

УДК 692.484

2.1.1 Строительные конструкции, здания
и сооружения (технические науки)

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ДЕРЕВЯННОЙ БАЛКИ, АРМИРОВАННОЙ СТАЛЬНЫМИ ПЛАСТИНАМИ

В. Ф. Бай, С. А. Еренчинов, Е. А. Гач
Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

STUDY OF THE OPERATION OF A WOODEN BEAM REINFORCED WITH STEEL PLATES

Vladimir F. Baj, Sergey A. Erenchinov, Evgeniy A. Gach
Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Аннотация. Описаны основные проблемы проектирования армированных деревянных конструкций, связанные с обоснованием их надежности. Поставлены и выполнены задачи по исследованию работы деревянной армированной балки с учетом нелинейной работы древесины. В качестве объекта использовалась балочная конструкция, армированная в сжатой и растянутой зоне пластинчатыми элементами. Для достижения целей исследования было проведено экспериментальное исследование с применением тензометрического оборудования, численное моделирование конструкции в ПК ANSYS и аналитический расчет. На основании полученных результатов сделаны выводы об эффективности применения пластинчатого армирования в деревянных балках. Полученные результаты можно использовать в проектировании, а разработанную конструкцию применять в элементах стропильных конструкций и в качестве балок перекрытия.

Abstract. The article describes the main problems of engineering reinforced wooden structures associated with the justification of their reliability. Tasks to study the operation of a wooden reinforced beam taking into account the nonlinear operation of wood have been set and solved. A girder structure reinforced in the compressed and tensile zones by plate elements was used as the object of the research. To achieve the aims, the authors carried out an experimental study using strain-gauge equipment, numerical simulation of the structure in the ANSYS PC and analytical calculations. Based on the results, conclusions about the effectiveness of steel plate reinforcement in wooden beams have been made. The results can be applied in the engineering, and the developed structure can be used as the elements of the frame structures and as floor beams.

Ключевые слова: деревянная балка, армирование деревянной балки, балочная конструкция, ПК ANSYS, экспериментальное исследование, прогиб балки, моделирование деревянной конструкции

Key words: wooden beam, wooden beam reinforcement, beam structure, PC ANSYS, experimental research, beam deflection, modelling of wooden structure

Для цитирования: Бай, В. Ф. Исследование работы деревянной балки, армированной стальными пластинами / В. Ф. Бай, С. А. Еренчинов, Е. А. Гач. – DOI 10.31660/2782-232X-2023-2-46-53. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 2 (104). – С. 46–53.

For citation: Baj, V. F., Erenchinov, S. A., & Gach, E. A. (2023). Study of the operation of a wooden beam reinforced with steel plates. Architecture, Construction, Transport, (2(104)), pp. 46-53. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-2-46-53.

Введение

Несмотря на активное развитие деревянных конструкций, в том числе армированных, и большое количество посвященных различным аспектам этой темы работ [1–7], в России до сих пор не разработан стандарт для их проектирования. Соответственно, чтобы применить такую конструкцию в строительстве, требуется проведение экспериментов и испытаний для подтверждения ее надежности, что неэффективно для строительного проектирования. Возможным путем решения данной проблемы является моделирование конструкций в программных комплексах с применением метода конечных элементов. Данный метод позволяет учитывать не только нелинейное поведение материала, но и начальные несовершенства (пороки, прогибы, повреждения при изготовлении), которые могут значительно влиять на несущую способность конструкции. Вопросу применения пластинчатого армирования посвящена работа [8], в ней рассмотрены преимущества такого способа армирования по сравнению с применением стержневой арматуры круглого сечения [9]. Для численного моделирования в данной работе использовался ПК ANSYS, при моделировании задавалась линейная схема работы материала, но на разных участках балки задавались разные модули упругости, что имитировало нелинейную работу материала. В рамках настоящего исследования будет применяться более точный метод анализа, при котором мате-

риалу изначально присваиваются нелинейные свойства. Таким образом, для дальнейшего изучения возможности применения программных комплексов при расчете армированных деревянных конструкций актуальным является разработка методики моделирования в программном комплексе типа ПК ANSYS.

Объект и методы исследования

Цель данной статьи – исследовать работу деревянной балки, армированной стальными пластинами, с учетом нелинейной работы древесины и оценить эффективность применения пластинчатого армирования в деревянных конструкциях.

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести испытание армированной балки, построить графики зависимости деформаций от нагрузки;
- на основе результатов испытания провести численное моделирование данной конструкции в ПК ANSYS;
- провести численное моделирование аналогичной балки без армирующих элементов.

Методологической основой служит комбинация экспериментального исследования и численного моделирования.

Объектом исследования является деревянная армированная балка (БА) из сосны 3-го сорта 2 060 × 140 × 98 мм. Армирование выполнено из

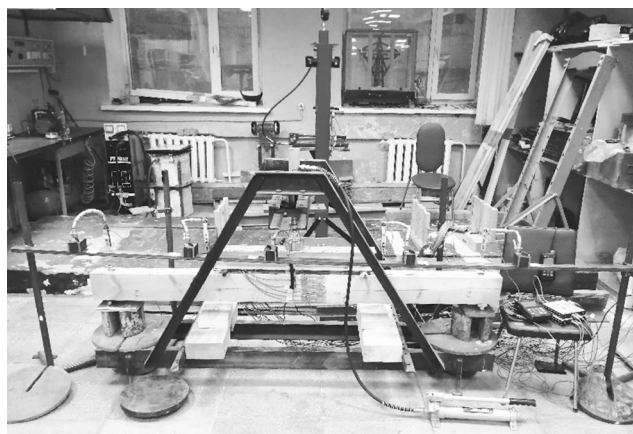


Рис. 1. Испытательный стенд
Fig. 1. Test stand

холоднокатаной стальной пластины СтЗпс в виде швеллера в растянутой и сжатой зоне. Для соединения армирующего элемента с брусом был использован клей БФ-2. При проведении эксперимента для регистрации перемещений использовались тензодатчики ДПЛ-50 и ДПЛ-100, показания снимал прибор ТЕРЕМ-4.1.

Экспериментальная часть

Нагрузка на балку передается через траверсу (рис. 1), в участках приложения нагрузки и в опорах, в качестве прокладок размещены пластины для устранения эффекта местного смятия.

Для регистрации прикладываемой нагрузки используется динамометр ДИН-1. Нагрузка подается через гидравлический домкрат. Деформации перемещения регистрируются датчиками ДПЛ-50 на опорах и ДПЛ-100 в местах приложения нагрузки и в пролете. Нагрузка прикладывается ступенями по 300 кг, каждая ступень выдерживается до момента стабилизации деформаций от ползучести материала, но не менее 15 и не более 45 минут. Всего было приложено 13 ступеней. Влажность балки при испытании составила 8,3 %.

В процессе испытания со ступени № 2 до ступени № 8 происходило локальное разрушение клея на правой опоре в сжатой зоне (рис. 2), на левой опоре аналогичная ситуация не наблюдалась.

Первые проявления ползучести древесины начали прослеживаться на ступени № 3, т. е. при нагрузке в 900 кг. При достижении ступени № 8

начали усиливаться трески в районе правой опоры, при дальнейшем поддержании нагрузки произошел резкий разрыв связи между вклеенной пластиной и массивом бруса. При дальнейшем нагружении аналогичная ситуация произошла на ступени № 11, в правой сжатой зоне балки наблюдалось локальное разрушение клея между армирующей пластиной и телом балки до места передачи нагрузки на балку. При достижении ступени № 12 (нагрузка 3 600 кг) произошел разрыв нижнего волокна деревянного массива (рис. 3),

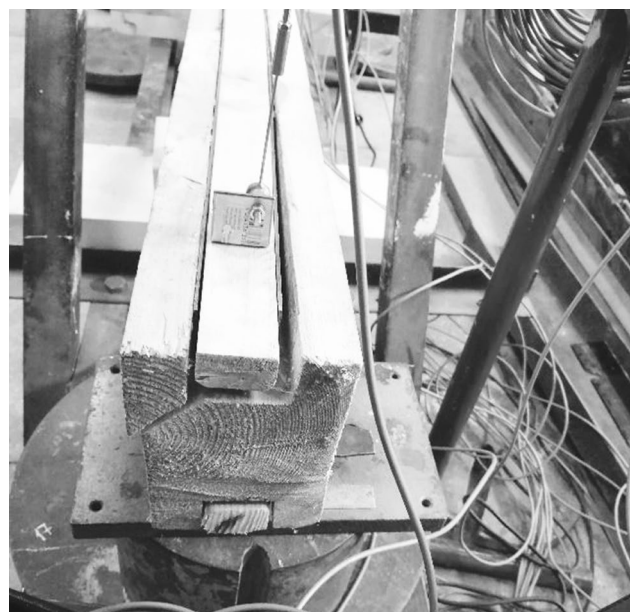


Рис. 2. Местное разрушение клеевого соединения
Fig. 2. Local destruction of the adhesive joint

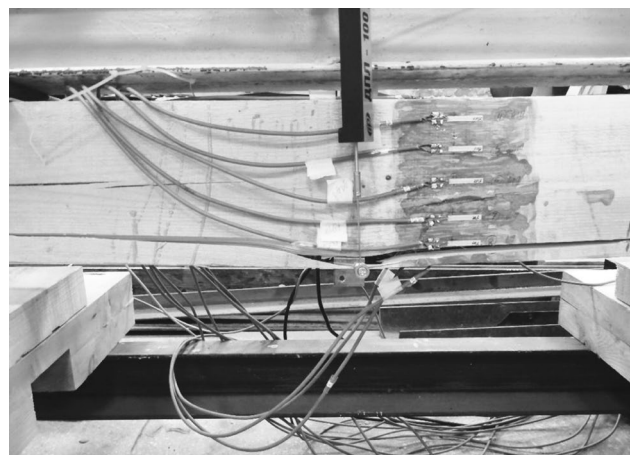


Рис. 3. Разрыв нижнего волокна армированной балки
Fig. 3. Breaking of the bottom fiber of the reinforced beam

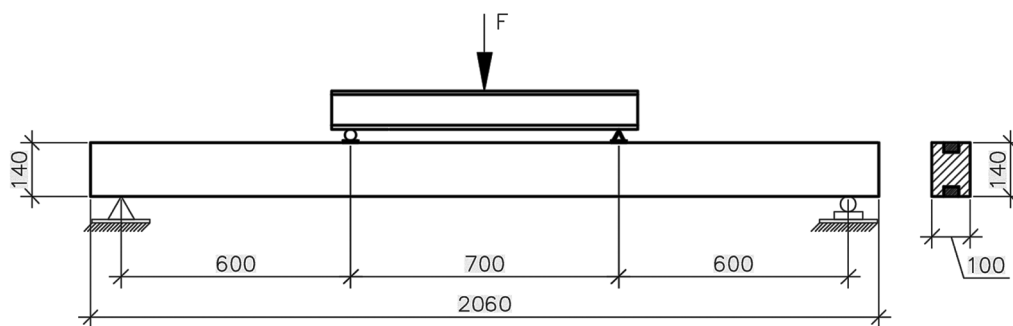


Рис. 4. Конструктивная схема испытательного стенда армированной балки
Fig. 4. Structural scheme of the test stand of the reinforced beam

однако при дальнейшем нагружении балка продолжила нести нагрузку. Разрушение конструкции произошло из-за потери устойчивости.

Для теоретического расчета армированной балки использовался расчет по методике В. Ю. Щуко [10], расчетная прочность древесины принята в соответствии с таблицей 3 СП 64.13330.2017¹ для материала сосна 3 сорта.

Расчетная схема – аналогичная лабораторному эксперименту (рис. 4), то есть шарнирно опертая балка с двухточечным нагружением (рис. 5). При заданных размерах сечения (рис. 6) и характеристиках максимальная нагрузка на одну точку приложения составляет 1 430 кг, максимальный прогиб в середине пролета получился равным 15,01 мм.

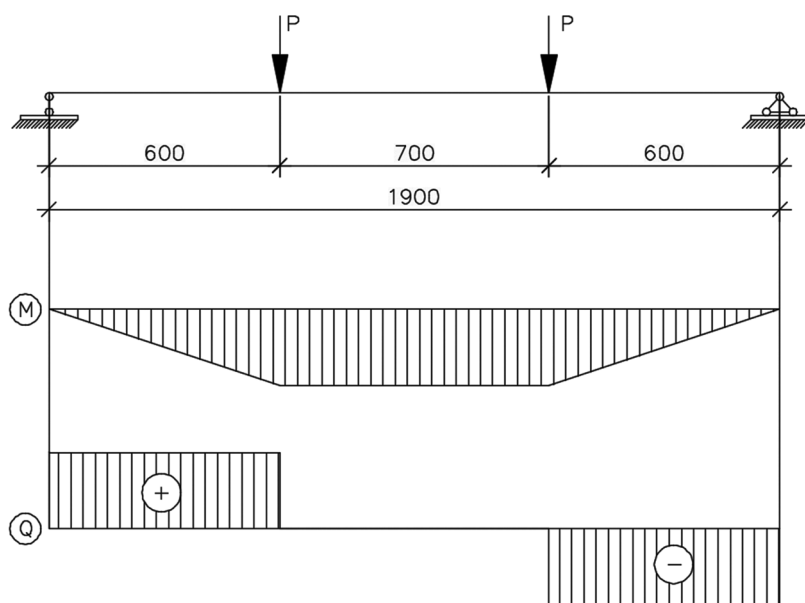


Рис. 5. Расчетная схема армированной балки
Fig. 5. Calculation scheme of the reinforced beam

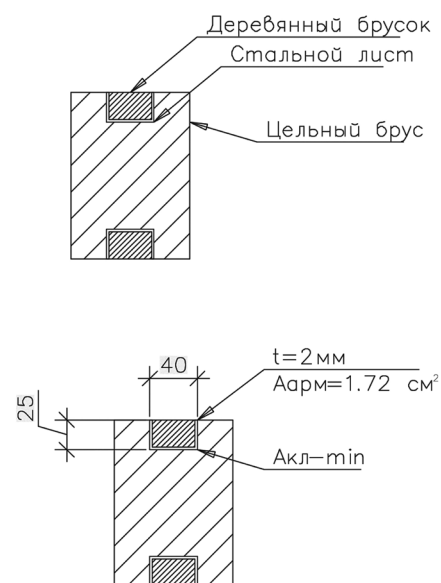


Рис. 6. Элементы сечения армированной балки
Fig. 6. Elements of the reinforced beam section

¹ Деревянные конструкции = Timber structures : СП 64.13330.2017 : актуализированная редакция СНиП II-25-80 : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 27 февраля 2017 г. № 129/пр : введен в действие 28 августа 2017 г. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456082589> (дата обращения: 20.04.2023).

Результаты

На рис. 7 представлен график испытания балки, на котором отражена зависимость перемещения в середине пролета от нагрузки по экспериментальным данным, аналитическому расчету и результатам моделирования. По графику видно, что до нагрузки 1 800 кг прослеживается линейная зависимость между нагрузкой и деформацией, этой ступени соответствует перемещение равное 5,20 мм. При нагрузке в 3 600 кг в крайнем растянутом волокне балки произошел разрыв, но разрушения конструкции не произошло, центральная армированная часть балки продолжила нести нагрузку.

Обсуждение

Результаты численного моделирования армированной и неармированной балки отражены в таблице 1 и на графике зависимостей деформаций от нагрузки для экспериментальных, аналитических и компьютерных данных (рис. 7).

Как видно из рис. 7, результаты численного моделирования и экспериментальные данные повторяют характер друг друга, максимальное значение прогиба при эксперименте составило 23,23 мм, при компьютерном моделировании – 25 мм. Таким образом, примененный метод моделирования можно считать достоверным, сходимость результатов 92,9 %. При аналитическом расчете максимальный прогиб балки составил 15,01 мм, что на 35,4 % меньше реального результата. При численном моделировании неармированной балки максимальный прогиб составил 29,78 мм, что превышает аналитический расчет на 20,64 %.

Сравнение результатов армированной и неармированной конструкции (рис. 8) показало, что балка, в которой применено пластинчатое армирование, эффективнее на 16,1 %.

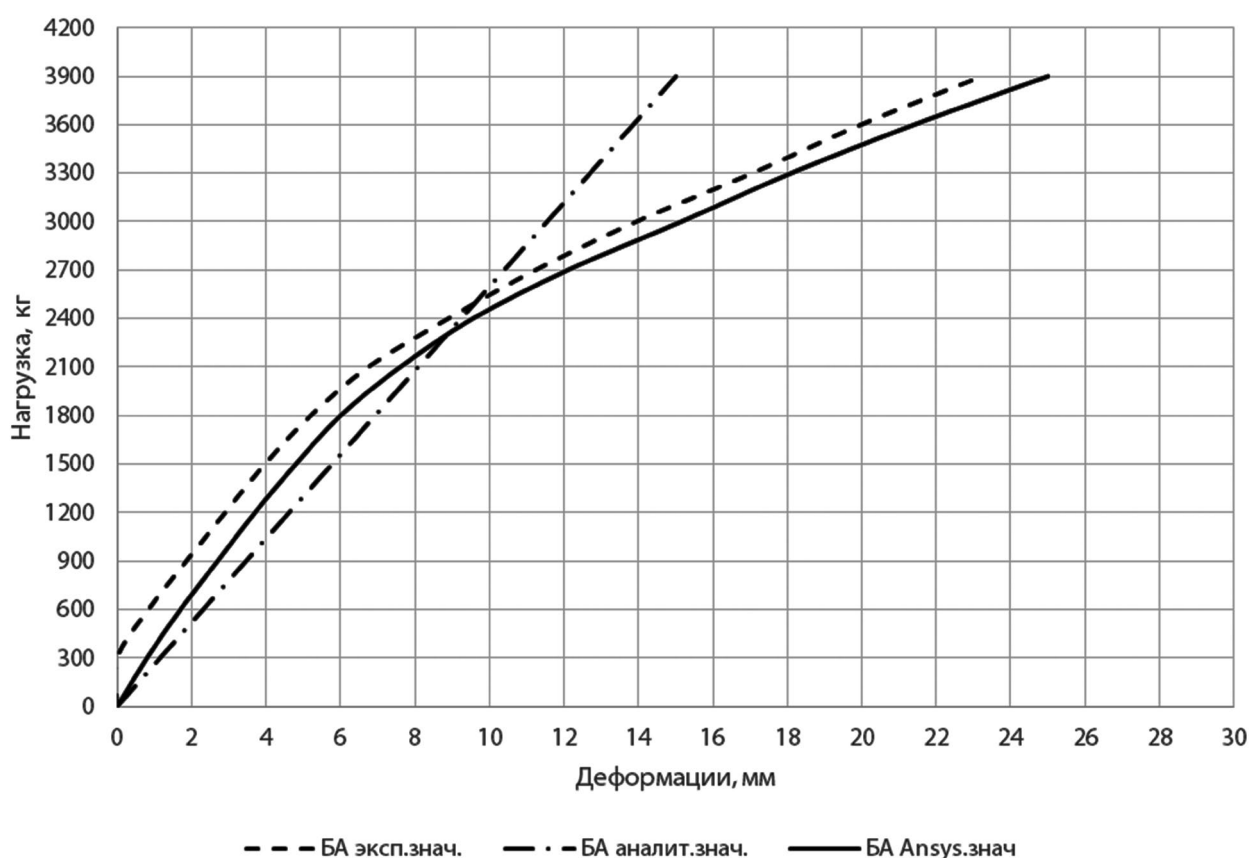


Рис. 7. График зависимости нагрузки – деформации балки
Fig. 7. Load-strain diagram of the beam

Таблица 1

Table 1

Сравнительные результаты экспериментальных и теоретических данных
Comparative results of experimental and theoretical data

Нагрузка, кг	БА теоретические значения	БА экспериментальные значения	БН теоретические значения	БН Ansys значения	БА Ansys значения
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
300	1,15	0,00	1,89	1,51	0,80
600	2,31	0,84	3,78	3,06	1,70
900	3,46	1,86	5,67	4,53	2,70
1 200	4,62	2,90	7,56	5,98	3,70
1 500	5,77	3,97	9,45	7,46	4,80
1 800	6,93	5,20	11,34	9,00	6,00
2 100	8,08	6,74	13,23	10,50	7,60
2 400	9,24	8,89	15,12	12,10	9,55
2 700	10,39	11,23	17,01	14,15	12,10
3 000	11,55	13,94	18,89	16,95	15,15
3 300	12,70	17,06	20,78	20,58	18,10
3 600	13,86	19,97	22,67	24,62	21,40
3 900	15,01	23,23	24,56	29,78	25,00

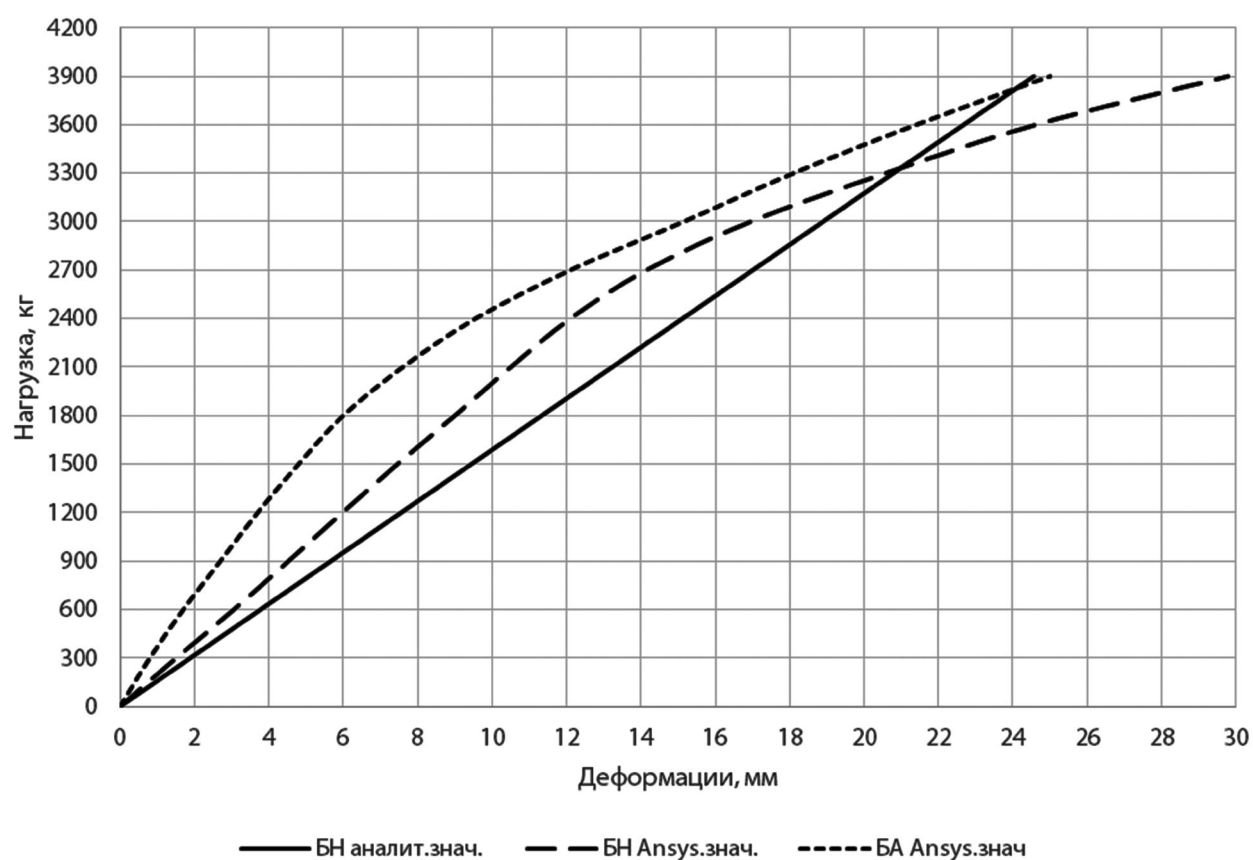


Рис. 8. График результатов численного моделирования
Fig. 8. Diagram of the numerical simulation results

Выводы

Результаты экспериментальных исследований и численного моделирования цельнодеревянной неармированной и армированной балки при кратковременном испытании статической нагрузкой в лабораторных условиях позволяют сделать следующие выводы:

- сходимость результатов примененного метода моделирования с реальным испытанием

составляет 92,9 %, соответственно, результат моделирования можно считать корректным, а примененный метод использовать в дальнейших расчетах;

• максимальный прогиб в середине пролета БА на 16,1 % меньше по сравнению с неармированной балкой. Следовательно, можно говорить о том, что балка с применением пластинчатого армирования более эффективна.

Библиографический список

1. Конструкции из дерева и пластмасс : учебник для технических вузов / Д. К. Арленинов, Ю. Н. Буслаев, В. П. Игнатьев [и др.]. – Москва : Издательство АСВ, 2002. – 280 с. – Текст : непосредственный.
2. Рощина, С. И. Армирование – эффективное средство повышения надежности и долговечности деревянных конструкций / С. И. Рощина. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2008. – № 2. – С. 71–74.
3. Рощина, С. И. Армированные деревянные конструкции / С. И. Рощина, М. С. Сергеев, А. В. Лукина. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2013. – № 4 (334). – С. 80–85.
4. Ярмончик, А. С. Металлодеревянные конструкции, возможности использования / А. С. Ярмончик, Ю. А. Лобанов. – Текст : непосредственный // XXXIII Неделя науки СПбГПУ : Материалы межвузовской научно-технической конференции. Часть I. – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2005. – С. 77–78.
5. Есипов, А. В. Инженерный метод расчета повышения несущей способности цельнодеревянных балок установкой стержневой арматуры в растянутой зоне / А. В. Есипов, Я. В. Лыкова. – Текст : непосредственный // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2016. – № 4 (31). – С. 61–65.
6. Арленинов, Д. К. Влияние уровня напряжений на ползучесть древесины при изгибе / Д. К. Арленинов, Д. А. Беккер. – DOI 10.17238/issn0536-1036.2015.6.128. – Текст : непосредственный // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2015. – № 6 (348). – С. 128–137.
7. Результаты комплексных исследований деревянных армированных балок / А. В. Есипов, Я. В. Воробьев, А. И. Бараняк, И. С. Сальный. – Текст : непосредственный // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2018. – № 2 (37). – С. 80–86.
8. Ароян, А. В. Оценка эффективности листового армирования несущих балочных конструкций с учетом эффекта ползучести древесины / А. В. Ароян. – Текст : непосредственный // Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности : сборник научных статей по итогам шестой международной научной конференции, Казань, 29–30 июня 2020 года. Часть 1. – Казань : ООО «Конверт», 2020. – С. 20–26.
9. Есипов, А. В. Экспериментальные исследования усиления цельнодеревянных балок стержневой арматурой в растянутой зоне / А. В. Есипов, Я. В. Лыкова, С. А. Еренчинов. – Текст : непосредственный // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2017. – № 1 (32). – С. 83–89.
10. Щуко, В. Ю. Клееные армированные деревянные конструкции : учебное пособие / В. Ю. Щуко, С. И. Рощина. – Владимир : Владимирский государственный университет, 2007. – 63 с. – Текст : непосредственный.

References

1. Arleninov, D. K., Buslaev, Yu. N., Ignat'ev, V. P., Romanov, P. G., & Chakhov, D. K. (2002). Konstruktsii iz dereva i plastmass. Moscow, ASV Publ., 280 p. (In Russian).
2. Roshchina, S. I. (2008). Reinforcement – efficient means of increasing reliability and durability of wooden structures. Russian forestry journal, (2), pp. 71-74. (In Russian).
3. Roshchina, S. I., Sergeev, M. S., & Lukina, A. V. (2013). Reinforced wooden structures. Russian forestry journal, (4(334)), pp. 80-85. (In Russian).
4. Yarmonchik, A. S., & Lobanov, Yu. A. (2005). Metalloderevyannye konstruktsii, vozmozhnosti ispol'zovaniya. XXXIII Nedelya nauki SPbGPU. Materialy mezhvuzovskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Peter the Great St. Saint-Petersburg, Petersburg Polytechnic University Publ., 1, pp. 77-78. (In Russian).
5. Esipov, A. V., & Lykova, Y. V. (2016). Engineering method of calculation of increase of bearing capacity of solid wood beams by mounting reinforcement bar in the tension zone. Akademicheskij vestnik URALNIIPROEKT RAASN, (4(31)), pp. 61-65. (In Russian).
6. Arleninov, D. K., & Bekker, D. A. (2015). Effects of stress level on wood creep under bending. Russian forestry journal, (6(348)), pp. 128-137. (In Russian).
7. Esipov, A. V., Vorobev, Ya. V., Baranyak, A. I., & Salnyj, I. S. (2018). The results of comprehensive studies of wooden reinforcement beams. Akademicheskij vestnik URALNIIPROEKT RAASN, (2(37)), pp. 80-86. (In Russian).
8. Aroyan, A. V. (2020). Otsenka effektivnosti listovogo armirovaniya nesushchikh balochnykh konstruktsiy s uchetom effekta polzuchesti drevesiny. Prioritetnye napravleniya innovatsionnoy deyatel'nosti v promyshlennosti: Sbornik nauchnykh statey po itogam shestoy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, June, 29-30. Kazan', OOO "Konvert" Publ., 1, pp. 20–26.
9. Esipov, A. V., Lykova, Y. V., & Erenchinov, S. A. (2017). Experimental researches strengthening solid wood beams of reinforcement bar in the tension zone. Akademicheskij vestnik URALNIIPROEKT RAASN, (1(32)), pp. 83-89. (In Russian).
10. Shchuko, V. Yu., & Roshchina, S. I. (2007). Kleenye armirovannye derevyannye konstruktsii: uchebnoe posobie. Vladimir, Vladimir State University, 63 p. (In Russian).

Сведения об авторах

Бай Владимир Федорович, канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, e-mail: bajvf@tyuiu.ru

Еренчинов Сергей Александрович, канд. техн. наук, доцент кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, e-mail: erenchinov@yandex.ru

Гач Евгений Анатольевич, обучающийся кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, e-mail: gatch2015@yandex.ru

Information about the authors

Vladimir F. Baj, Candidate in Engineering, Associate Professor, Head at the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: bajvf@tyuiu.ru

Sergey A. Erenchinov, Candidate in Engineering, Associate Professor at the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: erenchinov@yandex.ru

Evgeniy A. Gach, Student at the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, e-mail: gatch2015@yandex.ru

Получена 24 мая 2023 г., одобрена 09 июня 2023 г., принята к публикации 13 июня 2023 г.

Received 24 May 2023, Approved 09 June 2023, Accepted for publication 13 June 2023