

Эффективность прямолинейного армирования деревянных балок перекрытий стальной тросовой арматурой без предварительного натяжения

А.А. Кошчев^а, С.И. Рощина^б

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Горького, 87, Владимир, Россия

^а koshcheev.university@mail.ru, ^б rsi3@mail.ru

^а <http://asf.vlsu.ru/page715.html>, ^б <http://asf.vlsu.ru/page316.html>

Статья поступила 17.03.2021, принята 25.04.2021

В статье исследован способ усиления балок из цельной древесины 2 и 3 сорта стальной тросовой арматурой по прямолинейной траектории. Предложенная технология армирования может найти свое применение в балках перекрытий зданий и сооружений. Исследуется процесс деформации балок из цельной древесины длиной 6 метров сечением 100x200 мм при испытаниях на изгиб. Приведена методика испытаний образцов двух экспериментальных серий, разработанных в результате численного моделирования объемного напряженного состояния методом конечных элементов. Описан процесс изготовления деревянных балок с линейным тросовым армированием для испытаний, состоящий из нескольких этапов. Описан процесс строгания исходного сырья для заготовок, выполнения пазов для вклейки стальных тросов с помощью фрезеральной машины Makita 3612C с параллельным упором в заготовку, приготовления эпоксидной клеевой композиции из смолы ЭД-20, пластификатора, отвердителя и кварцевого песка. Отдельное внимание уделено процессу вклейки армирующих элементов в деревянную балку. Описана схема установки тензометрических датчиков PFL-20-11 и прогибомеров ПАО-6 в центральной части балки. В результате испытаний выявлен хрупкий характер разрушения деревянных неармированных балок и пластичный характер разрушения балок с прямолинейным тросовым армированием. При достижении критических деформаций армированных балок в сжатой зоне поперечного сечения образуется пластический шарнир с характерными складками в древесине, разрушения растянутой зоны не происходит. Результаты эксперимента показали, что армированные стальным тросом балки демонстрируют увеличение прочности в 1,55-1,6 раза и уменьшение деформативности в 1,3-1,4 раза в сравнении с неармированными конструкциями. Анализ эпюр нормальных напряжений в сечении исследуемых балок выявил смещение положения нейтральной оси в сторону растянутой зоны. Сделаны выводы о применимости исследуемых балок в покрытиях и перекрытиях зданий и сооружений и перспективе дальнейшей модернизации предложенного типа армирования.

Ключевые слова: древесина, металл, строительство, балки, строительные материалы, армирование, усиление.

Efficiency of rectilinear reinforcement of wooden floor beams with steel cable reinforcement without prior tension

A.A. Koshcheev^{1a}, S.I. Roshchina^{1b}

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs; 87, Gorky St., Vladimir, Russia

^а koshcheev.university@mail.ru, ^б rsi3@mail.ru

^а <http://asf.vlsu.ru/page715.html>, ^б <http://asf.vlsu.ru/page316.html>

Received 17.03.2021, accepted 25.04.2021

In this article a method of reinforcing solid wood beams of the first and the third grade with steel cable reinforcement along a rectilinear trajectory has been investigated. The proposed reinforcement technology can find its application in floor beams of buildings and structures. The deformation process of solid wood six meters long beams of 100x200 mm cross section during bending tests has been investigated. A technique for testing samples of two series of experiments, developed through the computer simulation of the volumetric stress state by the finite element method, has been presented. The process of making wooden beams with the linear cable reinforcement for the tests comprised of several stages has been described. The process of planning raw material for blanks, making grooves for gluing steel cable using a Makita 3612C milling machine with a parallel retainer plate for the blanks, making an epoxy adhesive composition from ED-20 resin, plasticizer, hardener and quartz sand have been described. Special attention has been paid to the process of gluing reinforcing elements into a wooden beam. A diagram on the arrangement of PFL-20-11 strain gauges and PAO-6 deflection indicator in the central part of the beam has been described. The tests have revealed the brittle nature of the unreinforced wooden beams fracture mode and the plastic fracture mode of beams with rectilinear cable reinforcement. When critical deformations of the reinforced beams are reached, a plastic centroid with typical folds in wood is formed in the cross-section compression area, the destruction of the stretched zone does not occur. The results of the experiment have shown that beams reinforced with steel cable demonstrate an increase in strength by 1.55-1.6 times and a decrease in deformability by 1.3-1.4 times in comparison with the unreinforced structures. Analysis of the diagrams of normal stresses in the investigated beams cross section has revealed a shift in the position of the neutral axis towards the stretched zone. Conclusions on the applicability of the investigated beams in the coatings and floorings of buildings and structures and the prospect of further modernization of the proposed type of reinforcement have been made.

Keywords: wood, metal, construction, beams, building materials, reinforcement, strengthening.

Введение. Современные строительные конструкции должны отвечать широкому спектру критериев качества, среди которых – экологичность, прочность, жесткость, долговечность, распространенность или возобновляемость исходного сырья для их производства, простота в эксплуатации [1]. Зачастую встречающиеся в природе материалы не могут обеспечить соответствие всем перечисленным критериям [2]. Данное утверждение относится и к конструкциям из древесины. Наряду с неоспоримыми преимуществами, такими как высокая прочность при малой массе [3], стойкость к агрессивной химической среде [4], легкость процессов обработки, гвоздимость, низкая теплопроводность [5], древесина обладает и рядом недостатков, важных с конструктивной точки зрения. К ним относятся анизотропность, подверженность биоповреждениям, ползучесть при длительном действии нагрузок [6], наличие сучков, косослоя, трещин [7], наиболее характерные для древесины 2 и 3 сорта [8].

Кроме этого, дефицит высококачественной древесины, наблюдающийся в сегменте малоэтажного строительства [9], приводит к возникновению технологий, позволяющих нивелировать негативные факторы данного материала [10] и открывающих возможности широко использовать древесину 2 и 3 сорта в ответственных строительных конструкциях [11].

На сегодняшний день актуальными являются технологии усиления древесины с помощью внедрения в конструкции из данного материала элементов усиления – вклеивание стальных стержней [12], лент, пластин [13], арматуры, углеткани [14, 15] и стеклоткани [16, 17], стальных профилей [18].

Авторами статьи предложена технология усиления деревянных балок стальной тросовой арматурой, располагаемой по криволинейной S-образной траектории в приопорных зонах, позволяющая повысить прочность, жесткость и ресурсоемкость конструкций. Однако исследование данной технологии требует сравнения балок из цельной древесины и балок с прямолинейным тросовым армированием для проверки возможности использования стального тросового армирования без предварительного натяжения в деревянных балочных конструкциях.

Исследование предложенной технологии армирования началось в 2017 году на кафедре строительных конструкций ВлГУ с численных расчетов и пробных испытаний элементов локального армирования [20]. Было выполнено несколько циклов экспериментальных исследований, посвященных сравнению прочностных показателей, полученных при выдергивании вклеенных стержней из горячекатаной арматуры и стального троса, изучению влияния глубины расположения армирования в изгибаемых балочных элементах на их деформативность.

Однако испытания на выдергивание вклеенных стержней в полной мере не отражают особенности напряженно – деформированного состояния растянутой зоны изгибаемых деревянных балок, в которой располагается армирование [21].

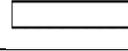
Объекты и методы исследования

В исследовании участвуют балки двух экспериментальных серий (табл. 1):

1. Серия БД – балки из древесины сосны 2 сорта без армирования;
2. Серия БДПА – балки из древесины сосны 2 сорта с прямолинейным тросовым армированием нижней грани растянутой зоны по всему пролету.

Армирующий материал – стальной трос марки ЛК-О, маркировочной группы 1440 МПа по ISO 2408, диаметром 8,3 мм, оцинкованный. Влажность древесины при изготовлении образцов и испытаниях – 17% [22]. Относительная влажность воздуха в помещении – 53%, температура помещения во время проведения испытаний – 21 градус Цельсия.

Таблица 1. Параметры испытываемых балок

№	Серия	Изображение (плоскость армирования)	$b \times h \times l$	Армирование
1	БД-1		100 x 200 x 6000	нет
2	БД-2			нет
3	БД-3			нет
4	БДПА-1		100 x 200 x 6000	Прямое, снизу 3 стержня 8 мм
5	БДПА-2			Прямое, снизу 3 стержня 8 мм
6	БДПА-3			Прямое, снизу 3 стержня 8 мм

Процесс изготовления экспериментальных образцов состоял из нескольких стадий:

1. Строгание деревянных заготовок размером 205x105x6300 в требуемые размеры поперечного сечения с помощью ручного электрического рубанка с системой стружкоудаления через сепараторный фильтр циклонного типа [21]. Цель данной стадии – подготовка граней балки к процессу фрезерования (рис. 1).

2. Выполнение выборки паза под армирующие элементы методом фрезерования [24]. Рабочий инструмент – фрезер Makita 3612C с параллельным упором. Используемая фреза – U-образная пазовая диаметром 10 мм. Фрезерование выполняется по длине балки, не доходя до ее концов на 5 см. Это необходимо для недопущения вытекания клеевой композиции из паза в процессе вклейки стального троса в древесину (рис. 2).



Рис. 1. Процесс строгания граней деревянных заготовок



Рис. 2. Процесс выборки паза под вклеивание стального троса

3. Вклеивание армирующих элементов в балки серии БДПА. Данный процесс начинается с приготовления клеевой композиции, состоящей из 100 весовых частей смолы ЭД -20, 10 частей отвердителя ПЭПА и 150 весовых частей кварцевого песка фракции 0,1 мм. Приготовление клеевой композиции производится с помощью электронных весов. Компоненты перемешиваются последовательно, вручную, небольшими порциями (рис. 3).



Рис. 3. Смешивание компонентов клеевой композиции

После приготовления композиции в течение 20 минут производится вклейка стальных тросов в массив древесины. Пролив паза клеем осуществляется в 2 этапа: производится предварительное заполнение паза на 30%, затем в паз помещается стальной трос и выполняется окончательное нанесение клея до уровня внешней грани древесины (рис. 4).



Рис. 4. Процесс вклейки армирующих элементов в балку

После установки изготовленных балок на экспериментальный стенд производится монтаж тензорезисторов, измеряющих относительные деформации в середине балки. Схема расстановки тензорезисторов представлена на рис. 5.

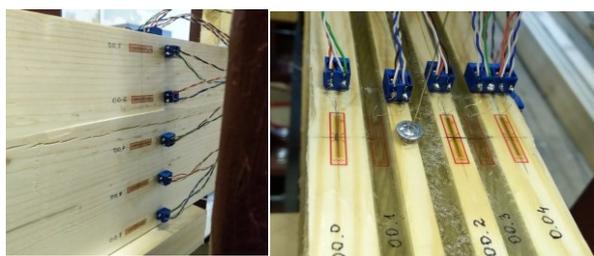


Рис. 5. Расстановка фольговых тензорезисторов PFL 20-11 в центре балки

Следует заметить, что в эксперименте используется перевернутая схема нагружения конструкции – опоры расположены сверху, а нагрузка формируется с помощью гидравлических домкратов, расположенных под испытываемой балкой (рис. 6). Это связано с обеспечением безопасности проведения испытаний – в такой схеме при разрушении или потере устойчивости исключен вылет элементов балки из зоны проведения испытаний.

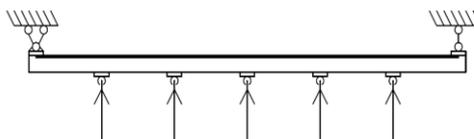


Рис. 6. Схема нагружения балки в процессе испытаний

Прогиб исследуемых балок на различных стадиях нагружения измеряется с помощью прогибомеров ПАО-6 с ценой деления 0,01 мм. Прогибомеры устанавливаются в середине пролета балки и на опоре. Итоговый прогиб конструкции вычисляется через разность отсчетов центрального и бокового прогибомеров (рис. 7).



Рис. 7. Прогиб балки серии БД в процессе испытаний

Результаты и их обсуждение. Первым этапом был выполнен визуальный анализ деформаций растянутой и сжатой зоны деревянных балок в процессе испытаний. Балки без армирования (серия БД) показали хрупкий характер разрушения посредством разрыва волокон растянутой зоны в местах расположения дефектов древесины в виде сучков (рис. 8).



Рис. 8. Разрушение растянутой зоны балки серии БД

Разрушение балок с прямолинейным тросовым армированием (серия БДПА) можно охарактеризовать как пластическое. На рис. 9 представлен видеопроцесс формирования пластического шарнира через смятие волокон растянутой зоны в середине балки с образованием множества складок. Разрушения растянутой зоны при этом не происходит.



Рис. 9. Разрушение сжатой зоны балки серии БДПА с образованием пластического шарнира

По показаниям динамометров, установленных на гидравлических домкратах, а также центрального и бокового прогибомеров, представляется возможным выполнить построение диаграммы зависимости прогиба исследуемых балок от суммарной действующей нагрузки (рис. 10).



Рис. 10. Диаграмма сравнения прогибов исследуемых балок

Результаты анализа деформаций показали, что армированные стальным тросом балки демонстрируют уменьшение деформативности в 1,3 - 1,4 раза в сравнении с неармированными конструкциями.

Тензодатчики, расположенные на боковых, верхних и нижних гранях исследуемых балок, позволяют сформировать графики распределения нормальных напряжений в поперечном сечении в середине пролета конструкции и сравнить данные показатели. Анализ данных диаграмм показал увеличение прочности армированных балок в 1,55 - 1,6 раза по напряжениям растянутой зоны. Распределение нормальных напряжений в сечении исследуемых балок формирует

смещение положения нейтральной оси в сторону растянутой зоны, что соответствует результатам, полученным в проведенных ранее численных исследованиях.

График распределения напряжений по высоте сечения балок на различных стадиях загрузки

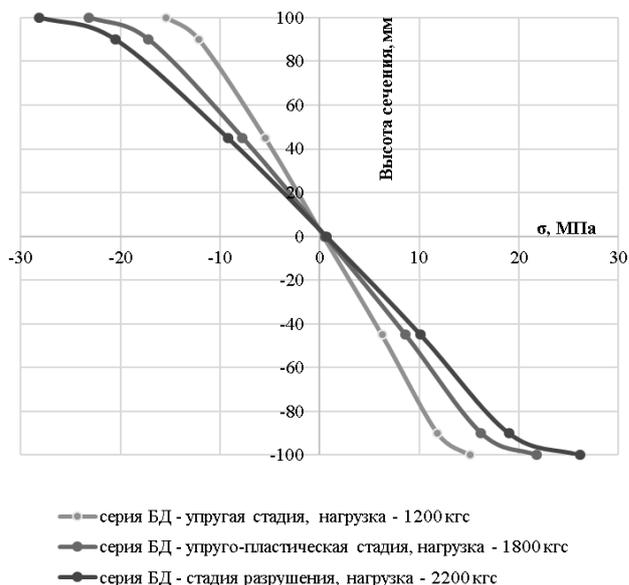


Рис. 11. Графики распределения нормальных напряжений в поперечном сечении центральной части балок серии БД на различных стадиях загрузки

График распределения напряжений по высоте сечения балок на различных стадиях загрузки

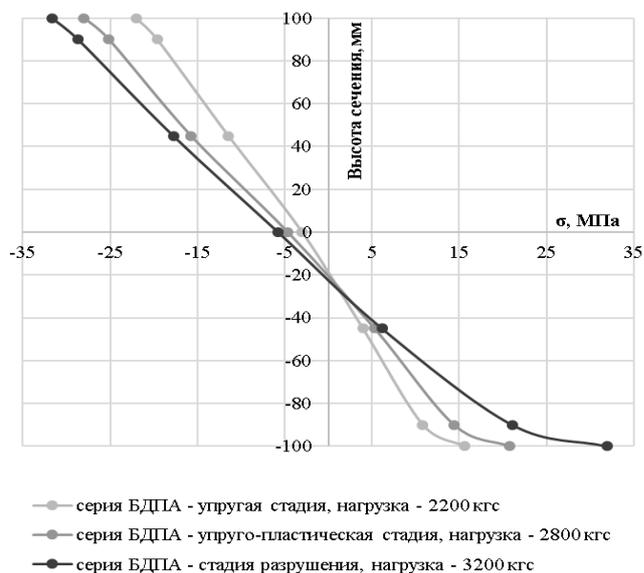


Рис. 12. Графики распределения нормальных напряжений в поперечном сечении центральной части балок серии БДПА на различных стадиях загрузки

Выводы. Результаты проведенных экспериментов позволяют сделать выводы о высокой эффективности применения прямолинейного тросового армирования в деревянных балках для перекрытий и покрытий зданий и сооружений. Исследуемое армирование позволяет

существенно повысить прочностные показатели балок. Дальнейшая модернизация прямолинейного армирования возможна через изменение траектории армирования в приопорных зонах на криволинейную, в форме s-образной волны, что потенциально должно привести к

повышению прочности, жесткости и ресурсоемкости армированной конструкции.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90062

Литература

1. Попова М.В., Шохин П.Б., Глебова Т.О., Шабардина Н.Д. Особенности инженерного расчета древокомпозитных конструкций // Вестн. Белгородского гос. технологического ун-та им. В.Г. Шухова. 2018. № 8. С. 36-43.
2. Borri A., Corradi M., Speranzini E. Reinforcement of wood with natural fibers // Composites Part B: Engineering. 2013. P. 79-85.
3. Лабудин Б.В., Морозов В.С., Орлов А.О., Попов О.Н., Никитина Т.А. Сопrotивление клееной древесины растяжению под различными углами к направлению волокон // Строительная механика и расчет сооружений. 2019. № 3 (184). С. 12-17.
4. Ароян А.В. Листовое армирование несущих балочных деревянных конструкций // Приоритетные направления инновационной деятельности в пром-сти: сб. науч. ст. по итогам шестой междунар. науч. конф. (29-30 июня 2020 г.). Казань, 2020. С. 15-19.
5. Telichenko V.I. Strengthening technology of timber trusses by patch plates with toothed-plate connectors // Journal of Industrial Pollution Control. 2017. С. 1-7.
6. Рощина С.И., Лисятников М.С., Мелехов В.И., Лабудин Б.В., Лукин М.В. Применение высоких древоклееных балок в покрытии зданий текстильных цехов // Изв. высш. учеб. заведений. Технология текстильной пром-сти. 2016. № 5 (365). С. 267-271.
7. Жаданов В.И., Аркаев М.А., Котлов В.Г. Экспериментальные исследования деревянных балок, усиленных витыми крестообразными стержнями // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 11. С. 5-11.
8. Христофорова Т.Н. Влияние некоторых видов ослаблений поперечного сечения на работу армированных деревянных балок: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Владимир, 2006. 211 с.
9. Лисятников М.С. Совершенствование технологии изготовления древоклееных конструкций с усилением приопорных зон // Лесотехнический журнал. 2015. Т. 5. № 2 (18). С. 137-148.
10. Погорельцев А.А., Пятикрестовский К.П. Обоснование нормируемых значений модулей упругости при расчетах деревянных конструкций // Промышленное и гражданское стр-во. 2013. № 10. С. 33-35.
11. Турковский С.Б., Погорельцев А.А., Николаев В.Г. Физкультурно-оздоровительные комплексы Москвы с деревянными стропильными системами покрытий // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2008. № 8. С. 70-79.
12. Щуко В.Ю., Щуко С.А., Козулин А.Я. Рекомендации по проектированию армированных деревянных конструкций. Иркутск, 1978. С. 66.
13. Karel'skiy A.V., Zhuravleva T.P., Labudin B.V. Load-to-failure bending test of wood composite beams connected by gang nail // Magazine of Civil Engineering. 2015. P. 92-108.
14. Roshchina S.I., Lukin M.V., Lukina A.V., Sergeev M.S., Lisyatnikov M.S. Experimental research on pressed-bending reinforced timberwork // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. V. 10. № 24. P. 45307-45312.
15. Buell T.W., Saadatmanesh H. Strengthening timber bridge beams using carbon fiber // Journal of Structural Engineering. 2005. P. 98-107.
16. Roschina S., Gribanov A., Lukin M., Lisyatnikov M., Strekalkin A. Calculation of wooden beams reinforced with polymeric composites with modification of the wood compression area // MATEC Web of Conferences. 2018. P. 04029.
17. Roschina S.I., Lisyatnikov M.S., Lukin M.V., Popova M.V. Technology of strengthening the supporting zones of the glued-wood beaming structure with the application of nano-modified prepregs // Materials Science Forum. 2018. V. 931 MSF. P. 226-231.
18. Dietsch P., Kreuzinger H. Dynamic effects in reinforced beams at brittle failure - evaluated for timber members // Engineering Structures. 2020. P. 57-68.
19. Roshchina S., Lukin M., Lisyatnikov M., Koscheev A. The phenomenon for the wood creep in the reinforced glued wooden structures // International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2018). electronic edition. Ser. «MATEC Web of Conferences» 2018. P. 03020.
20. Koshcheev A.A., Roshchina S.I., Lukin M.V., Lisyatnikov M.S. Wooden beams with reinforcement along a curvilinear trajectory // Magazine of Civil Engineering. 2018. № 5 (81). P. 193-202.
21. Сизов Ю.В., Цыбина Р.З., Ивашнев А.В., Баркая А.Т. Экспериментальное исследование прочностных характеристик деревянных клееных армированных балок // Инженерные задачи: проблемы и пути решения: сб. материалов Всерос. (национальной) науч.-практической конф. Высш. инженерной школы САФУ (20 нояб. 2019 г.). Архангельск, 2019. С. 29-32.
22. Карельский А.В., Журавлева Т.П., Лабудин Б.В. Испытание на изгиб деревянных составных балок, соединенных металлическими зубчатыми пластинами, разрушающей нагрузкой // Инженерно-строительный журнал. 2015. № 2 (54). С. 77-85.
23. Малыгин В.И., Кремлева Л.В., Шестаков К.Л. Проектные решения в технологии деревообработки // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2006. № 3. С. 126-133.
24. Черепанов С.А., Лужанский Д.А., Прокофьев Г.Ф. Исследование уровня вибраций и качества обработанной поверхности при высокоскоростном фрезеровании древесины // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2015. № 6 (348). С. 96-106.

References

1. Popova M.V., SHohin P.B., Glebova T.O., SHabardina N.D. Features of engineering calculation of wood-composite structures // Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2018. № 8. P. 36-43.
2. Borri A., Corradi M., Speranzini E. Reinforcement of wood with natural fibers // Composites Part B: Engineering. 2013. P. 79-85.
3. Labudin B.V., Morozov V.S., Orlov A.O., Popov O.N., Nikitina T.A. Resistance of glued timber to tension at different angles to the direction of the fibers // Construction mechanics and calculation of constructions. 2019. № 3 (184). P. 12-17.
4. Aroyan A.V. Sheet reinforcement of load-bearing timber structures // Prioritetnye napravleniya innovacionnoj

- deyatelnosti v prom-sti: sb. nauch. st. po itogam shestoj mezhdunar. nauch. konf. (29-30 iyunya 2020 g.). Kazan', 2020. P. 15-19.
5. Telichenko V.I. Strengthening technology of timber trusses by patch plates with toothed-plate connectors // *Journal of Industrial Pollution Control*. 2017. P. 1-7.
 6. ZHadanov V.I., Arkaev M.A., Kotlov V.G. Experimental studies of wooden beams reinforced with twisted cruciform rods // *Industrial and Civil Engineering («PGS»)*. 2017. № 11. P. 5-11.
 7. Frese M., Blaß H. J. Statistics of damages to timber structures in Germany // *Engineering Structures*. 2011. P. 1-9.
 8. Hristoforova T.N. Influence of some types of cross-section weakening on the operation of reinforced wooden beams: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.01. Vladimir, 2006. 211 p.
 9. Lisyatnikov M.S. Improvement of the technology of manufacturing wood-glued structures with strengthening of the support zones // *Forestry Engineering Journal*. 2015. V. 5. № 2 (18). P. 137-148.
 10. Pogorel'cev A.A., Pyatikrestovkij K.P. Substantiation of the normalized values of the elasticity moduli in the structural calculations of wooden structures // *Industrial and Civil Engineering («PGS»)*. 2013. № 10. P. 33-35.
 11. Turkovskij S.B., Pogorel'cev A.A., Nikolaev V.G. Sports and recreation complexes in Moscow with wooden roof rafter systems // *Construction materials, the equipment, technologies of XXI century*. 2008. № 8. P. 70-79.
 12. SHCHuko V.YU., SHCHuko S.A., Kozulin A.YA. Recommendations on the design of reinforced wooden structures. Irkutsk, 1978. P. 66.
 13. Karelskiy A.V., Zhuravleva T.P., Labudin B.V. Load-to-failure bending test of wood composite beams connected by gang nail // *Magazine of Civil Engineering*. 2015. P. 92-108.
 14. Roshchina S.I., Lukin M.V., Lukina A.V., Sergeev M.S., Lisyatnikov M.S. Experimental research on pressed-bending reinforced timberwork // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015. V. 10. № 24. P. 45307-45312.
 15. Buell T.W., Saadatmanesh H. Strengthening timber bridge beams using carbon fiber // *Journal of Structural Engineering*. 2005. P. 98-107.
 16. Roschina S., Griбанov A., Lukin M., Lisyatnikov M., Strekalkin A. Calculation of wooden beams reinforced with polymeric composites with modification of the wood compression area // *MATEC Web of Conferences*. 2018. P. 04029.
 17. Roschina S.I., Lisyatnikov M.S., Lukin M.V., Popova M.V. Technology of strengthening the supporting zones of the glued-wood beaming structure with the application of nano-modified prepregs // *Materials Science Forum*. 2018. V. 931 MSF. P. 226-231.
 18. Dietsch P., Kreuzinger H. Dynamic effects in reinforced beams at brittle failure - evaluated for timber members // *Engineering Structures*. 2020. P. 57-68.
 19. Roshchina S., Lukin M., Lisyatnikov M., Koscheev A. The phenomenon for the wood creep in the reinforced glued wooden structures // *International Scientific Conference on Energy, Environmental and Construction Engineering (EECE-2018)*. electronic edition. Ser. «MATEC Web of Conferences» 2018. P. 03020.
 20. Koshcheev A.A., Roshchina S.I., Lukin M.V., Lisyatnikov M.S. Wooden beams with reinforcement along a curvilinear trajectory // *Magazine of Civil Engineering*. 2018. № 5 (81). P. 193-202.
 21. Sizov YU.V., Cybina R.Z., Ivashnev A.V., Barkaya A.T. Experimental study of the strength characteristics of glued timber reinforced beams // *Inzhenernye zadachi: problemy i puti resheniya: sb. materialov Vseros. (nacional'noj) nauch.-prakticheskoy konf. Vyssh. inzhenernoj shkoly SAFU (20 noyab. 2019 g.)*. Arhangel'sk, 2019. P. 29-32.
 22. Karel'skij A.V., ZHuravleva T.P., Labudin B.V. Bending test of composite wooden beams connected by metal toothed plates, breaking load // *Magazine of Civil Engineering*. 2015. № 2 (54). P. 77-85.
 23. Malygin V.I., Kremleva L.V., SHeStakov K.L. Design solutions in woodworking technology // *Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal)*. 2006. № 3. P. 126-133.
 24. CHerepanov S.A., Luzhanskiy D.A., Prokofev G.F. Investigation of the level of vibrations and the quality of the processed surface during high-speed milling of wood // *Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal)*. 2015. № 6 (348). P. 96-106.