

Опыт исследований зарубежных инженеров по усилению деревянных конструкций композиционными материалами

А.А. Клюкин

Национальный исследовательский московский государственный строительный университет

Аннотация: В настоящей статье приведены основные достижения зарубежной инженерной школы в области исследований и применения композитных материалов для усиления деревянных конструкций. Рассмотрены некоторые варианты армирования клееных и цельных деревянных элементов. Проанализированы результаты испытаний армированных деревянных конструкций. Отмечены ошибки, допущенные при изготовлении образцов и ходе испытаний. Сделаны выводы на основе проведенных исследований.

Ключевые слова: деревянная конструкция, предварительное напряжение, композитная балка, растянутая зона, углеродные нанотрубки, несущая способность, эпоксидная матрица, углепластик, ламель, арматура, смятие древесины.

В случаях невозможности замены элементов конструкции на новые требуется ремонт, реставрация, восстановление и, как следствие, усиление старой конструкции при ее сохранении [1]. Применение композиционных полимерных материалов с известными свойствами делает такую техническую задачу практически решаемой с наименьшими экономическими затратами. Современные композиты обладают высокой стойкостью к коррозии и воздействию химически агрессивных сред, диэлектрическими свойствами [2]. Новые высокопрочные материалы без ущерба для внешнего вида и габаритов деревянной конструкции значительно повышают ее срок эксплуатации и надежность [3,4]. Использование в балках усиление из углепластика в один слой мы получаем увеличение несущей способности при возникновении сдвига на 32,9%. А при использовании двухслойной обклейки несущая способность повышается на 68,6% [5]. Рассмотрим разработки зарубежных ученых и инженеров.

Испытания Университета природных ресурсов и естественных наук (Universität für Bodenkultur, Wien) показывают, что несущая способность при

изгибе может быть увеличена на 70%, а жесткость - на 15%. При этом доля ламелей из углепластика составит не более 0,7% сечения.

Дальнейшее улучшение характеристик может быть достигнуто за счет использования эффекта от предварительного напряжения [6]. Предварительно натянутые ламели из углепластика приклеиваются к деревянной поверхности, и деревянная балка «предварительно нагружается» в направлении, противоположном ее будущей нагрузке. На рис. 1 представлены схемы поперечного сечения несущих армированных и предварительно напряженных композитных балок.

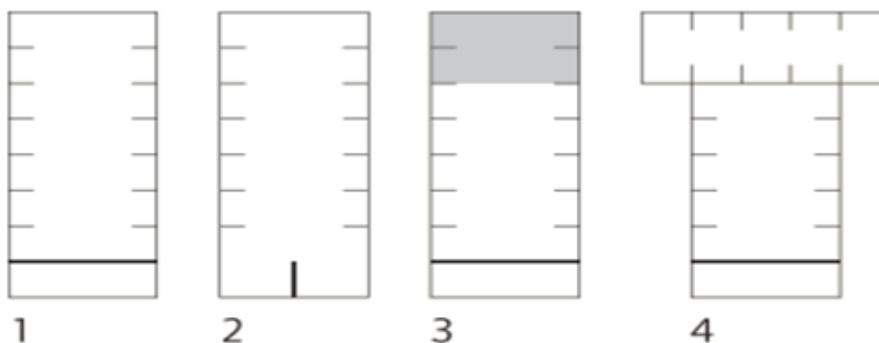


Рис. 1. – Схемы композитных балок: 1 - армирующая пластина по горизонтали между предпоследней и последней деревянными ламелями; 2 - вертикальная армирующая пластина; 3 - армирующая пластина в растянутой зоне сечения. В сжатой зоне размещаются слои древесины с повышенной прочностью; 4 - поперечное сечение тавровой балки с усилением растянутой зоны.

На рис. 2 представлена балка из армированного стекловолокном клееного бруса, с подрезкой в зоне опорного узла.

Результаты исследований Н.Ж. Влаß, М. Romani показывают, что жесткость на изгиб и несущая способность могут быть увеличены за счет усиления клееных балок ламелями из стеклопластика в растянутой зоне поперечных сечений [7, 8].



Рис. 2. – Балка из бруса, армированного стекловолокном с подрезкой в зоне опорного узла, в процессе испытаний

При усилении растянутой зоны изгибаемой балки более выражено увеличение несущей способности по критерию прочности (по первой группе предельных состояний), чем по прогибам (по жесткости, вторая группа предельных состояний) при работе на изгиб. Расчеты на изгиб по теории композитов показали хорошую сходимость со значениями, полученными в ходе испытаний. Увеличение как несущей способности, так и жесткости на изгиб зависит от количества арматуры в общем поперечном сечении, свойств материала - пластин из стеклопластика и древесины, а также от положения пластин из стеклопластика в поперечном сечении. В серии испытаний армированных балок был обнаружен явный отрыв ламелей из стеклопластика после разрушения. Этот эффект снижает несущую способность в зоне отрыва.

В совместной работе M. S. Lisyatnikov, T. O. Glebova, S. P. Ageev, A. M. Ivaniuk IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, «Прочность древесины, армированной полимерным композитом для смятия поперек волокон» [9] исследован способ упрочнения опорных зон балок рис. 3 полимерным композитом на основе стекловолокна и эпоксидной матрицы с включением в его состав углеродных нанотрубок.

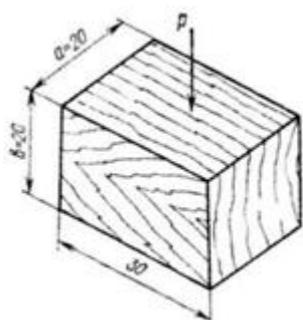


Рис.3. Образцы древесины, армированной полимерным композитом для смятия поперек волокон: а - Геометрические размеры и схема нагружения образца; б - Общий вид образцов при сжатии поперек волокон.

В результате экспериментальных исследований по разработанной авторами методике:

1. Определена степень влияния коэффициента армирования и концентрации углеродных нанотрубок на несущую способность образцов.
2. Выявлена зависимость прочности экспериментальных образцов от температуры отверждения композита на основе УНТ.
3. Получена эмпирическая зависимость, позволяющая определить разрушающую нагрузку образца в зависимости от вышеперечисленных факторов.
4. Установлено, что предел прочности армированных деревянных образцов по сравнению с неармированными (таблица №1) увеличивается при испытании на сжатие по волокнам до 39 %.

Проблему преднапряжения клееных деревянных конструкций рассматривали в диссертационной работе Zachary Christian, Kavan Shebli «Feasibility of strengthening glulam beams with prestressed basalt fibre reinforced polymers» (Возможность усиления клееных балок предварительно напряженными полимерами, армированными базальтовым волокном) [10].

В данной работе внимание уделялось не только техническим вопросам и проведению испытаний, но и усовершенствованию производства конструкций.

Таблица №1

Результаты испытаний образцов древесины, армированной полимерным композитом для смятия поперек волокон.

Sample marking	Breaking load, kN	Breaking load, kN	Increasing the strength of, %
W	2,09	3,93	-
C1(0,5-20)	2,28	4,11	11
C1(0,3-40)	2,59	4,39	9
C1(0,1-60)	2,51	4,34	15
C3(0,3-20)	2,77	4,5	16
C3(0,1-40)	2,85	4,62	13
C3(0,5-60)	3,35	4,9	28
C5(0,1-20)	2,86	4,61	17
C5(0,5-40)	3,6	5,24	30
C5(0,3-60)	3,9	5,49	39

Даны рекомендации по ускорению склейки ламелей с применением микроволнового излучения. Указано, что данный процесс изготовления конструкций подходит только для простых балок. Для гнотоклееных деревянных конструкций требуется усовершенствование данного метода и модернизация производства. В диссертации указывается на разность механических свойств базальтовых материалов в зависимости от места залегания минералов в природе. Базальтовое волокно обладает характеристиками, аналогичными характеристикам стекловолокна, но с более высокой прочностью и огнестойкостью. Дополнительными свойствами, представляющими интерес для использования в строительной промышленности, являются высокая стойкость базальтового волокна к щелочам и кислотам, что исключает риск коррозии. В работе были

исследованы свойства двух структур: сетки и ткани. При создании образцов ткань и сетка клеивались в шов между ламелями рис. 4.

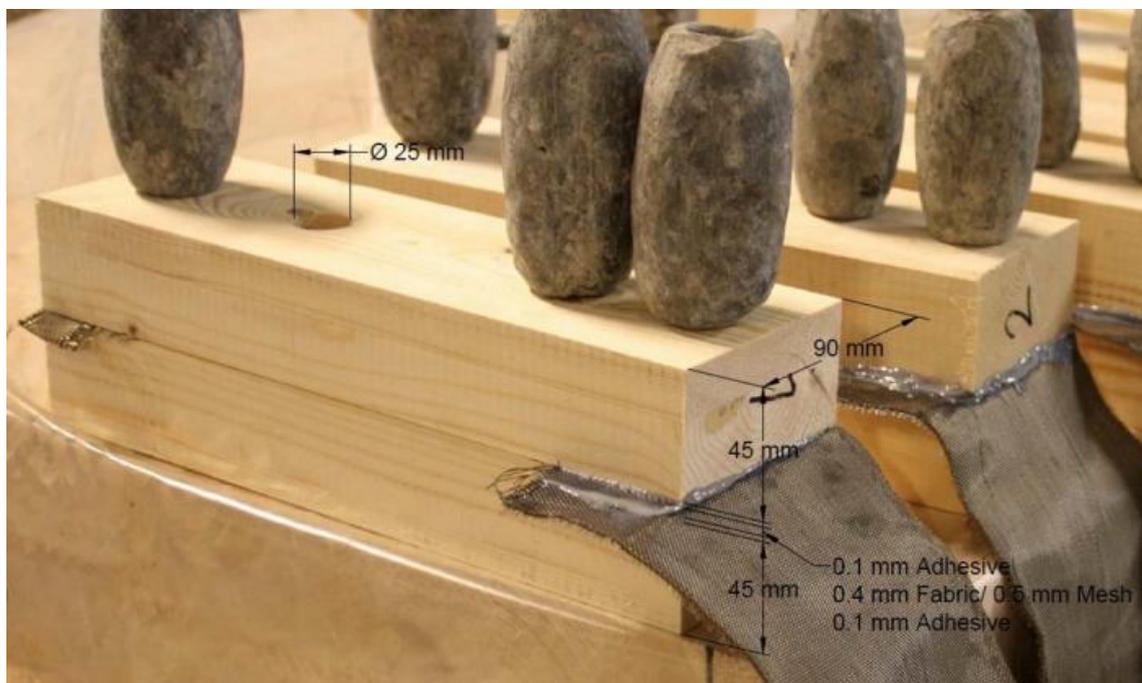


Рис. 4 - общий вид образцов

При обработке результатов испытаний выяснилось, что в клеевых слоях возникают большие деформации сдвига за счет увеличения толщины клеевого шва. Для нормальной работы шва, особенно в преднапряженных конструкциях, необходимо использовать клеевые составы с высокими механическими характеристиками. Еще одной проблемой является потенциальный риск расслоения [11]. Чтобы расслоение не происходило, нужно подбирать клей с высокими адгезионными характеристиками. При проведении испытаний не удалось достигнуть максимальных усилий в деревянных элементах, так как разрушение во всех образцах проходило по армирующему слою. В результате исследования были сделаны выводы о необходимости усовершенствования методики испытаний и оснастки.

Из рассмотренных выше работ можно сделать следующие выводы:

1. При армировании сеткой клеевых слоев существует проблема обеспечения необходимого сцепления в слоях клееных элементов.

2. Не решена проблема массового производства такого типа конструкций. На сегодняшний день это частные случаи усиления или изготовление образцов для исследований.

3. Нет данных по преднапряженным конструкциям.

4. Отсутствуют четкие регламенты и методики по проведению испытаний исследуемых конструкций.

5. Недостаточность существующих норм по вопросам проектирования деревянных конструкций, армированных сетками, тканями и другими материалами, которые устанавливаются в клеевые швы.

Литература

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

2. 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/.

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

4. 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/.

5. 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/.

6. 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.
7. Blaß H.J., Romani M. Biegezugverstärkung von BS-Holz mit CFK- und AFK-Lamellen. Bautechnik. 2002. Vol. 79. No. 4. Pp. 216—224.
8. Blaß H.J., Romani M. Tragfähigkeitsuntersuchungen an Verbundträgern aus BS-Holz und Faserverbundkunststoff-Lamellen. European Journal of Wood and Wood Products. 2001. Vol. 59. No. 5. Pp. 364—373.
9. Lisyatnikov M. S., Glebova T. O., Ageev S. P., Ivaniuk A. M., Strength of wood reinforced with a polymer composite for crumpling across the fibers. IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 896. No. 8. URL: libgen.ggfwws.net/book/84486144/7c11d1.
10. Christian Z., Shebli K. Feasibility of strengthening glulam beams with prestressed basalt fibre reinforced polymers. Gothenburg. Chalmers University of Technology. 2012. 114 p. URL: hdl.handle.net/20.500.12380/162909.
11. Togay, A., Döngel, N., Söğütlü, C., Ergin, E., Uzel, M., and Güneş, S. Determination of the modulus of elasticity of wooden construction elements reinforced with fiberglass wire mesh and aluminum wire mesh. Bioresources. 2017. Vol. 12(2). URL: bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/determination-of-the-modulus-of-elasticity-of-wooden-construction-elements-reinforced-with-fiberglass-wire-mesh-and-aluminum-wire-mesh/.

References

1. Leonova A.N., Akritov K.E. Nauka, tehnika, tehnologii. 2020. №2. Pp. 329- 333.
 2. Shchurov E.O., Tusnin A.R. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, vol. 869, №5. URL: researchgate.net/publication/342848636/.
-



3. Linkov N.V. Promyshlennoe i graždanskoe stroitel'stvo. 2019. №3. Pp. 42- 46.
4. 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/).
5. Romanenko I.I., Romanenko M.I. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №1 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4647/.
6. Salatov E.K., Bagay A.S., Belkina S.V. Vestnik Moskovskogo informacionno-tehnologičeskogo universiteta Moskovskogo arhitekturno-stroitel'nogo instituta. 2021. №1. Pp. 21-24.
7. Blaß H.J., Romani M. Bautechnik. 2002. Vol. 79. No. 4. Pp. 216—224.
8. Blaß H.J., Romani M. European Journal of Wood and Wood Products. 2001. Vol. 59. No. 5. Pp. 364—373.
9. Lisyatnikov M. S., Glebova T. O., Ageev S. P., Ivaniuk A. M., IOP Conference Series Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 896. No. 8. URL: libgen.ggfwws.net/book/84486144/7c11d1.
10. Christian Z., Shebli K. Gothenburg. Chalmers University of Technology. 2012. 114 p. URL: hdl.handle.net/20.500.12380/162909.
11. Togay, A., Döngel, N., Söğütlü, C., Ergin, E., Uzel, M., Güneş, S. Bioresources. 2017. Vol. 12(2). URL: bioresources.cnr.ncsu.edu/resources/determination-of-the-modulus-of-elasticity-of-wooden-construction-elements-reinforced-with-fiberglass-wire-mesh-and-aluminum-wire-mesh/.