

Армирование клееных деревянных элементов кружально-сетчатого свода.

С.А. Исупов, И.С. Шульгин, Е.А. Носов

Вятский государственный университет

Аннотация: В статье приведены результаты исследования применения армирования в клееных деревянных элементах кружально-сетчатого свода. Применение армирования в плоских деревянных конструкциях уже достаточно хорошо себя зарекомендовало, однако до сих пор остается малоисследованной возможность применения армирования в большепролетных пространственных конструкциях. В предлагаемой работе выполнен численный эксперимент по сравнению различных вариантов армирования элементов кружально-сетчатого свода. Рассматривалось десять вариантов внешнего и внутреннего армирования элементов различными материалами. В результате анализа распределения напряжений в сечении элементов было выявлено, что внешнее армирование является более приоритетным способом армирования с точки зрения напряженно деформируемого состояния элемента. Наиболее целесообразным решением с точки зрения материалоемкости, экономической эффективности и коррозионной стойкости является внутреннее армирование углекомпозитной арматурой.

Ключевые слова: Кружально-сетчатый свод, клееная древесина, армирование древесины, композитная арматура, внешнее армирование, численный анализ напряжений, экономическая эффективность армирования.

Введение

Применение армирования в плоских рамных деревянных конструкциях достаточно хорошо себя зарекомендовало как эффективный способ снижения расхода древесины и, как следствие, снижения себестоимости. Однако до сих пор остается малоисследованной возможность применения армирования в деревянных элементах большепролетных пространственных конструкций. Пространственные деревянные конструкции пользуются большим спросом в развитых странах, поскольку совмещают несущие и ограждающие функции и выполняются из экологически чистых материалов.

В последние годы было проведено значительное количество исследований эффективности армирования древесины, однако отсутствие установленных правил проектирования сдерживает широкое применение такого рода усиления, и ни один из существующих методов армирования не достиг полной коммерциализации [1]. В целом, по данным ряда публикаций

[2, 3], эффект от армирования древесины заключается в снижении стоимости конструкции (на 20-25%) и уменьшении массы конструкций (на 25%), сокращении расхода древесины (в 1,5-2 раза).

Поднимается вопрос разработки современных инновационных методов моделирования работы связи арматуры с древесиной [4]. Рассматриваются следующие способы армирования [5]: армирование поперечного сечения арматурными стержнями (внутреннее армирование), приклейка композитной ткани на растянутые волокна (внешнее армирование), приклейка композитной ткани между слоями древесины в швах клееных конструкций (внутреннее армирование), клейка композитной ткани в предварительно подготовленные пропилы (метод приповерхностного клеивания), устройство обоймы из композитной ткани.

Для закрепления клеенных стержней обычно применяются клеевые композиции на основе эпоксидной смолы, полиуретана и фенол-резорцина. Авторы исследования [6] выяснили, что клеевое соединение с эпоксидной смолой способно выдерживать наибольшую осевую нагрузку. А исследования [7, 8] подтвердили, что клеи на основе эпоксидной смолы обеспечивают очень хорошую адгезию клеенных стержней к древесине. Испытания [9] говорят о том, что эпоксидные клеи марок EP20, EP32, инъекционный состав FIS EM, а также клей на основе каучуков и феноловых смол марки Wü500 дают наивысшую прочность соединения.

Испытания [10, 11] армированной композитной арматурой клееной балки показали прирост несущей способности на 29,04-39,0 %, жесткости на 9,7-27,0 %, пластичности на 9,87 %. Исследование [12] показало, что применение инновационного полимерного волокна Vectran-FRP для внешнего армирования дает увеличение жесткости на 19,48–34,95 % и предельной нагрузки на 7–40 %. Авторы статьи [13] утверждают, что внешнее армирование стеклотканью повышает несущую способность балок

на 34-56 % и уменьшает деформативность на 24-42 %. В то же время результаты одного из исследований [14] балки с армированием растянутой зоны полимерной композитной арматурой показали, что несущая способность увеличивается незначительно.

Следовательно, ввиду наличия достаточно противоречивых данных по отношению увеличения несущей способности и жесткости армированных деревянных элементов, существует необходимость дополнительных исследований с целью выявления наиболее эффективного способа армирования и вида арматуры, в частности, для клееных элементов пространственных конструкций.

Численное теоретическое исследование

Для реализации целей исследования, в программном комплексе ЛИРА-САПР была сформирована пространственная конечноэлементная стержневая система кружально-сетчатого свода пролетом 48 метров (рис. 1) и выполнен статический расчет для определения внутренних силовых факторов N , M , Q и перемещений.

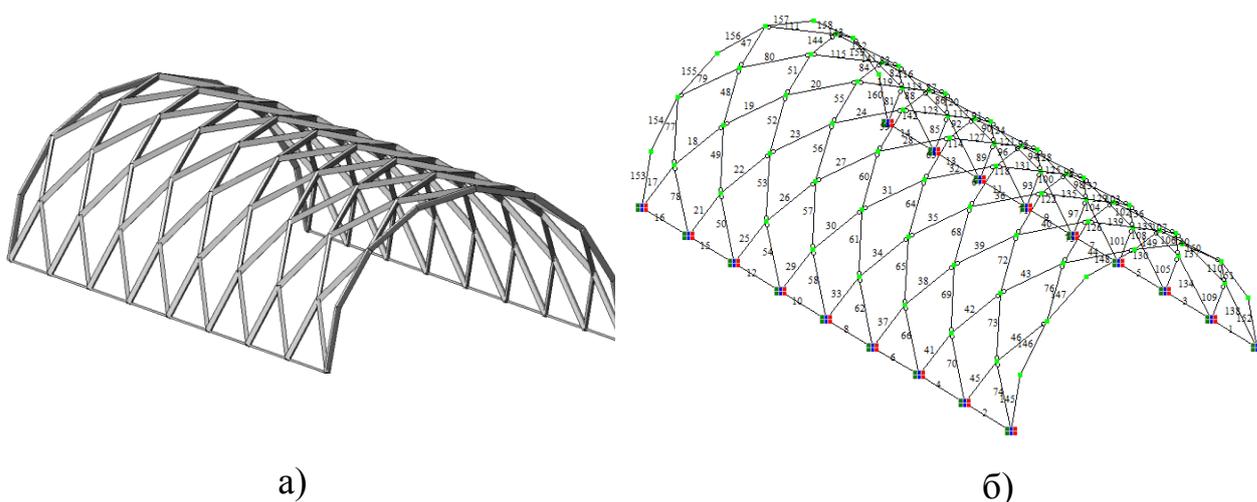


Рис. 1. – Модель конструкции: а) трехмерная; б) конечноэлементная.

В результате анализа напряженно деформированного состояния конструкции было установлено, что изгибающие моменты меняют свой знак

от основания свода к вершине, что необходимо учитывать при выборе вида внутреннего и внешнего армирования для пространственной конструкции.

Все элементы конструкции для рационального назначения сечений были разбиты на четыре группы в зависимости от величины действующих усилий. Был произведен конструктивный расчет отобранных деревянных элементов целого клееного поперечного сечения и армированных различными способами.

В качестве армирующего материала задавались 10-ю различными вариантами армирования: стальная арматура А300, стеклокомпозитная арматура (АСК), базальтокомпозитная арматура (АБК), углекомпозитная арматура (АУК), аромидокомпозитная арматура (АСК), комбинированная арматура (АКК), сетки из углеволокна, стекловолокна, ламели из углеволокна, стекловолокна.

Рассматривалось два способа армирования: внутреннее (вклеивание стержней в пазы в направлении главных напряжений) и внешнее (наклеивание на растянутую зону четырех слоев композитного материала).

В ходе анализа результатов расчета было установлено, что определяющим параметром при подборе сечения армированного клееного элемента является не столько обеспечение прочности, сколько величина полного прогиба. Величину прогиба можно регулировать как увеличением высоты сечения элемента, так и количеством арматуры.

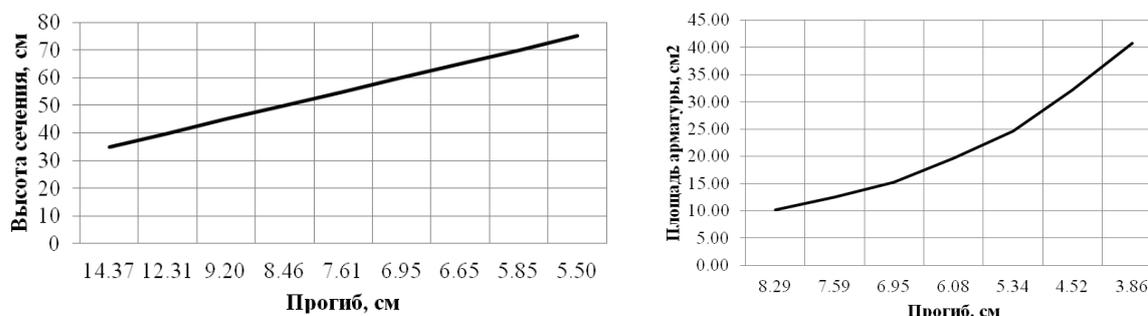


Рис. 2. – Графики зависимости прогиба от высоты сечения и площади арматуры

Зависимость прогиба от высоты сечения имеет линейный характер, а зависимость от количества арматуры – параболический характер (рис. 2). Приведенные графики удобно использовать для предварительного назначения высоты сечения. После множества расчетных итераций была определена наиболее эффективная схема размещения внутренней арматуры в сечении – по три прутка в растянутой и сжатой зонах сечения.

С целью выявления целесообразности использования внешнего и внутреннего армирования выполнены расчеты по распределению нормальных σ и касательных напряжений τ по длине наиболее нагруженного элемента в трех вариантах исполнения: из цельной древесины, с внутренним армированием углекомпозитной арматурой (АУК), с внешним армированием стеклопластиковыми ламелями. КЭ-модель формировалась из объемных конечных элементов с характеристиками: клееная древесина – $E = 1,285e+004$ МПа; $\nu = 0,45$; $R_0 = 0,5$ т/м³; АУК – $E = 1,3e+005$ МПа; $R_0 = 1,6$ т/м³; стеклопластиковые ламели – $E = 1,5e+004$ МПа; $\nu = 0,22$; $R_0 = 2,0$ т/м³. Основные результаты расчета приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Распределение напряжений по длине элемента.

| Вариант исполнения | Вид НДС | Изополя напряжений элементов, L = 22,11 м. |
|--------------------|----------------|--------------------------------------------|
| 1 | 2 | 3 |
| Цельная древесина | σ , МПа | |
| | τ , МПа | |

Продолжение таблицы 1

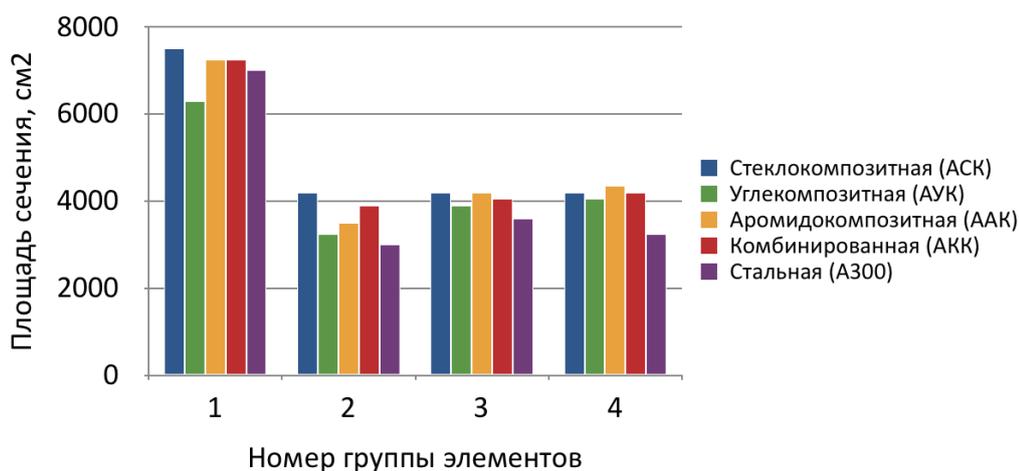
| 1 | 2 | 3 |
|---------------------------------------|----------------|---|
| Армирование углекомпозитной арматурой | σ , МПа | |
| | τ , МПа | |
| Внешнее армирование стеклопластиком | σ , МПа | |
| | τ , МПа | |

По результатам сравнения расчетов можно сделать следующие выводы:

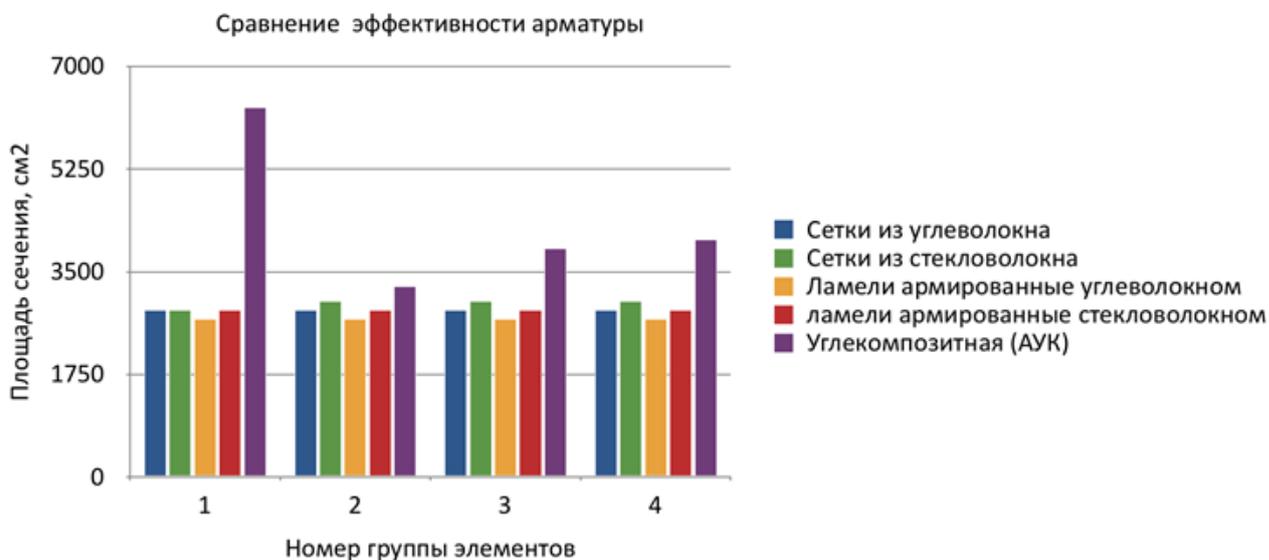
- введение внутренней арматуры не приводит к снижению максимальных нормальных и касательных напряжений;
- применение внешнего армирования способствует уменьшению нормальных напряжений в крайних волокнах сечения в сжатой и растянутой зонах примерно в два раза, однако, также возникают зоны концентрации напряжений в растянутой зоне сечения;
 - элемент с внутренним армированием имеет меньшую зону развития касательных напряжений вдоль продольной оси X, по сравнению с элементами цельного сечения и усиленных внешним армированием;
 - распределение нормальных напряжений по сечению элемента с внешним усилением имеет волнообразный характер → напряжения принимают свои минимальные значения в крайних растянутых и сжатых волокнах сечения, тогда как для элемента из цельной древесины напряжения в крайних волокнах имеют максимальное значение.

Технико-экономическая оценка результатов

В результате проведенных расчетов были получены поперечные сечения выбранных элементов свода с рассматриваемыми вариантами армирования и выполнено технико-экономическое сравнение для наружного и внутреннего армирования с различными материалами. Сравнение размеров полученного сечения элемента приведено в виде диаграмм, рис. 3.



а)



б)

Рис. 3 – Сравнение: а) эффективности стержневой арматуры; б) эффективности систем внешнего армирования и стержневой арматуры

Как видно из диаграмм, среди всех видов стержневой арматуры минимальный расход древесины обеспечивает стальная арматура. Из

различных видов композитной арматуры минимальный расход древесины обеспечивает углекомпозитная арматура. Но стальная и углекомпозитная арматура проигрывают любому из видов внешнего армирования по получаемой площади поперечного сечения элементов. Минимальный расход древесины среди всех способов армирования и видов арматуры обеспечивает внешнее армирование углекомпозитными ламелями.

Сравнение стоимости 1 погонного метра элемента конструкции, выполненного с применением армирования разными видами арматуры, показано на рис. 4.

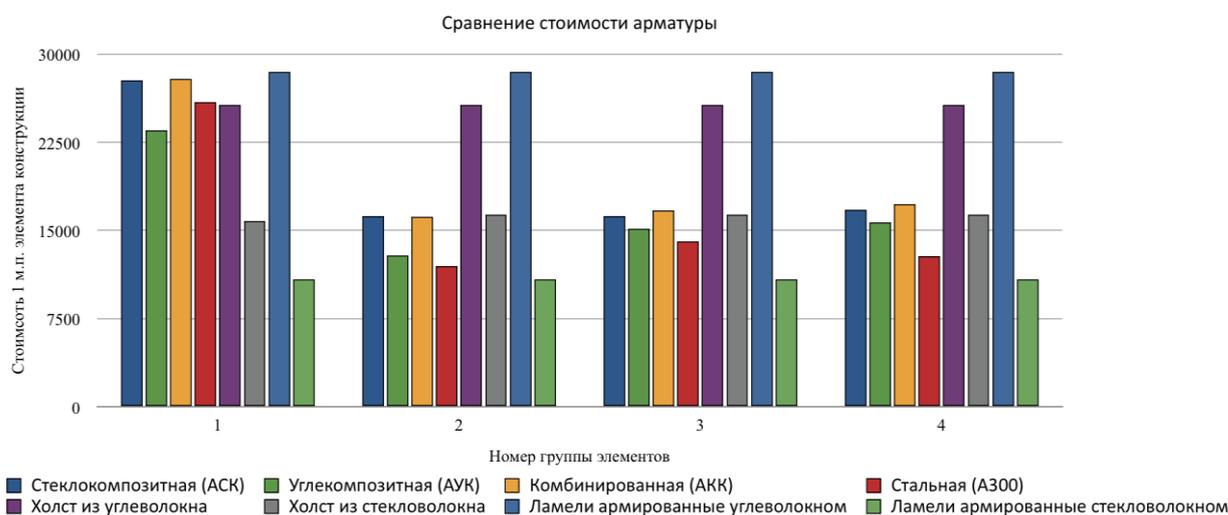


Рис. 4 – Сравнение стоимости п. м. конструкции с арматурой разных видов

Как видно из диаграммы, минимальную стоимость конструкции с применением внутреннего армирования обеспечивает стальная арматура, а с применением внешнего армирования – ламели, армированные стекловолокном. Также вполне сопоставимую со стальной арматурой стоимость имеет углекомпозитная арматура. Средняя экономия для элемента со стальной арматурой по сравнению с элементом целого сечения составляет на 1 погонный метр 6615,1 руб., для углекомпозитной арматуры 6011,25 руб., для стеклопластиковых ламелей 11987,47 руб.

Выводы

На примере расчета кружально-сетчатого свода подтверждена эффективность применения армирования в клееных деревянных элементах.

Применение армирования в деревянных клееных элементах обеспечивает значительное увеличение несущей способности и жесткости элементов, снижение нормальных и касательных напряжений, уменьшение деформативности конструкции в целом.

Армированные элементы получают существенно менее материалоемкими и, как следствие, более экономичными.

Среди всех способов внешнее армирование стеклопластиковыми ламелями является наиболее оптимальным. Однако, подверженность системы внешнего усиления действию агрессивных факторов внутренней среды помещения, ограничивает возможность её применения. Таким образом, с практической точки зрения более целесообразным решением можно считать способ внутреннего армирования углекомпозитной арматурой.

Литература

1. Plevris N., Triantafillou T. C. FRP-Reinforced Wood as Structural Material // *Materials in Civil Engineering*. 1992. №4. pp. 300-317.
2. Кавелин А.С., Тютина А.Д., Нуриев В.Э., Колтакова В.А. Армирование деревянных конструкций // *Инженерный вестник Дона*, 2019, № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2019/6156.
3. Потапова Т.В. Усиление CLT-панелей композитными материалами // *Инженерный вестник Дона*, 2023, № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8572
4. Schober K.U., Harte A.M., Kliger R., Jockwer R., Xu Q., Chen J.F. FRP reinforcement of timber structures // *Construction and Building Materials*. 2015. №97. pp. 106-118.

5. Дунникова О.В. Использование композитных материалов для армирования деревянных конструкций // Научные и инновационные проекты и инициативы молодежи Беларуси и Китая: сборник материалов конференции в рамках Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума "Новые горизонты - 2014". Минск: БНТУ, 2015. С. 37-38.

6. Aicher S., Gustafsson P., Wolf M. Load displacement and bond strength of glued-in rods in timber influenced by adhesive, wood density, rod slenderness and diameter // Proceedings 1st RILEM Symposium on timber engineering. Stockholm: 1999. pp. 369-378.

7. Broughton J., Hutchinson A. Adhesive systems for structural connections in timber // International Journal of Adhesion and Adhesives. 2001. №21. pp. 177-186.

8. Bainbridge R., Mettem C., Harvey K., Ansel M. Bonded in rod connections for timber structures—development of design methods and test observations // International Journal of Adhesion and Adhesives. 2002. №22. pp. 47-59.

9. Grunwald C., Vallée T., Fecht S., Bletz-Mühldorfer O., Diehl F., Bathon L., Walther F., Scholz R., Myslicki S. Rods glued in engineered hardwood products part I: Experimental results under quasi-static loading // International Journal of Adhesion and Adhesives. 2019. №90. pp. 163-181.

10. Wdowiak-Postulak A. Numerical, theoretical and experimental models of the static performance of timber beams reinforced with steel, basalt and glass pre-stressed bars // Composite Structures. 2023. №305 URL: doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116479.

11. Jobin J. Flexural Strengthening of Glued Laminated Timber Beams with Steel and Carbon Fiber Reinforced Polymers: Master's Thesis Civil and Environmental Engineering: Steel and Timber Structures. Göteborg. 2007. 152 p.

12. Donadon B.F., Mascia N. T., Vilela R., Trautwein L. M. Experimental investigation of glued-laminated timber beams with Vectran- FRP reinforcement // Engineering Structures. 2020. №202. pp. 1-11.

13. Попова М.В., Шохин П.Б., Глебова Т.О., Шабардина Н.Д. Особенности инженерного расчета деревокомпозитных конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. №8. С. 36-43.

14. Zhang X., Zhang Y., Xie X. Experimental and analytical investigation of the flexural behaviour of stiffened hollow glulam beams reinforced with fibre reinforced polymer // Structures. 2023. №50. pp. 810-822.

References

1. Plevris N., Triantafillou T. C. Materials in Civil Engineering. 1992. №4. pp. 300-317.

2. Kavelin A.S., Tyutina A.D., Nuriev V.E., Koltakova V.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, № 8. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n8y2019/6156.

3. Potapova T.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2023, № 7. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n7y2023/8572.

4. Schober K.U., Harte A.M., Kliger R., Jockwer R., Xu Q., Chen J.F. Construction and Building Materials. 2015. №97. pp. 106-118.

5. Dunnikova O.V. Nauchnye i innovacionnye proekty i iniciativy molodezhi Belarusi i Kitaya: sbornik materialov konferencii v ramkah Belorussko-Kitajskogo molodezhnogo innovacionnogo foruma "Novye gorizonty - 2014": trudy. Minsk: 2015. pp. 37-38.

6. Aicher S., Gustafsson P., Wolf M. Load displacement and bond strength of glued-in rods in timber influenced by adhesive, wood density, rod slenderness and diameter. Proceedings 1st RILEM Symposium on timber engineering. Stockholm: 1999. pp. 369-378.

7. Broughton J., Hutchinson A. International Journal of Adhesion and Adhesives. 2001. №21. pp. 177-186.



8. Bainbridge R., Mettem C., Harvey K., Ansel M. International Journal of Adhesion and Adhesives. 2002. №22. pp. 47-59.
9. Grunwald C., Vallée T., Fecht S., Bletz-Mühldorfer O., Diehl F., Bathon L., Walther F., Scholz R., Myslicki S. International Journal of Adhesion and Adhesives. 2019. №90. pp. 163-181.
10. Wdowiak-Postulak A. Composite Structures. 2023. №305. URL: doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116479.
11. Jobin J. Flexural Strengthening of Glued Laminated Timber Beams with Steel and Carbon Fiber Reinforced Polymers: Master's Thesis Civil and Environmental Engineering: Steel and Timber Structures. Göteborg, 2007. 152 p.
12. Donadon B.F., Mascia N.T., Vilela R., Trautwein L.M. Engineering Structures. 2020. №202. pp. 1-11.
13. Popova M.V., Shohin P.B., Glebova T.O., Shabardina N.D. Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova. 2018. №8. pp. 36-43.
14. Zhang X., Zhang Y., Xie X. Structures. 2023. №50. pp. 810-822.