2l$) от опоры балки (рис. 2, а).

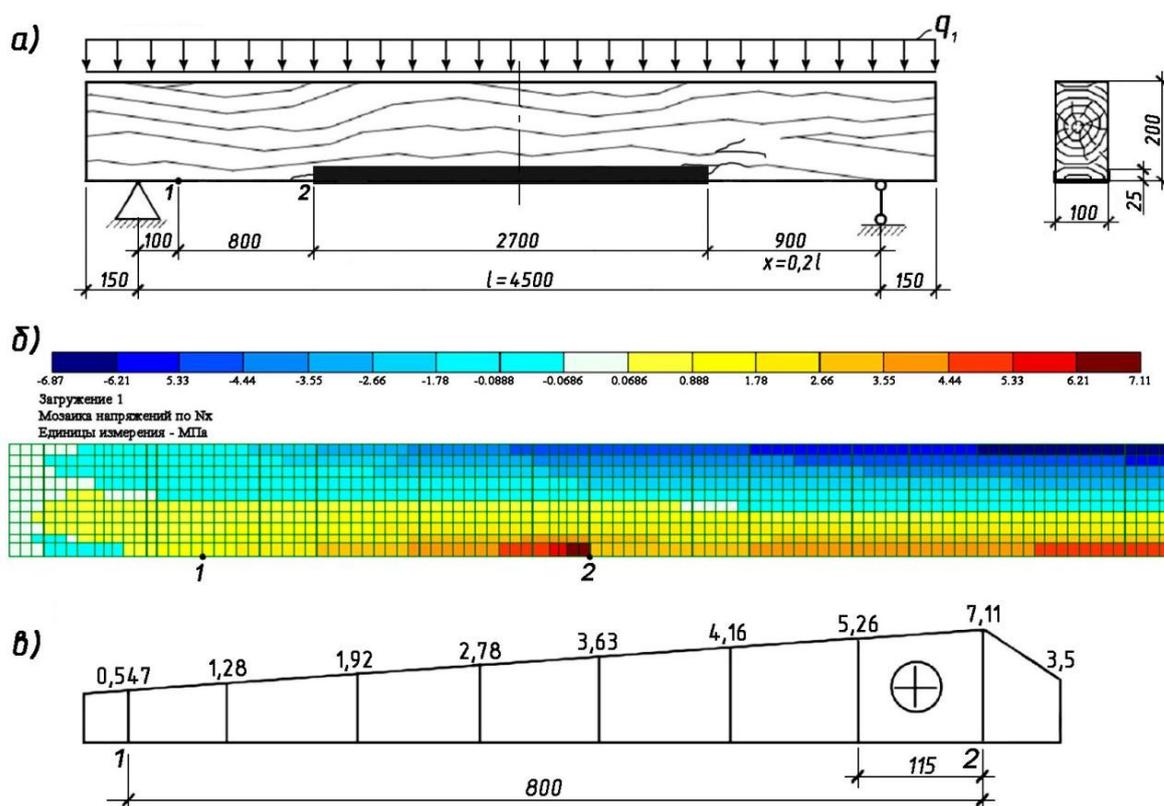


Рис. 2 – К расчету деревянной балки, усиленной углеродной лентой длиной 2700 мм: а – расчетная схема балки; б – мозаика нормальных напряжений на половине пролета балки от действия нагрузки q_1 ; в – эпюра нормальных напряжений (в МПа) по нижней кромке балки на участке 1-2

На рисунке 2, б представлена мозаика нормальных напряжений на половине пролета первой балки. Как было отмечено выше, концентратор нормальных растягивающих напряжений расположен в месте обрыва армирующей углеродной ленты в точке 2 (рис. 2, б). Максимальное значение нормальных напряжений в точке 2 составляет 7,11 МПа (рис. 2, в), что значительно меньше расчетного значения прочности древесины – 13 МПа.

Во второй балке армирующая углеродная лента была принята длиной 2250 мм или 0,5l. При этом, граница обрыва углеродной ленты располагалась на расстоянии 1125 мм ($x = 0,25l$) от опоры балки (рис. 3, а).

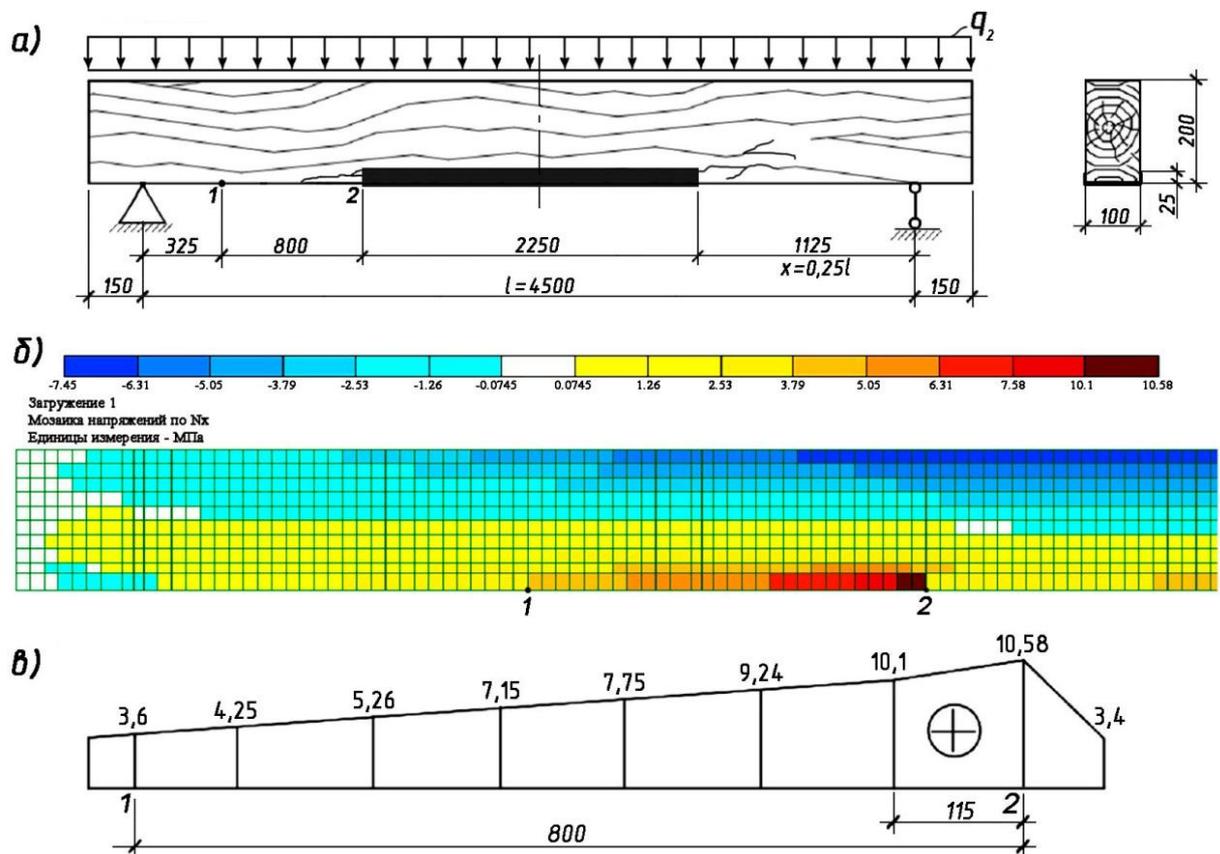


Рис. 3 – К расчету деревянной балки, усиленной углеродной лентой длиной 2250 мм: а – расчетная схема балки; б – мозаика нормальных напряжений на половине пролета балки от действия нагрузки q_2 ; в – эпюра нормальных напряжений (в МПа) по нижней кромке балки на участке 1-2

На рисунке 3, б представлена мозаика нормальных напряжений на половине пролета второй балки. Как видно из рисунка 2, в на границе зоны армирования происходит рост нормальных напряжений, и максимальное значение напряжения в точке 2 достигает величины 10,58 МПа. При этом, следует отметить снижение уровня напряжений в середине пролета балки, непосредственно в центре углеродной усиливающей ленты. Если в 1-ой балке нормальное напряжение в растянутой зоне в середине пролета составило 6,2 МПа, то во 2-ой балке эта величина уменьшилась до 4,5 МПа.

В третьей балке длина армирующей углеродной ленты составила 1350 мм или 0,3l. При этом, граница обрыва углеродной ленты располагалась на расстоянии 1575 мм ($x = 0,35l$) от опоры балки (рис. 4, а).

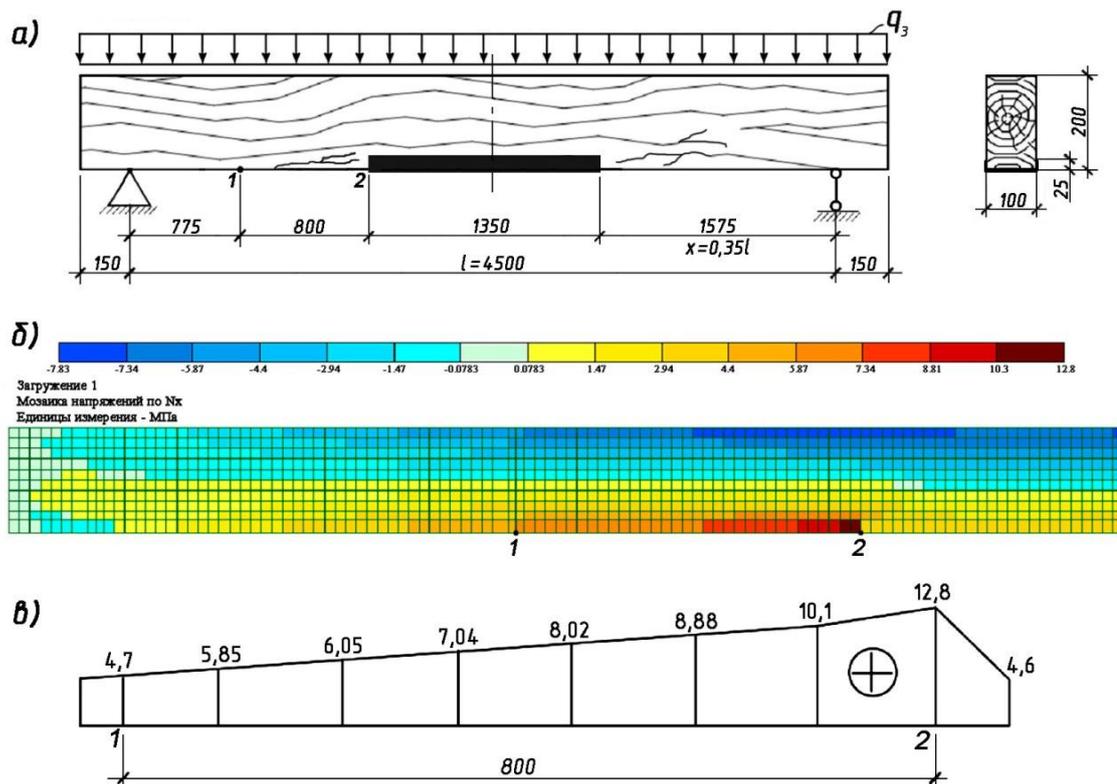


Рис. 4 – К расчету деревянной балки, усиленной углеродной лентой длиной 1350 мм: а – расчетная схема балки; б – мозаика нормальных напряжений на половине пролета балки от действия нагрузки q_3 ; в – эпюра нормальных напряжений (в МПа) по нижней кромке балки на участке 1-2

На рисунке 4, б представлена мозаика нормальных напряжений на половине пролета третьей балки. В середине пролета балки с уменьшением длины армирования продолжается снижение величины нормальных напряжений до 2,8 МПа (рис. 4, б). В зоне концентрации напряжений на границе армирования (рис. 4, в) происходит дальнейший рост значений нормальных напряжений до 12,8 МПа. Полученная величина напряжения фактически приближается к максимальному значению расчетного сопротивления изгибу цельнодеревянного элемента. Таким образом, можно сделать вывод о том, что минимально возможная длина композитного армирования на основе углеродной ленты в зоне действия максимальных растягивающих напряжений составляет 30 % расчетной длины цельнодеревянной балки.

Заключение. В результате анализа напряженного состояния растянутой зоны цельнодеревянных балок, усиленных полимерным композитным армированием с использованием углеродной ленты различной длины, можно сделать следующие выводы:

1. Минимальная длина композитного армирования на основе углеродной ленты при усилении наиболее нагруженной растянутой зоны цельнодеревянной балки составляет 0,3 расчетного пролета балки. Уменьшение длины усиливающей углеродной ленты в 1,5...2 раза по сравнению с общепринятыми значениями (0,4...0,6 длины балки), позволяет снизить расход дорогостоящего полимерного композита.

2. При уменьшении длины композитного армирования с 0,6 до 0,3 расчетного пролета балки, величина нормального напряжения в точке обрыва углеродной ленты (зона концентрации напряжений) увеличивается на 44,5 % с 7,11 МПа до 12,8 МПа, приближаясь к предельным значениям прочностных характеристик древесины.

3. Величина нормального напряжения в середине однопролетной цельнодеревянной балки, усиленной углеродной лентой, при уменьшении длины армирования до 0,3 расчетного пролета балки, снижается на 34 %, тем самым уменьшается деформативность усиливаемой балки.

Литература

1. Левинский, Ю.Б., Петряев, Н.Е. Особенности напряженно-деформированного состояния клееных балок, армированных волокнистыми синтетическими материалами // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 199-207.

2. Любин, Дж. Справочник по композиционным материалам. – М.: Машиностроение, 1988. 448 с.

3. Клюкин, А.А. Опыт исследований зарубежных инженеров по усилению деревянных конструкций композиционными материалами // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7680/.

4. Потапова, Т.В. К вопросу об усилении эксплуатируемых деревянных конструкций композитными материалами // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7533/.

5. Corradi, M. Design of Reinforced and Unreinforced Timber Beams subject to Uncertainties // Proceedings of the Twelfth International Conference on Computational Structures Technology, Scotland, 2010. pp. 106-134.

6. Ehsani, M., Larsen, M., Palmer, N. Strengthening of OLD Wood with New Technology // Structure Magazine №2, Arizona, USA, 2004. pp. 19-21.

7. Апостолова, А.К. Изменение на механичните и деформационни свойства на дървесината чрез приложение на композитни материали: дисертационен труд. – София, 2016. 123 с.

8. ACI 440R-96 State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Reported by ACI Committee 440, 2006. – 68 p.

9. Лукина А.В. Совершенствование технологии восстановления деструктированной древесины в элементах деревянных конструкций : дис. канд. техн. наук: 05.21.05. – Архангельск, 2014. 173 с.

10. Стоянов, В.О. Прочность и деформативность изгибаемых деревянных элементов, усиленных полимерными композитами : дис. к-та техн. наук: 05.23.01. – М., 2018. 196 с.

11. Макотин, Б.Б. Исследование прочности и деформативности усиленных деревянных балок перекрытий: дис. к-та техн. наук: 05.23.01. – Владимир: ВЛГУ, 2018. 196 с.

References

1. Levinskij, YU.B., Petryaev, N.E. Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2013. № 2. pp. 199-207.

2. Lyubin, Dzh. Spravochnik po kompozicionnym materialam [Handbook of composite materials]. М.: Mashinostroenie, 1988. 448 p.

3. Klyukin, A. A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7680/.

4. Potapova, T. V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2022/7533/.

5. Corradi, M. Proceedings of the Twelfth International Conference on Computational Structures Technology, Scotland, 2010. pp. 106-134.

6. Ehsani, M. Structure Magazine №2, Arizona, USA, 2004. pp. 19-21.

7. Apostolova, A.K. Izmenenie na mekhanichnite i deformacionni svojstva na d'rvesinata chrez prilozhenie na kompozitni materiali [Modification of the mechanical and deformation properties of wood by the application of composite materials: dissertation work]. Sofiya, 2016. 123 p.

8. ACI 440R-96 State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Reported by ACI Committee 440, 2006. 68 p.



9. Lukina A.V. Sovershenstvovanie tekhnologii vosstanovleniya destruktirovannoj drevesiny v elementah derevyannyh konstrukcij [Improving the technology of restoration of destructed wood in the elements of wooden structures]. Arhangel'sk, 2014. 173 p.

10. Stoyanov, V.O. Prochnost' i deformativnost' izgibaemyh derevyannyh elementov, usilennyh polimernymi kompozitami [Strength and deformability of bent wooden elements reinforced with polymer composites]. M., 2018. 196 p.

11. Makotin, B. B. Issledovanie prochnosti i deformativnosti usilennyh derevyannyh balok perekrytij [Study of the strength and deformability of reinforced wooden floor beams]. Vladimir: VLGU, 2018. 196 p.