

К вопросу об усилении эксплуатируемых деревянных конструкций композитными материалами

Т.В. Потапова

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: В настоящей статье приведены основные преимущества и недостатки использования современных композитных полимерных материалов на основе эпоксидной матрицы и углеродных или стеклянных волокон для восстановления и усиления эксплуатируемых деревянных конструкций зданий и сооружений, в том числе, признанных объектами культурного наследия. Рассмотрены применяемые варианты внешнего армирования и особенности выполнения работ. Проанализирован характер разрушения изгибаемых деревянных элементов, усиленных внешним армированием. Изучены российские и зарубежные работы и отмечен недостаток нормативных документов по данному направлению. Сделаны выводы о необходимости проведения дальнейших исследований в области различных видов напряженно-деформированного состояния усиленных деревянных конструкций, прочности и долговечности клеевого соединения при различных температурно-влажностных условиях эксплуатации, свойств используемых композитных материалов.

Ключевые слова: внешнее армирование, деревянная конструкция, древесина, композит, ламель, реконструкция, стекловолокно, углеволокно, усиление, эпоксидная смола

При реставрации и реконструкции объектов культурного наследия может потребоваться проведение восстановления и усиления деревянных конструкций. Такая необходимость возникает при уменьшении площади их поперечного сечения вследствие грибных и биологических поражений или воздействия пожара, при наличии трещин и прогибов, снижающих несущую способность, а также при несоответствии требованиям современных нормативных документов. К появлению дефектов может привести нарушение температурно-влажностного режима, увеличение полезной нагрузки или некачественно выполненный ремонт [1, 2].

Для усиления деревянных конструкций с начала 1990-х годов применяются композитные полимерные материалы на основе эпоксидной матрицы, армированной углеродными или стеклянными волокнами [3]. Они могут изготавливаться как на предприятии (ламели/ламинаты), так и

непосредственно на объекте методом пропитки (ленты, холсты, сетки, ткани). Как и древесина, являющаяся природным композитом, такие материалы обладают высокой стойкостью к коррозии и воздействию химически агрессивных сред, диэлектрическими свойствами [4, 5].

Легкость композитов в сочетании с высокой прочностью на растяжение и жесткостью позволяет избежать создания дополнительных нагрузок на фундамент. Малые размеры сечения элементов усиления и щадящий характер производимых операций способствуют максимальному сохранению целостности, формы и габаритов существующих конструкций [6]. При этом не происходит изменения статической схемы их работы и уменьшения полезного пространства помещения. Эти качества являются особенно востребованными при реставрации и реконструкции объектов культурного наследия.

По сравнению с традиционными методами усиления, производство работ с использованием композитных материалов, которое может осуществляться без приостановки эксплуатации здания, является менее сложным и трудоемким. Это позволяет сократить сроки, затраты, а также количество ошибок в процессе монтажа [2, 7].

Наиболее активно композитные материалы применяются для усиления растянутой зоны изгибаемых деревянных балок. Основные схемы внешнего армирования приведены на рис. 1.

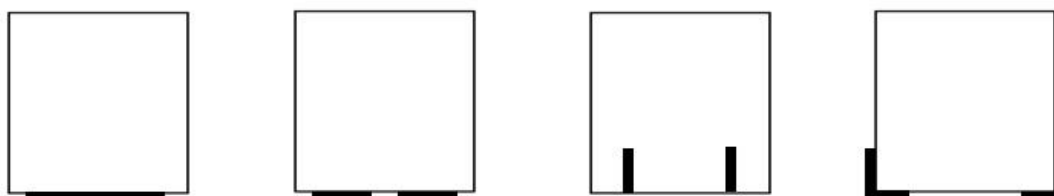


Рис. 1. – Основные схемы внешнего армирования растянутой зоны изгибаемых деревянных конструкций

Для достижения наиболее высоких эстетических качеств осуществляется установка ламелей в вертикальные пазы, что также облегчает процесс монтажа, в том числе при ограниченном доступе к конструкции, и позволяет увеличить площадь клеевого соединения [2, 8]. Однако такой способ может привести к ослаблению сечения.

Разрушение изгибаемых элементов носит хрупкий характер и в большинстве случаев происходит в середине пролета из-за разрыва растянутых волокон древесины с образованием в сжатой зоне пластических деформаций [9]. Наличие сучков в растянутой зоне вызывает концентрацию напряжений и приводит к образованию продольных трещин, при этом уменьшая несущую способность и жесткость конструкций на 30-40% [10].

Использование ламелей и тканых композитных материалов снижает влияние дефектов, восстанавливая нарушенные связи между волокнами, и останавливает развитие трещин, выявленных по результатам обследования [1]. При этом повышается пластичность в сжатой зоне элемента, что способствует более полному использованию прочностных характеристик древесины [11].

Так как большая площадь композитных материалов может затруднить испарение влаги с поверхности древесины и привести к возникновению переувлажненных участков, допускается использование ламелей и тканей только в зоне непосредственного расположения дефекта [3]. При этом минимальная длина элемента усиления должна составлять не менее трех диаметров сучка [10]. Данный метод также позволяет снизить затраты на материалы, так как относительно высокая стоимость композитов является одним из факторов, сдерживающих их широкое применение.

Для создания наиболее прочного клеевого соединения выполняется острожка элемента до чистой древесины и придается шероховатость поверхности с помощью наждачной бумаги или пескоструйной обработки.

Поверхность конструкции очищается, обезжиривается с помощью растворителя и обеспыливается. Влажность древесины в момент проведения работ не должна превышать 12% [11].

Полимерная матрица, входящая в состав композитных материалов, теряет значительную часть своих механических свойств под воздействием температуры около 100 °С. В связи с этим для защиты при пожаре поверх элементов усиления выполняется устройство дополнительного слоя из древесины, обладающей высокими теплоизоляционными свойствами.

Вопрос усиления деревянных конструкций композитными материалами требует проведения дополнительных исследований. В настоящее время в данной области имеется недостаточный объем нормативной базы. В 2007 году в Италии было разработано «Руководство по проектированию и применению систем внешнего армирования полимерными композитными материалами для усиления существующих конструкций. Деревянные конструкции» [12]. В нашей стране продолжается разработка материалов по данной тематике. В 2015 году вышла первая редакция проекта свода правил «Усиление деревянных конструкций композитными материалами. Правила проектирования», в 2018 году – проект СП «Конструкции деревянные. Правила ремонта и усиления полимерными композитами» [2].

Дальнейшего подробного изучения требуют характеристики применяемых композитных материалов, их совместная работа с конструкциями и вопросы ее моделирования в связи с выраженными анизотропными и реологическими свойствами полимеров и древесины.

Необходимы исследования долговечности усиленных элементов, так как небольшой опыт их эксплуатации не позволяет точно спрогнозировать максимальный срок службы [1].

Также требуется более подробное изучение работы конструкций при различных температурно-влажностных условиях, видах нагружения

(длительное, циклическое, повторно-статическое) и напряженно-деформированного состояния (растяжение, сжатие, сжатие с изгибом, сдвиг), использования композитных материалов в узловых соединениях.

Важным является вопрос влияния на прочность клеевого шва изменений размеров деревянного элемента (усушка и набухание) вследствие колебаний влажности [8].

Перспективными являются исследования в области повышения экологичности композитных материалов. В качестве альтернативы углеродным и стеклянным волокнам рассматриваются натуральные конопляные, льняные и бамбуковые волокна, для производства которых затрачивается меньше энергии. Выполненные на их основе композитные материалы обладают меньшей прочностью, которая может снижаться с течением времени и при использовании в неблагоприятных условиях, однако лучше работают при динамических нагрузках. Дальнейшим развитием данного направления может являться применение в качестве матрицы нетоксичного, водорастворимого и недорогого винилового клея, обладающего высокой деформационной способностью [11].

Применение композитных полимерных материалов для восстановления и усиления деревянных конструкций является активно развивающимся направлением, широко востребованным при реконструкции и реставрации существующих зданий и сооружений, в том числе имеющих высокую архитектурную и историческую ценность.

Литература

1. Schober K.U., Rautenstrauch K. Post-strengthening of timber structures with CFRP's. *Materials and Structures*, 2007, vol. 40 (1), pp. 27-35. URL: [researchgate.net/publication/227149600/](https://www.researchgate.net/publication/227149600/).

2. Салатов Е.К., Багай А.С., Белкина С.В. Усиление деревянных конструкций композитными материалами // Вестник Московского

информационно-технологического университета – Московского архитектурно-строительного института. 2021. №1. С. 21-24.

3. Линьков Н.В. Усиление деревянных конструкций с применением соединений «КМ-обклейка» // Промышленное и гражданское строительство. 2019. №3. С. 42-46.

4. Романенко И.И., Романенко М.И. Эффективное использование природного потенциала деревообрабатывающими предприятиями строительной индустрии // Инженерный вестник Дона, 2018, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4647/.

5. Shchurov E.O., Tusnin A.R. Experimental studies of steel beams reinforced with carbon plastic composites. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, vol. 869, №5. URL: researchgate.net/publication/342848636/.

6. Леонова А.Н., Акритов Х.Э. Усиление деревянных конструкций композитными материалами // Наука. Техника. Технологии. 2020. №2. С. 329-333.

7. Данилов А.И., Калугин И.А. Усиление элементов стальных конструкций с применением клеевых соединений // Инженерный вестник Дона, 2021, №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2021/6841/.

8. Ling Z., Liu W., Shao J. Experimental and theoretical investigation on shear behaviour of small-scale timber beams strengthened with Fiber-Reinforced Polymer composites. Composite Structures, 2020, vol. 240. URL: sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822319333112/.

9. Kim Y.J., Hossain M., Harries K.A. CFRP strengthening of timber beams recovered from a 32-year-old quonset: Element and system level tests. Engineering Structures, 2013, vol. 57, pp. 213-221. URL: sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029613004409/.

10. Corradi M., Vemury C.M., Edmondson V. et al. Local FRP reinforcement of existing timber beams. *Composite Structures*, 2021, vol. 258. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S026382232033289X/](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026382232033289X/).

11. Hoseinpour H., Valluzzi M.R., Garbin E. et al. Analytical investigation of timber beams strengthened with composite materials. *Construction and Building Materials*, 2018, vol. 191, pp. 1242-1251. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818324127/](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818324127/).

12. CNR-DT 201/2005. Guidelines for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. Rome – CNR, 2007. 58 p. URL: cnr.it/en/node/2637/.

References

1. Schober K.U., Rautenstrauch K. *Materials and Structures*, 2007, vol. 40 (1), pp. 27-35. URL: [researchgate.net/publication/227149600/](https://www.researchgate.net/publication/227149600/).

2. Salatov E.K., Bagay A.S., Belkina S.V. *Vestnik Moskovskogo informacionno-tehnologičeskogo universiteta Moskovskogo arhitekturno-stroitel'nogo instituta*. 2021. №1. Pp. 21-24.

3. Linkov N.V. *Promyšlennoe i graždanskoe stroitel'stvo*. 2019. №3. Pp. 42-46.

4. Romanenko I.I., Romanenko M.I. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2018, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4647/.

5. Shchurov E.O., Tusnin A.R. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 869, №5. URL: [researchgate.net/publication/342848636/](https://www.researchgate.net/publication/342848636/).

6. Leonova A.N., Akritov K.E. *Nauka, tehnika, tehnologii*. 2020. №2. Pp. 329-333.

7. Danilov A.I., Kalugin I.A. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2021, №2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2021/6841/.

8. Ling Z., Liu W., Shao J. *Composite Structures*, 2020, vol. 240. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822319333112/](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822319333112/).



9. Kim Y.J., Hossain M., Harries K.A. Engineering Structures, 2013, vol. 57, pp. 213-221. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029613004409/](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029613004409/).
10. Corradi M., Vemury C.M., Edmondson V. et al. Composite Structures, 2021, vol. 258. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S026382232033289X/](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026382232033289X/).
11. Hoseinpour H., Valluzzi M.R., Garbin E. et al. Construction and Building Materials, 2018, vol. 191, pp. 1242-1251. URL: [sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818324127/](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061818324127/).
12. CNR-DT 201/2005. Guidelines for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening existing structures. Rome. CNR, 2007. 58 p. URL: cnr.it/en/node/2637/.