

Усиление деревянных конструкций углеволокном при реконструкции объектов на примере историко-архитектурного музея-заповедника «Кизи»

А.М. Бормотина¹, Т.Н. Щелокова²

¹*ГК ПИК, подразделение ООО «ГП-МФС»*

²*Московский государственный строительный университет*

Аннотация: Одним из наиболее актуальных направлений в строительстве является усовершенствование методов реконструкции зданий и сооружений. Инновационным решением данного вопроса считается усиление объектов строительства композитными материалами, в частности, усиление конструкций из природного анизотропного материала – дерева.

Ключевые слова: древесина, углеродное волокно, композит, материалы, усиление, конструкции, реконструкция, восстановление, трудоемкость, стоимость, прочность, деформативность.

В настоящее время одними из наиболее глобальных направлений вложения средств бюджета Российской Федерации являются реконструкция и модернизация строительных конструкций в зданиях и сооружениях [1].

Ученые и инженеры в течение многих десятилетий ищут наиболее рациональные и эффективные способы усиления деревянных несущих элементов, опираясь на положительные и отрицательные свойства древесины [2]. На современном этапе широко исследуется метод включения в швы клееного бруса сетки или холсты из высокомодульных материалов на основе угле-, стекло-, арамидоволокна. Это позволяет снизить деформативность клееных деревянных конструкций, повысить несущую способность, защитить древесину от внешних воздействий – избыточной влажности, солености и низких температур [3]. Сравнивая проведенные исследования данного вопроса в России и в мире, можно установить, что наиболее выдающихся достижений добились за рубежом. Самые лучшие результаты в исследовании армирования деревянных конструкций полимерными композитами были получены в Швейцарии и Италии.

В Швейцарии в 1992 г. провели усиление деревянных несущих балок крытого моста, построенного в 1807 г. В несущую балку была внедрена арматура из полимерного композита, которая выполняла роль элемента, воспринимающего растягивающие усилия. После проведения работ по усилению на балках были установлены датчики. На протяжении четырнадцати лет считывались показания контрольных измерений и проводились обследования реконструированных элементов. В 2006 году по результатам наблюдений был сделан вывод о том, что совместная работа древесины и композита не нарушилась, и прочность несущих балок не изменилась [4].

В Италии проводилось большое количество исследований по применению композитов в деревянном строительстве, благодаря чему в 2005 году было издано руководство по проектированию и монтажу полимерных композитов при усилении деревянных конструкций. В данном руководстве содержится общая информация по проектированию деревянных конструкций, о видах древесины, композитов и требования при их совместном использовании. Кроме того, здесь описаны рекомендации по оценке состояния конструкций, усиленных композитами, а также целесообразность данного вида усиления [5]. В Италии наиболее яркими примерами усиления деревянных конструкций полимерными композитами стали Дворец Палаццо Нобиле в г. Лукка, Дворец Палаццо Колликола в г. Сполето и другие [6, 7].

Внешнее усиление деревянных конструкций углеволокном целесообразно использовать в современных зданиях и в зданиях, представляющих историческую и культурную ценности, так как при этом сохраняется исходный вид древесины и не меняется статическая схема здания.

Практику внешнего армирования деревянных конструкций материалами на основе углеволокна в России на 2021 год применяют не так широко, как в зарубежных странах. Именно поэтому решено провести анализ по возможности использования углеродного волокна на выбранном объекте реставрации – Преображенской церкви и установить преимущества и недостатки данного метода усиления.

На момент процесса реставрации Преображенской церкви производство углеволокна в России было слабо развито, а применение данного материала в деревянном строительстве не распространено. В 1970-х гг. было всего три предприятия по производству углеволокна. В 2008 г. их объединили в госхолдинг под руководством Росатома. В 2016 году крупнейшим производителем композитных материалов стал завод «Композит», основанный в 2009 году с целью формирования рынка композиционных материалов в России.

Процесс реставрации и ремонта элементов Преображенской занимает несколько веков, начиная с 1815г., а в 1980г. были выявлены работы, которые необходимо было выполнить для сохранения целостности памятника: полная переборка сруба, восстановление или замена деформированных, изношенных деревянных элементов, исправление деформаций. Лишь в 1999-2001 гг. группой инженеров и архитекторов института «Спецпроектреставрация», а также историков музея-заповедника «Кижский» был разработан проект, учитывающий требования 1980 года [8]. В 2008 году проект реставрации был одобрен и получил финансирование со стороны Правительства РФ (Распоряжение правительства РФ от 07.11.2008 № 1633-р (ред. от 10.06.2011) «О плане мероприятий по сохранению ансамбля Кижского погоста и развитию инфраструктуры государственного историко-архитектурного и этнографического музея-заповедника «Кижский»).

За время самой масштабной реставрации Преображенской церкви одними из главных возникших проблем стали:

- деформация сруба в вертикальной плоскости 6 технологического пояса, в следствии чего перепад высоты горизонтальных бревен достигал 0,4 метра на 5 метров длины;

- разработка и устройство временных вертикальных сжимающих устройств, которые обеспечивали местную устойчивость отдельных элементов на 5 технологическом поясе;

- пересечение деревянных усиливающих связей 1982 года и монтируемой конструкции лифтинг-системы, вследствие чего пришлось устанавливать компенсирующие металлические горизонтальные и вертикальные связи.

В работе рассмотрен альтернативный способ решения возникшей проблемы: взамен сохранения металлических и деревянных связей предложен полный демонтаж металлических с последующим усилением деревянных поликомполитным материалом - углеродным волокном FibArm Tare 530/300. Этот вариант позволяет расширить внутреннее пространство яруса и сохранить его архитектурный облик, а также, основываясь на опыте зарубежных стран, можно предположить, что значение несущей способности балки увеличится, а значение деформативности уменьшится [9].

На основании предложенного метода усиления, выполнено технико-экономическое сравнение вариантов усиления, по следующим показателям: прогиб деревянных балок после выполнения работ по усилению; масса элементов усиления; стоимость элементов усиления; трудоемкость выполнения работ по усилению; стоимость выполнения работ по усилению [10].

Просчитанные технико-экономические показатели представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты расчета технико-экономических показателей двух способов усиления

№ п/п	Технико-экономические показатели для всей конструкции из 4 балок	Способ усиления	
		усиление металлическими подпорными элементами	усиление лентами из углеволокна FibArm Tape 530/300
1	2	3	4
1	Результат прогиба конструкции после усиления при существующей нагрузке, мм	20	28,7
2	Предельно допустимый прогиб конструкции, мм	34	
3	Вес конструкции усиления, кг	486	4,9
4	Норма затрат труда рабочих на монтаж конструкции усиления, чел.-ч.	308	16,2
5	Нормы затрат машинного времени, маш.-ч.	8,64	-
6	Заработная плата рабочих, руб.	912	938
7	Заработная плата машиниста, руб.	484	-
8	Стоимость материала, руб.	46368	68200
9	Дополнительные расходы, руб.	20000	-
10	Общие затраты, руб.	67764	69138

В результате технико-экономического сравнения усиления четвериковых балок (табл.1) выяснилось, что:

1. Существенным преимуществом внешнего усиления над усилением с помощью опор является вес: разница составляет почти 481 кг. Это означает,

что наклеиваемая композитная система оказывается на 99% легче системы усиления металлическими опорами.

2. Затраты на производство работ и стоимость материалов при двух способах усиления отличаются на 1364 руб. – установить металлические опоры дешевле на 1,9%. Стоит отметить, что даже при высокой рыночной стоимости углеродной ленты этот вариант усиления оказывается сопоставим по общим затратам с вариантом усиления металлическими опорами. Кроме того, крепление углеродной ленты на эпоксидную основу является менее трудозатратным процессом, чем установка подпорных элементов, так как для этого не требуются специальные услуги (аренда строительной техники, дополнительные рабочие и т.д.). Разница в норме затрат труда рабочих на монтаж конструкции усиления составляет 94%.

3. Важным преимуществом усиления углеволокном над усилением с помощью опор - сохранение архитектурного облика здания и внешнего вида самого элемента и минимальные требования к пространству для выполнения работ.

4. Отдельно стоит отметить проблему с навигацией на Онежском озере: доставка на остров машин и материалов длится всего 5 месяцев в году в зимнее время. Это может приостановить общестроительные работы на объекте, что увеличит сроки производства работ.

В Российской Федерации сдерживающим фактором распространения способа усиления углеродными лентами является высокая стоимость самого материала, недостаточный объем нормативной базы и, как следствие, недостаточный объем исследований в данной области.

Применение углеродной ленты позволяет существенно увеличить прочность и снизить деформативность деревянных балок, а также ускорить процесс реставрации.

Литература

1. Щелокова Т.Н., Грязнов М.В. Изменения технического состояния памятника градостроительства и архитектуры федерального значения Дома Канонникова (Канунникова) // Инженерный вестник Дона. 2021. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6884.

2. Калмыкова Е.С., Щелокова Т.Н. Особенности объемно-планировочных и конструктивных решений деревянных многоэтажных зданий // Дни студенческой науки. М., 2021. С 674-676.

3. Meier, U. Strengthening and stiffening of historic wooden structures with CFRP. International Conference on FRP composites in Civil engineering. Hong Kong, China, 12–15 December 2001. p. 967–974.

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

5. Стоянов В.О., Прочность и деформативность изгибаемых деревянных элементов, усиленных полимерными композитами: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.01 // Стоянов Владимир Олегович; [Место защиты: Науч.-исслед. центр "Стр-во"]. Москва, 2018, с.186.

6. Aiello M.A., Ascione L., Baratta A., Bastianini F., Battista U., Benedetti A., Berardi V.P., Bilotta A., Borri A., Briccoli B.A., Casadei P. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. 214. 154 p.

7. Corradi M., Osofero A.I. and Borri A. Repair and reinforcement of historic timber structures with stainless steel. A review. Metals, 2019. V. 9. № 1. URL:mdpi.com/2075-4701/9/1/106/htm.



8. Официальный источник процессов при реставрации Государственного историко-архитектурного и этнографического музея-заповедника «Кижский». URL: kizhi.karelia.ru/ (дата обращения 20.03.2022).

9. Бормотина А. М. Возможность применения углеволокна в деревянных конструкциях реконструируемых зданий на примере историко-архитектурного музея-заповедника «Кижский» // Дни студенческой науки. М., 2021. С 644-646.

10. Погорелов В.А., Карандина Е.В., Побегайлов О.А. Особенности технико-экономического обоснования организационно-технологического проектирования реконструкции // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2103.

References

1. Shchelokova T.N., Grjaznov M.V. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2021/6884.

2. Kalmykova E.S., Shchelokova T.N. Osobennosti obremno-planirovochnyh i konstruktivnyh reshenij derevjannyh mnogojetazhnyh zdaniy [Features of space-planning and structural solutions of wooden multi-storey buildings]. Dni studencheskoj nauki. M., 2021. pp. 674-676.

3. Meier, U. International Conference on FRP composites in Civil engineering. Hong Kong, China, 12–15 December 2001. pp. 967–974.

4. Apostolova A.K., Izmenenie na mehanichnite i deformacionni svojstva na d#rvesinata chrez prilozhenie na kompozitni materiali: disertacionen trud [there is no change on the mechanical and deformation properties on the composite material through the application on the composite material]. Sofija, 2016. p.123.

5. Stojanov V.O., Prochnost' i deformativnost' izgibaemyh derevjannyh jelementov, usilennyh polimernymi kompozitami: dissertacija na soiskanie uchenoj stepeni kandidata tehniceskix nauk: 05.23.01 Stojanov Vladimir Olegovich [Strength and deformability of bent wooden elements reinforced with polymer

composites: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences 05.23.01 Stojanov Vladimir Olegovich]. Moskva, 2018, p.186.

6. Aiello M.A., Ascione L., Baratta A., Bastianini F., Battista U., Benedetti A., Berardi V.P., Bilotta A., Borri A., Briccoli B.A., Casadei P. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. 214. 154 p.

7. Corradi M., Osofero A.I. and Borri A. Metals, 2019. V. 9. № 1. URL: mdpi.com/2075-4701/9/1/106/htm.

8. Oficial'nyj istochnik processov pri restavracii Gosudarstvennogo istoriko-arhitekturnogo i jetnograficheskogo muzeja-zapovednika «Kizhi» [The official source of the processes during the restoration of the State Historical, Architectural and Ethnographic Museum-Reserve "Kizhi"]. URL: kizhi.karelia.ru (data obrashhenija 20.03.2022).

9. Bormotina A. M. Vozmozhnost' primenenija uglevolokna v derevjannyh konstrukcijah rekonstruiruemyh zdaniy na primere istoriko-arhitekturnogo muzeja-zapovednika «Kizhi» [The possibility of using carbon fiber in wooden structures of reconstructed buildings on the example of the historical and architectural museum-reserve "Kizhi"]. Dni studencheskoj nauki. M., 2021. p. 644-646.

10. Pogorelov V.A., Karandina E.V., Pobegajlov O.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2013. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2103.