

Применение перекрестно-ориентированных слоев в конструкции kleеных деревянных балок

Роман Николаевич Фадеев¹, Михаил Сергеевич Лисятников¹,

Михаил Владимирович Лукин², Светлана Ивановна Рошина¹

¹ Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ); г. Владимир, Россия;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследуется возможность применения перекрестно-ориентированных слоев в kleеных деревянных балках и определение напряженно-деформированного состояния таких балок. Основным преимуществом использования перекрестно-ориентированных слоев в kleеных балках является возможность применения отходов производства пиломатериалов в перекрестно-ориентированных слоях.

Материалы и методы. Рассмотрены 3- и 5-слойные балки, склеенные только из продольных ламелей, и балки, скомбинированные из продольных и перекрестно-ориентированных слоев. Исследование разбито на два этапа: расчет конструкции балок в программном комплексе Лира и испытание образцов на изгиб. Образцы для испытаний изготовлены с помощью двух типов клея: однокомпонентного полиуретанового клея Tricol и клея на основе фенолформальдегидных смол БФ-4.

Результаты. По результатам расчета в ПК Лира нормальные напряжения 3-слойных балок с перекрестно-ориентированными слоями выросли на 6,5 %, чем у балок без них, у 5-слойных балок с перекрестно-ориентированными слоями нормальные напряжения выросли на 25 % относительно балок с продольными слоями. Деформативность балок с применением перекрестно-ориентированных слоев по расчету изменилась незначительно по сравнению с балками, склеенными только из продольных ламелей. По результатам испытания наилучшие результаты по прочности и характеру разрушений показали образцы, склеенные с использованием однокомпонентного полиуретанового клея. Данные образцы при испытании продемонстрировали максимальную сходимость разрушающей нагрузки. Средняя сходимость расчетных напряжений с напряжениями, полученными по результатам эксперимента, составила порядка 90 %. Средняя сходимость результатов расчета по деформациям и экспериментальным данным составила 88,8 %.

Выводы. При применении перекрестно-ориентированных слоев в конструкции kleеных деревянных балок наиболее пригодными к ограниченному использованию в реальных конструкциях оказались 3-слойные образцы, показавшие снижение прочности порядка 20 %. Применение перекрестно-ориентированных слоев в kleеных деревянных балках позволит снизить отходы производства пиломатериалов с незначительной потерей их несущей способности.

Ключевые слова: древесина, kleеные деревянные конструкции, балки, перекрестно-ориентированные слои древесины, расчет конструкций, моделирование балок, экспериментальные исследования

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в области научной деятельности (тема FZUN-2024-0004, государственное задание ВлГУ).

Для цитирования: Фадеев Р.Н., Лисятников М.С., Лукин М.В., Рошина С.И. Применение перекрестно-ориентированных слоев в конструкции kleеных деревянных балок // Вестник МГСУ. 2025. Т. 20. Вып. 12. С. 1892–1906. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.12.1892-1906

Автор, ответственный за переписку: Роман Николаевич Фадеев, romazatti@yandex.ru.

The use of cross-oriented layers in the construction of glued wooden beams

Roman N. Fadeev¹, Mikhail S. Lisyatnikov¹, Mikhail V. Lukin²,

Svetlana I. Roshchina¹

¹ Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoltoevs (VLSU); Vladimir, Russian Federation;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The proposed paper explores the possibility of using cross-oriented layers in glued wooden beams and determining the stress-strain state of such beams. The main advantage of using cross-oriented layers in glued beams is the possibility of using lumber production waste in cross-oriented layers.

Materials and methods. In this study, 3-layer and 5-layer beams glued together from only longitudinal lamellae and beams combined from longitudinal and cross-oriented layers are considered for comparison. The study is divided into two stages: the calculation of the beam structure in the Lira software package and the bending test of specimens. The test specimens were made using two types of glue: Tricol single-component polyurethane glue and glue based on phenol-formaldehyde resins BF-4.

Results. According to the calculation results in the Lira software package, the normal stresses of 3-layer beams with cross-oriented layers increased by 6.5 % compared to beams without them, and for 5-layer beams with cross-oriented layers, the normal stresses increased by 25 % relative to beams with longitudinal layers. The deformability of beams using cross-oriented layers has changed slightly by calculation compared to beams glued only from longitudinal lamellae. According to the test results, the specimens glued using a one-component polyurethane adhesive showed the best results in terms of strength and fracture pattern. These specimens showed the maximum convergence of the destructive load during testing. The average convergence of the calculated stresses with the stresses obtained from the experimental results was about 90 %. The average convergence of the strain calculation results and experimental data was 88.8 %.

Conclusions. Thus, when using cross-oriented layers in the construction of glued wooden beams, 3-layer specimens turned out to be the most suitable for limited use in real structures, which showed a decrease in strength of about 20 %. The use of cross-oriented layers in glued wooden beams will reduce the waste of lumber production with a slight loss of their bearing capacity.

KEYWORDS: wood, glued wooden structures, beams, cross-oriented layers of wood, structural calculation, beam modeling, experimental studies

Acknowledgments. This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of a state assignment in the field of scientific activity (topic FZUN-2024-0004, state assignment to VISU).

FOR CITATION: Fadeev R.N., Lisyatnikov M.S., Lukin M.V., Roshchina S.I. The use of cross-oriented layers in the construction of glued wooden beams. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2025; 20(12):1892-1906. DOI: 10.22227/1997-0935.2025.12.1892-1906 (rus.).

Corresponding author: Roman N. Fadeev, romazatti@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день важными факторами в мировой экономике являются окупаемость бизнеса и повышение эффективности производства. Улучшением данных показателей занимаются во всех отраслях промышленности, в том числе и в строительстве.

Деревообрабатывающая промышленность [1] в настоящее время в России менее загружена по сравнению со временами расцвета СССР. Огромное количество зданий и сооружений строили в те годы именно из древесины. Но и сегодня наша страна находится на лидирующих позициях в производстве изделий из древесины. По изготовлению пиломатериалов Россия в 2022 г. занимала 3-е место после Китая и США. По экспорту пиломатериалов у России 1-е место в мире. Несмотря на спад производства конструкционной древесины, произошедший в 90-е гг., спрос на деревянные конструкции в РФ в течение последних лет возрастает.

При выпуске пиломатериалов, согласно нормативным типоразмерам, образуется большое количество отходов в виде обрезков досок. Актуальная цель производителей пиломатериалов в тандеме с учеными — поиск использования отходов для дальнейшего применения их в строительстве. В этом направлении необходимо двигаться для повышения эффективности производства деревянных конструкций [2].

Среди отходов деревообрабатывающей промышленности наиболее широкое применение находят опилки, древесная мука, стружка, обрезки, горбыли и т.д. Эти отходы зачастую подвергаются дальнейшей переработке: механической, химической и биологической. Переработанные древесные

отходы используют при изготовлении строительных материалов, таких как: арболит, фибролит, древесноволокнистые плиты [3], OSB-плиты, теплоизоляционные материалы и др.

Эта тема рассматривается в исследованиях во всем мире. Большая их часть посвящена использованию древесных отходов в строительных конструкциях, их применению в составе бетона. Наполнитель из древесных опилок — высокоэкологичен [4]. Положительным эффектом также служит снижение расхода цемента. Можно заменять до 5 % бетона на древесные опилки (более экологичный материал) без потери прочности конструкции, работающей на сжатие [5]. Применение древесных отходов в бетоне — перспективный способ переработки древесных остатков в коммерчески выгодный продукт. Изучено взаимодействие бетона и древесных опилок. Использование древесины улучшает механическое взаимодействие за счет увеличения коэффициента трения как механизма сопротивления. Бетон с добавлением древесных опилок выдерживает испытания на усталость без образования трещин. По результатам испытаний композит из бетона с древесными опилками конкурирует по прочности с эталонным бетоном [6].

Продукция, изготавливаемая из смеси цемента с отходами из древесины, может быть представлена отделочными материалами, имеющими хорошую теплопроводность и звукоизоляцию [7]. Исследования отходов производств на теплопроводность показывают улучшение свойств композитного материала по сравнению с цементом (для древесных опилок значения теплопроводности и объемной теплоемкости составили 0,29 Вт/м·К и 0,81 МДж/м³ К). Между волокнами цемента и древесных опилок имеется до-

статочное сцепление. Оптимальное содержание наполнителя — 30 % по массе для композитов с древесными остатками.

Отходы древесины в виде древесной муки могут применяться в конструкциях с полимерной матрицей. Обладая низкой удельной массой, данные композиты сохраняют достаточно высокий модуль упругости и обладают высокими прочностными свойствами [8].

Помимо отходов пиломатериалов в виде древесных опилок, стружки и муки, при изготовлении деревянных конструкций находят применение и обрезки пиломатериалов (например, в производстве деревянных плит) [9]. Эти плиты могут использоваться при отделке жилых и производственных помещений. Обрезки фанерного производства — для создания конструкции балок [10]. При указанной технологии балка состоит из смежно-склеенных слоев продольных и поперечных реек фанеры. Основными преимуществами метода изготовления балок являются их легкость и сниженный расход древесины.

В США были выполнены исследования, направленные на применение обрезков пиломатериалов в строительстве объемных модульных зданий [11]. Основной принцип исследования заключается в создании производства полного цикла с минимизацией отходов. Применение данной технологии строительства дает возможность снизить расходы на использование древесины до 30 %.

В настоящем исследовании предполагается найти применение отходам изготовления пиломатериалов в виде обрезков досок в производстве несущих деревянных конструкций. Использование обрезков пиломатериалов может быть реализовано в kleеных деревянных конструкциях (балках, колоннах) с помощью попеременно чередующихся продольных и перекрестных слоев древесины [12]. Анизотропные свойства древесины позволяют применять методы по комбинированию в конструкциях продольных слоев древесины с перекрестно-ориентированными слоями [13]. Это создает возможность внедрения малоотходных технологий [14].

Среди представителей kleеных деревянных конструкций с применением перекрестно-ориентированных слоев можно назвать: CLT-панели, CLT-брюс и LVL-брюс [15]. Технология изготовления LVL-брюса разработана в 60-х гг. XX в. в США [16], а технология CLT-древесины — в 90-х гг. прошлого столетия в Центральной Европе. В России производство конструкций этого типа организовано не так давно, в отличие от стран Центральной Европы, Скандинавии и Северной Америки.

Исследование было разбито на два этапа: первый — расчет балок в ПК Лира 10.12, второй — испытание рассчитанных в ПК Лира балок на статический изгиб. Для сравнения напряженно-деформированного состояния (НДС) [17] kleеных балок разного типа рассмотрены балки, выполненные только из продоль-

ных слоев, и балки с комбинированием продольных и перекрестно-ориентированных слоев. После первого и второго этапов исследования осуществлен сравнительный анализ результатов компьютерного моделирования и эксперимента [18].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для проведения исследования рассмотрены 3- и 5-слойные образцы kleеных деревянных балок пролетом 0,44 м. Схемы экспериментальных образцов деревянных kleеных балок представлены на рис. 1. Образцы № 1(1') и 3(3') выполняются только из продольно-склеенных слоев, образцы № 2(2') и 4(4') — из попеременно-склеенных продольных и перекрестно-ориентированных слоев [19]. Перекрестно-ориентированные слои расположены под углом 90° по отношению к продольным слоям. Образцы № 1—4 склеены на однокомпонентном полиуретановом клее, образцы № 1'—4' — kleem на основе фенолформальдегидных смол.

Основная цель данного исследования — определение НДС разработанных конструкций балок.

На первом этапе исследования произведен расчет экспериментальных образцов согласно рис. 1 в ПК Лира 10.12.

При построении модели kleеной деревянной балки применялся метод конечных элементов (МКЭ) [20]. Основные заданные жесткостные характеристики в ПК Лира 10.12 для древесины: модуль упругости вдоль волокон — 10 000 МПа; модуль упругости против волокон — 400 МПа; модуль сдвига — 600 МПа; коэффициент Пуассона поперек волокон при напряжениях, направленных вдоль волокон, — 0,5; коэффициент Пуассона вдоль волокон при напряжениях, направленных поперек волокон, — 0,02.

Для перекрестно-ориентированных слоев характеристики древесины назначаются в соответствии с перекрестным направлением волокон относительно балки. Расчетная модель имеет шесть степеней свободы (линейные перемещения по осям X , Y , Z ; вращения вокруг этих же осей UX , UY , UZ). Построение объекта выполнено путем перемещения образующей. Построение расчетной модели [21] производилось объемными конечными элементами (размер элементов 22,5 × 30 × 20 (h) мм). Закрепление модели балки проведено на двух опорах: шарнирно-подвижная (X , Z) и шарнирно-неподвижная (X , Y , Z) [22]. В качестве расчетной нагрузки использовано статическое пошаговое загружение (шагом 100 кг) сосредоточенной нагрузкой от 100 до 2500 кг. В результате расчета определены максимальные нормальные напряжения и максимальные деформации балок [23].

На втором этапе исследования были изготовлены 3- и 5-слойные образцы kleеных деревянных балок пролетом 0,44 м. Пролет балок ограничивался заданными характеристиками оборудования для испытания конструкций на изгиб (рис. 2).

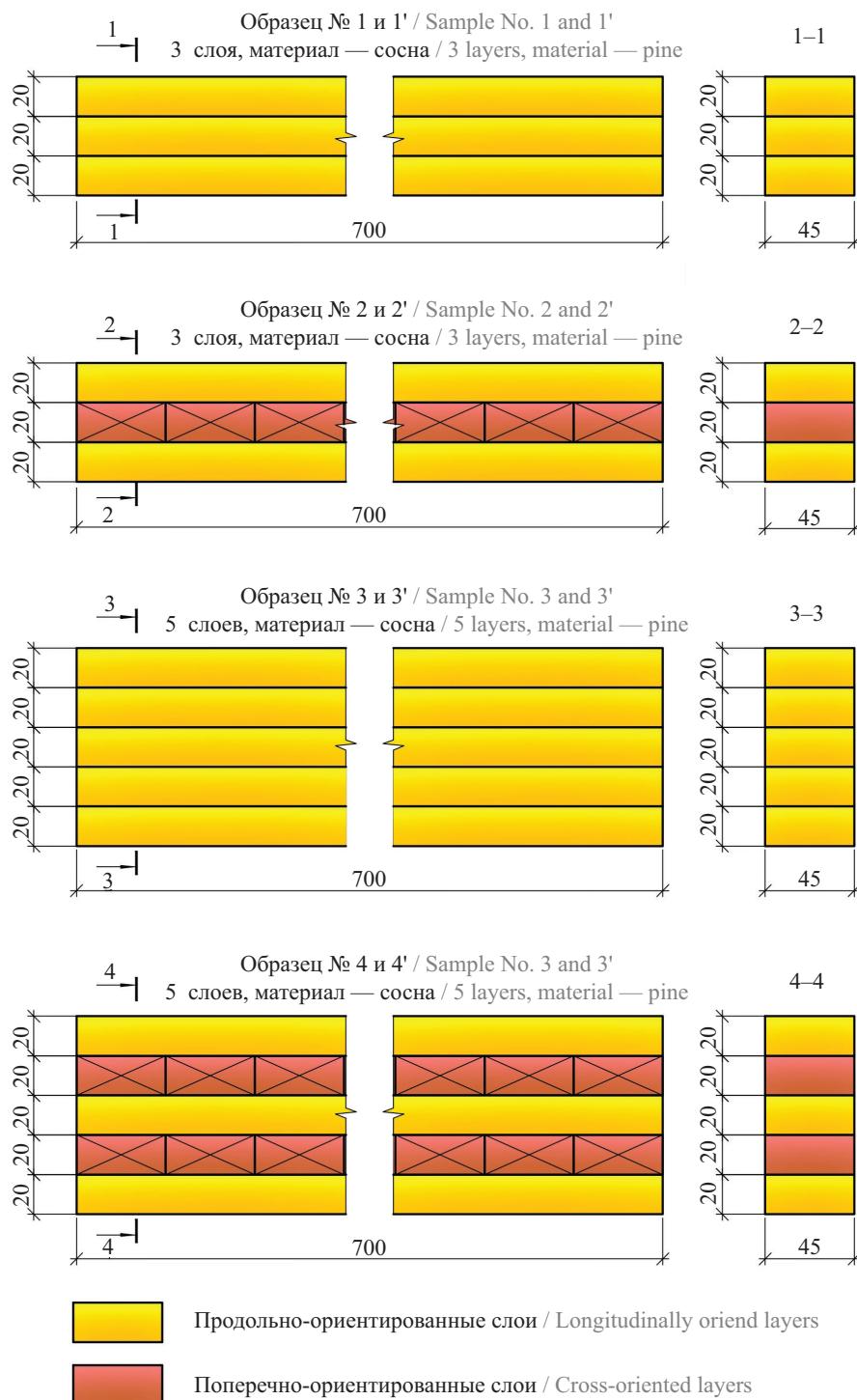


Рис. 1. Схемы экспериментальных образцов

Fig. 1. Diagrams of experimental specimens

Изготовление балок осуществлялось из деревянных шлифованных реек сечением 20×45 мм. Материал изготовления реек — сосна 2-го сорта. Для устройства перекрестно-ориентированных слоев применялись заготовки 45×20 (h) мм. С целью склеивания образцов использовались два типа клея: однокомпонентный полиуретановый (ПУ) клей Tricol 1K MFL PUR20 и клей на основе фенол-

формальдегидных смол ЕФ-4. Клей Tricol 1K MFL PUR20 производится по ТУ 20.52.10-001-20267573-2017 ООО «Ти Эр Ай». Он имеет коричнево-бежевый оттенок и предназначен для склеивания деревянных и дерево-композитных элементов. Данный клей обладает высокими показателями по термо- и водостойкости, он высокоэкологичный. Время прессования клея при температуре $+20$ $^{\circ}\text{C}$ и влаж-

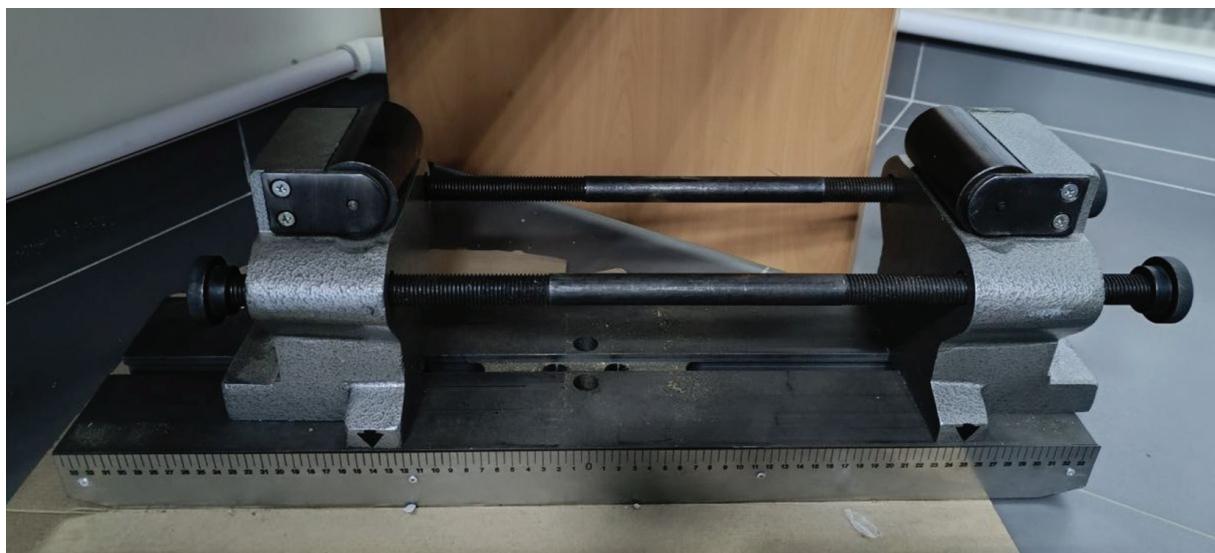


Рис. 2. Оснастка для испытания на статический изгиб

Fig. 2. Photo of static bending test equipment



Рис. 3. Изготовление экспериментальных образцов

Fig. 3. Photos of experimental specimens manufacturing

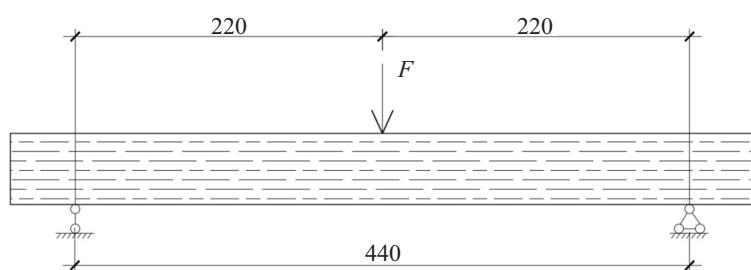


Рис. 4. Расчетная схема балки при испытании на изгиб

Fig. 4. Design diagram of the beam during bending test

ности 60–70 % — 40–60 мин, время набора эксплуатационной прочности — 24 ч. В соответствии с показаниями производителя прочность при сдвиге kleевого соединения по ГОСТ 14759 для сосны составляет 11 МПа. Клей БФ-4 — это клей на основе спиртового раствора поливинилацеталей с резольными фенолформальдегидными смолами. Производится по ГОСТ 12172–2016 ООО «Полидокс». Клей предназначен для склеивания металлов, древесины и пластмасс. Температура эксплуатации от –60 до +60 °C. Предел прочности kleевого соединения при сдвиге — не менее 19,6 МПа.

Согласно рис. 1 для испытаний было изготовлено 8 серий образцов: 4 серии для ПУ клея (№ 1–4) и 4 серии для клея БФ-4 (№ 1'–4'). Каждая серия представлена тремя образцами. 3-слойные балки выполнялись сечением 45 × 60 мм, 5-слойные — сечением 45 × 100 мм. Склейивание ламелей производилось при помощи четырех G-образных струбцин. Каждый образец выдерживался в течение 24 ч. Процесс изготовления образцов представлен на рис. 3.

После изготовления проводились испытания экспериментальных образцов на статический изгиб — одной сосредоточенной силой в середине пролета. Данное испытание выполнялось на универсальной электромеханической испытательной машине РЭМ-100-А-1 с применением специализированной установки с максимальным пролетом 0,44 м (см. рис. 2). Расчетная схема балки при испытании на изгиб показана на рис. 4. Основная цель испытания — определение НДС образцов [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Описание результатов 1-го этапа

На первом этапе исследования произведен расчет образцов kleеных деревянных балок в ПК Lira 10.12 для 3-слойной kleеной деревянной балки и 5-слойной балки, выполненной только из продольных слоев древесины и с комбинированием продольных и перекрестно-ориентированных слоев [25]. Расчет произведен для четырех серий образцов согласно рис. 1. Результаты расчета представлены в табл. 1, 2, общий вид диаграммы напряжений балки — на рис. 5.

Напряжение N_y , МПа / Stress N_y , MPa

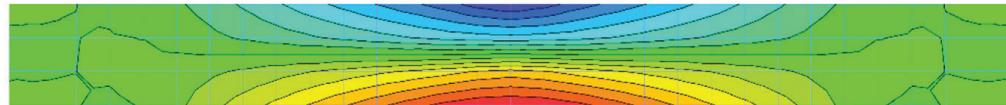
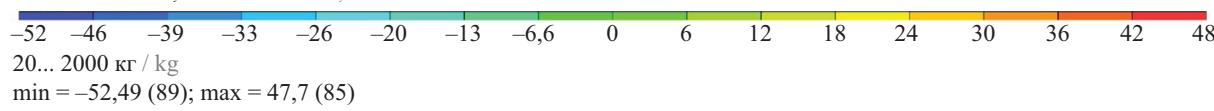


Рис. 5. Диаграмма напряжений балки в ПК Lira

Fig. 5. Stress diagram of beam in Lira SV

Согласно расчетам в ПК Lira, напряжения 3-слойных экспериментальных балок с перекрестно-ориентированными слоями выше на 6,5 %, чем для балок, склеенных из продольных слоев древесины, а деформации возросли на 0,4 %.

В соответствии с расчетами в ПК Lira у 5-слойных балок с перекрестно-ориентированными слоями напряжения выше на 25 %, чем для балок без них, а деформации возросли на 1,2 %.

Описание результатов 2-го этапа

На втором этапе исследования выполнены испытания образцов kleеных деревянных балок на статический изгиб (рис. 6, 7). Испытания осуществлялись в лаборатории Центра коллективного пользования Владимирского государственного университета на универсальной электромеханической испытательной машине РЭМ-100-А-1 с максимальной нагрузкой 100 кН с применением специализированной оснастки с максимальным пролетом 0,44 м (см. рис. 2).

Испытания на статический изгиб производились для восьми серий образцов № 1–4 и 1'–4' согласно рис. 1. Результаты испытаний представлены в табл. 3, 4.

Сравнение итоговых напряжений балок № 1–4 при испытании на изгиб (клей ПУ):

- балки серии № 2 (3-слойные с ПО слоями) относительно серии № 1 (3-слойные без ПО слоев) — снижение итоговых напряжений на 20,2 %;
- балки серии № 4 (5-слойные с ПО слоями) относительно серии № 3 (5-слойные без ПО слоев) — снижение итоговых напряжений на 22,8 %.

Сравнение итоговых напряжений балок № 1'–4' при испытании на изгиб (клей БФ-4):

- балки серии № 2' (3-слойные с ПО слоями) относительно серии № 1' (3-слойные без ПО слоев) — снижение итоговых напряжений на 28,9 %;
- балки серии № 4' (5-слойные с ПО слоями) относительно серии № 3' (5-слойные без ПО слоев) — снижение итоговых напряжений на 28,1 %.

По результатам проведенного исследования выполнено сопоставление полученных значений напряжений (табл. 5) и деформаций (табл. 6).

Табл. 1. Результаты расчета 3-слойной балки из продольно-склеенных слоев (образцы № 1 и 1') и с перекрестно-ориентированными слоями (образцы № 2 и 2')

Table 1. Results of calculation of 3-layer beam from longitudinally glued layers (specimens No. 1 and 1') and with cross-oriented layers (specimens No. 2 and 2')

Нагрузка, кг Load, kg	Нагрузка, кН Load, kN	Образцы № 1 и 1' Specimens No. 1 and 1'		Образцы № 2 и 2' Specimens No. 2 and 2'	
		F_z , мм mm	N , МПа MPa	F_z , мм mm	N , МПа MPa
100	0,981	0,412	2,386	0,4135	2,541
200	1,962	0,824	4,772	0,827	5,081
300	2,943	1,237	7,157	1,241	7,622
400	3,924	1,649	9,543	1,654	10,16
500	4,905	2,061	11,93	2,068	12,70
600	5,886	2,473	14,31	2,481	15,24
700	6,867	2,885	16,70	2,895	17,78
800	7,848	3,297	19,09	3,308	20,32
900	8,829	3,710	21,47	3,722	22,87
1000	9,81	4,122	23,86	4,135	25,41
1100	10,791	4,534	26,24	4,549	27,95
1200	11,772	4,946	28,63	4,962	30,49
1300	12,753	5,358	31,01	5,376	33,03
1400	13,734	5,771	33,40	5,789	35,57
1500	14,715	6,183	35,79	6,203	38,11
1600	15,696	6,595	38,17	6,616	40,65
1700	16,677	7,007	40,56	7,030	43,19
1800	17,658	7,419	42,94	7,443	45,73
1900	18,639	7,832	45,33	7,857	48,27
2000	19,62	8,244	47,72	8,270	50,81
2100	20,601	8,656	50,10	8,684	53,35
2200	21,582	9,068	52,49	9,097	55,89
2300	22,563	9,480	54,87	9,511	58,43
2400	23,544	9,892	57,26	9,924	60,97
2500	24,525	10,300	59,64	10,340	63,52

Табл. 2. Результаты расчета 5-слойной балки из продольно-склеенных слоев (образцы № 3 и 3') и с перекрестно-ориентированными слоями (образцы № 4 и 4')

Table 2. Results of calculation of 5-layer beam made of longitudinally glued layers (specimens No. 3 and 3') and with cross-oriented layers (specimens No. 4 and 4')

Нагрузка, кг Load, kg	Нагрузка, кН Load, kN	Образцы № 3 и 3' Specimens No. 3 and 3'		Образцы № 4 и 4' Specimens No. 4 and 4'	
		F_z , мм mm	N , МПа MPa	F_z , мм mm	N , МПа MPa
100	0,981	0,203	1,022	0,2054	1,278
200	1,962	0,406	2,045	0,4108	2,556
300	2,943	0,609	3,067	0,6163	3,834
400	3,924	0,812	4,089	0,8217	5,112
500	4,905	1,015	5,112	1,027	6,390
600	5,886	1,218	6,134	1,232	7,669
700	6,867	1,421	7,156	1,438	8,947
800	7,848	1,624	8,179	1,644	10,22
900	8,829	1,827	9,201	1,849	11,50
1000	9,81	2,030	10,22	2,054	12,78
1100	10,791	2,233	11,25	2,260	14,06
1200	11,772	2,436	12,27	2,465	15,34

Окончание табл. 2 / End of the Table 2

Нагрузка, кг Load, kg	Нагрузка, кН Load, kN	Образцы № 3 и 3' Specimens No. 3 and 3'		Образцы № 4 и 4' Specimens No. 4 and 4'	
		F_z , мм mm	N , МПа MPa	F_z , мм mm	N , МПа MPa
1300	12,753	2,639	13,29	2,670	16,62
1400	13,734	2,842	14,31	2,876	17,89
1500	14,715	3,044	15,34	3,081	19,17
1600	15,696	3,247	16,36	3,286	20,45
1700	16,677	3,450	17,38	3,491	21,73
1800	17,658	3,653	18,40	3,697	23,01
1900	18,639	3,856	19,42	3,902	24,28
2000	19,62	4,059	20,45	4,108	25,56
2100	20,601	4,262	21,47	4,313	26,84
2200	21,582	4,465	22,49	4,519	28,12
2300	22,563	4,668	23,51	4,724	29,40
2400	23,544	4,871	24,54	4,929	30,67
2500	24,525	5,074	25,56	5,134	31,95

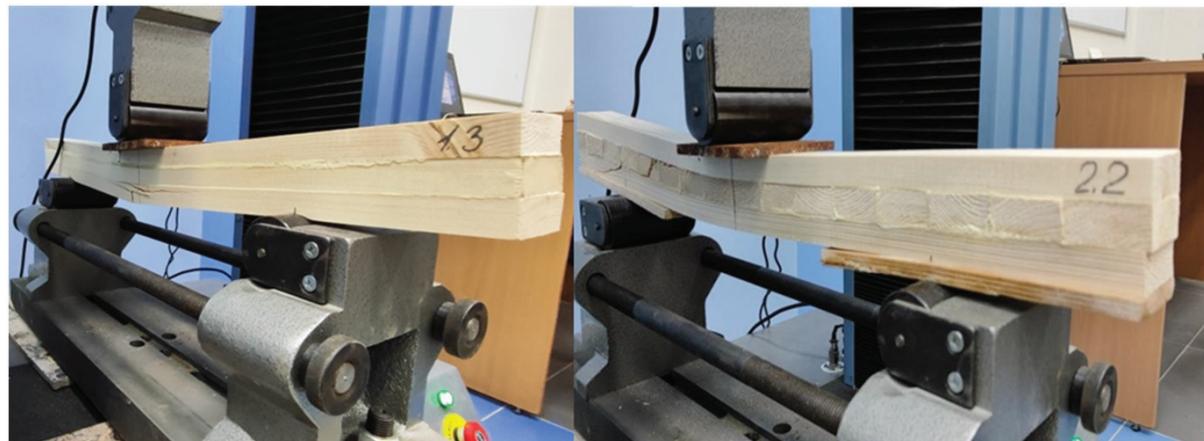


Рис. 6. Испытания образцов на изгиб в лаборатории (клей — однокомпонентный ПУ)

Fig. 6. Bending tests of specimens in the laboratory (glue — single-component PU)

Табл. 3. Результаты испытаний образцов kleеных балок (клей — однокомпонентный ПУ)

Table 3. Test results of specimens of glued beams (glue — single-component PU)

Тип балок Type of beams	Номер образца Specimen number	Разрушающая нагрузка, кН Destructive load, kN	Деформация, мм Deformation, mm	Напряжение, МПа Voltage, MPa	Среднее напряжение, МПа Medium voltage, MPa	Среднеквадратичные отклонения Standard deviations	Коэффициент вариации Coefficient of variation	Показатель надежности Reliability indicator	Итоговые напряжения, МПа Total stresses, MPa
3 слоя 3 layers	1.1	15,262	7,351	54,611	60,759	9,263	0,152	1,64	45,57
	1.2	14,481	5,709	53,817					
	1.3	17,647	8,526	73,851					

Тип балок Type of beams	Номер образца Specimen number	Разрушающая нагрузка, кН Destuctive load, kN	Деформация, мм Deformation, mm	Напряжение, МПа Voltage, MPa	Средние напряжения, МПа Medium voltage, MPa	Среднеквадратичные отклонения Standard deviations	Коэффициент вариации Coefficient of variation	Показатель надежности Reliability indicator	Итоговые напряжения, МПа Total stresses, MPa
3 слоя с ПО слоями 3 layers with CO layers	2.1	11,697	4,706	44,452	45,736	5,703	0,125	1,64	36,38
	2.2	11,955	5,645	53,274					
	2.3	10,227	6,082	39,482					
5 слоев 5 layers	3.1	28,629	7,776	41,07	40,619	4,479	0,110	1,64	33,27
	3.2	30,855	5,189	45,866					
	3.3	25,048	6,547	34,922					
5 слоев с ПО слоями 5 layers with CO layers	4.1	20,861	4,809	29,993	29,406	2,278	0,077	1,64	25,67
	4.2	22,698	5,504	31,856					
	4.3	18,382	4,141	26,37					



Рис. 7. Испытания образцов на изгиб в лаборатории (клей — фенолформальдегидный БФ-4)

Fig. 7. Bending test of specimens in laboratory (glue — phenol-formaldehyde BF-4)

Табл. 4. Результаты испытаний образцов kleеных балок (клей — фенолформальдегидный БФ-4)

Table 4. Test results of specimens of glued beams (glue — phenol-formaldehyde BF-4)

Тип балок Type of beams	Номер образца Specimen number	Разрушающая нагрузка, кН Destuctive load, kN	Деформация, мм Deformation, mm	Напряжение, МПа Voltage, MPa	Средние напряжения, МПа Medium voltage, MPa	Среднеквадратичные отклонения Standard deviations	Коэффициент вариации Coefficient of variation	Показатель надежности Reliability indicator	Итоговые напряжения, МПа Total stresses, MPa
3 слоя 3 layers	1.1'	12,124	7,337	42,576	46,037	8,599	0,187	1,64	31,93
	1.2'	13,37	2,763	57,863					
	1.3'	10,404	6,466	37,671					

Окончание табл. 4 / End of the Table 4

Тип балок Type of beams	Номер образца Specimen number	Разрушающая нагрузка, кН Destructive load, kN	Деформация, мм Deformation, mm	Напряжение, МПа Voltage, MPa	Средние напряжения, МПа Medium voltage, MPa	Среднеквадратичные отклонения Standard deviations	Коэффициент вариации Coefficient of variation	Показатель надежности Reliability indicator	Итоговые напряжения, МПа Total stresses, MPa
3 слоя с ПО слоями 3 layers with CO layers	2.1'	7,597	3,278	30,115	30,72	4,887	0,159	1,64	22,71
	2.2'	6,890	3,705	25,060					20,04
	2.3'	8,583	4,669	36,985					14,41
5 слоев 5 layers	3.1'	16,811	3,872	21,12	24,852	2,931	0,118		
	3.2'	17,617	4,425	25,156					
	3.3'	18,601	4,171	28,281					
5 слоев с ПО слоями 5 layers with CO layers	4.1'	10,706	2,417	15,53	15,918	0,914	0,057		
	4.2'	10,257	2,978	15,043					
	4.3'	11,112	2,489	17,18					

Табл. 5. Сравнительная таблица напряжений по результатам эксперимента и расчета (с учетом интерполяции)

Table 5. Comparative table of stresses according to the results of experiment and calculation (including interpolation)

Тип балки Type of beam	Тип клея Type of glue	Количество слоев Number of layers	Средняя нагрузка эксперимент, кН Average load of the experiment, kN	Итоговое напряжение эксперимент, МПа The final voltage of the experiment, MPa	Сопоставимая нагрузка Лира, кН Comparable Lira load, kN	Напряжение Лира, мм Live voltage, mm	Процент расхождения напряжений, % Percentage of voltage discrepancy, %
Без ПО слоев Without CO layers	ПУ клей PU	3	15,80	45,57	15,70	38,17	16,2
		5	28,18	33,27	28,18	29,36	11,7
С ПО слоями With CO layers	Клей БФ BF glue	3	11,97	31,93	11,77	28,63	10,3
		5	17,68	20,04	17,66	18,40	8,2
	ПУ клей PU	3	11,29	36,38	11,77	30,49	16,2
		5	20,65	25,67	20,60	26,84	4,4
	Клей БФ BF glue	3	7,69	22,71	7,85	20,32	10,5
		5	10,63	14,41	10,79	14,06	2,4

Средняя сходимость расчетных напряжений в ПК Лира 10.12 с напряжениями, полученными по результатам эксперимента, составляет 90 %. Большую сходимость показывают 5-слойные балки 93,3 %.

Средняя сходимость полученных расчетных и экспериментальных деформаций составила 88,8 %. Предельные деформации балок согласно СП 20.13330. 2016 для балок пролетом менее 1 м составляют 1/120

пролета (в нашем случае 3,67 мм). Расчетные значения деформаций более близки к нормативным.

Расчетная нагрузка (по табл. 2, 3) при максимальном допустимых деформациях (3,67 мм) для 3-слойных балок — 7,848 кН, для 5-слойных балок 17,658 кН. Наиболее приближенные значения эксперимента по разрушающей нагрузке показали образцы 3- и 5-слойные на клее БФ-4.

Табл. 6. Сравнительная таблица деформаций по результатам эксперимента и расчета

Table 6. Comparative table of deformations according to the results of experiment and calculation

Без ПО слоев Without CO layers	Тип балки Type of beam	Тип клея Type of glue	Количество слоев Number of layers	Средняя нагрузка эксперимент, кН Average load of the experiment, kN	Средняя деформация разрушения эксперимент, мм Average fracture strain of the experiment, mm	Сопоставимая нагрузка Лира, кН Comparable Lira load, kN	Деформация Лира, мм Lira deformation, mm	Процент расхождения деформаций, % Percentage of deformation divergence, %
				Средняя деформация разрушения эксперимент, мм Average fracture strain of the experiment, mm				
С ПО слоями With CO layers	ПУ клей PU	3	15,80	7,195	15,70	6,595	8,3	10,4
		5	28,18	6,504	28,18	5,830	10,4	
	Клей БФ BF glue	3	11,97	5,522	11,77	4,946	10,4	
		5	17,68	4,095	17,66	3,653	12,1	
С ПО слоями With CO layers	ПУ клей PU	3	11,29	5,478	11,77	4,962	9,4	10,5
		5	20,65	4,818	20,60	4,313	10,5	
	Клей БФ BF glue	3	7,69	3,884	7,85	3,308	14,8	
		5	10,63	2,628	10,79	2,260	14,0	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам первого этапа исследования (расчета балок в ПК Лира 10.12) можно сделать следующие выводы.

Согласно расчету в ПК Лира, напряжения 3-слойных экспериментальных балок с перекрестно-ориентированными слоями выше на 6,5 %, чем для балок без них, у 5-слойных балок с перекрестно-ориентированными слоями напряжения выше на 25 %. Таким образом, увеличение числа перекрестно-ориентированных слоев влечет за собой рост напряжений.

Деформации 3-слойных экспериментальных балок с перекрестно-ориентированными слоями выросли незначительно на 0,4 %. Деформации 5-слойных экспериментальных балок с перекрестно-ориентированными слоями в свою очередь увеличились на 1,2 %. Соответственно, можно сделать вывод, что для незначительного пролета балок (0,44 м) при применении перекрестно-ориентированных слоев происходит минимальное изменение деформаций.

По результатам второго этапа исследования (испытания образцов балок на изгиб) можно сделать следующие выводы.

Из двух типов примененных в исследовании kleев только однокомпонентный ПУ клей пригоден для склеивания образцов с перекрестно-ориентированными слоями. Также, согласно ГОСТ 20850–2014,

однокомпонентный ПУ клей рекомендован к применению для изготовления несущих kleеных деревянных конструкций.

3-слойные образцы с использованием перекрестно-ориентированных слоев, склеенные с применением однокомпонентного ПУ клея, показывают снижение прочности 20,2 % и в целом пригодны к использованию в несущих и ограждающих конструкциях с небольшими ограничениями.

Следует отметить, что 3-слойные и 5-слойные образцы с применением перекрестно-ориентированных слоев, склеенные с помощью однокомпонентного ПУ клея, показали максимальную сходимость разрушающей нагрузки, несмотря на отсутствие монолитности при изготовлении kleеной конструкции. Также эти балки имеют прогнозируемый характер разрушения, заключающийся в скальвании отдельных «обрзеков» и kleевых швов, но при сохранении эксплуатационной пригодности вплоть до полного разрушения, что, несомненно, влияет на надежность использования таких конструкций.

У 5-слойных образцов в результате испытаний выявлены наименьшие нормальные напряжения в момент разрушения. Вероятнее всего это следствие небольшого отношения расчетного пролета к высоте поперечного сечения (в нашем случае $h/l \approx 4,4$). Образцы скальвались по kleевым соединениям и отдельным слоям, не успевая достичь расчетного сопротивления на сжатие и растяжение.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Перекопская М.А., Алексеев Ю.В. Организация территорий с развитым лесопромышленным комплексом (на примере Швеции и России) // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. № 9. С. 1228–1238. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.9.1228-1238. EDN WXBSSP.
2. Altuncu D., Kasapseçkin M.A. Management and recycling of constructional solid waste in Turkey // Procedia Engineering. 2011. Vol. 21. Pp. 1072–1077. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2113
3. Mirski R., Dukarska D., Derkowska A., Czarnecki R., Dziurka D. By-products of sawmill industry as raw materials for manufacture of chip-sawdust boards // Journal of Building Engineering. 2020. Vol. 32. P. 101460. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101460
4. Теличенко В.И., Лапидус А.А., Слесарев М.Ю. Анализ и синтез образов экологически ориентированных инновационных технологий строительного производства // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 8. С. 1298–1305. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1298-1305. EDN RNDOCL.
5. Ghanbari-Ghazijahani T., Gorji Azandariani M., Vimonsatit V., Sulong N.H.R. Experiments and design of concrete-filled steel tubes with timber chips under axial compression // Thin-Walled Structures. 2023. Vol. 186. P. 110679. DOI: 10.1016/j.tws.2023.110679
6. Dias S., Tadeu A., Almeida J., António J., de Brito J. Steel-concrete bond behaviour of concrete mixes with wood waste: pull-out and bending tests of full-scale beams and columns // Construction and Building Materials. 2023. Vol. 383. P. 131343. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131343
7. Amiandamhen S.O., Adamopoulos S., Adl-Zarrabi B., Yin H., Norén J. Recycling sawmilling wood chips, biomass combustion residues, and tyre fibres into cement-bonded composites: Properties of composites and life cycle analysis // Construction and Building Materials. 2021. Vol. 297. P. 123781. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123781
8. Евсеев А.В., Черкасов А.В., Веселова П.А. Поиск оптимального шага несущих деревянных балок межэтажного перекрытия из СИП-панелей // Наука и бизнес: пути развития. 2020. № 4 (106). С. 61–63. EDN VYJZVG.
9. Патент RU № 2118589C1, МПК B27M 3/04. Способ изготовления деревянных плит из отходов пиломатериалов / Пимяков И.Н., Кудашкин Ю.Л.; заявл. № 97109711/13 от 10.06.1997; опубл. 10.09.1998. EDN JWDWPK.
10. Патент RU № 204008U1, МПК E04C 3/14. Брус из обрезков фанеры / Микрюкова Е.В., Митрофанов В.Е., Волдаев М.Н.; заявитель Поволжский государственный технологический университет; заявл. № 2020141664 от 17.12.2020; опубл. 04.05.2021. EDN PUDUGG.
11. Bond C.E., Killingsworth J., Elliott J.W., Schaller Z., Conrad S. Wood waste reduction through volumetric modular building techniques // Cleaner Waste Systems. 2025. Vol. 11. P. 100253. DOI: 10.1016/j.clwas.2025.100253
12. Mayencourt P., Cousin T., Ganeles S., Mueller C. Zero-waste fabrication methodology for structurally optimized mass timber beams // Journal of Cleaner Production. 2025. Vol. 490. P. 144518. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.144518
13. Chen H., Ma W., Kasal B., Wei Y., Yan L. Flexural behavior of adhesively bonded cross-laminated timber-concrete composite (TCC) panel with glass-fiber textile mesh as reinforcement in concrete: Experimental studying and numerical simulation // Engineering Structures. 2025. Vol. 330. P. 119916. DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.119916
14. Dong W., Rose C.M., Stegemann J.A. Cross-laminated secondary timber: Validation of non-destructive assessment of structural properties by full-scale bending tests // Engineering Structures. 2024. Vol. 298. P. 117029. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.117029
15. Llana D.F., González-Alegre V., Portela M., Íñiguez-González G. Cross Laminated Timber (CLT) manufactured with European oak recovered from demolition: Structural properties and non-destructive evaluation // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 339. P. 127635. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127635
16. Малышкин А.П., Максимова О.М. Отечественный опыт применения LVL-бруса в несущих конструкциях // Вестник евразийской науки. 2023. Т. 15. № 5. EDN NNZPNG.
17. Лукин М.В., Чибрикин Д.А., Роцина С.И. Численные исследования модифицированных композитных балок с учетом физической нелинейности древесины // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2023. № 5 (773). С. 5–19. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-773-5-5-19. EDN OWKAIK.
18. Мартынов В.А., Мясников Д.О., Роцина С.И. Исследование прочности и деформативности kleеных деревянных балок с ламелями из термически поврежденной древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на основе планирования эксперимента // Лесотехнический журнал. 2024. Т. 14. № 1 (53). С. 170–189. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.1/10. EDN OLMPEI.
19. Фадеев Р.Н., Лисятников М.С. Развитие области применения модифицированной древесины в комбинированных kleеных деревянных конструкциях // Международная конференция по физике материалов, строительным конструкциям и технологиям в строительстве, промышленной и производственной инженерии (MPCPE-2024) : сб. тр. V Междунар. науч.-техн. конф. 2024. С. 230–236. EDN LPDGJR.
20. Чибрикин Д.А., Лукин М.В., Лукина А.В., Тюрикова Т.В., Роцина С.И. Численное исследование напряженно-деформированного состояния модифицированной деревянной балки // Известия высших

учебных заведений. Лесной журнал. 2022. № 3 (387). С. 167–178. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-167-178. EDN PXYIDF.

21. Repin V.A., Lukina A.V., Strekalkin A.A. Parameterization of Maxwell—Cremona diagram for determining forces in elements of a scissors truss // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2024. Vol. 20. Issue 2. Pp. 97–108. DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-2-97-108. EDN KZTKLX.

22. Минигалеева С.А. Численное моделирование деревянной балки в программном комплексе ANSYS // Современная наука: проблемы, идеи, тенденции : мат. Междунар. (заочной) науч.-практ. конф. 2021. С. 95–101. EDN TQGHVV.

23. Lukina A., Popova M., Sergeev M., Chibrikov D. Polymer compositions for restoration of destracted

wooden structures // E3S Web of Conferences. 2023. P. 03002. DOI: 10.1051/e3sconf/202340103002. EDN BVYQKA.

24. Лукина А.В., Сергеев М.С. Исследование напряженно-деформированного состояния композитных деревянных балок // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения : мат. Междунар. академических чтений. 2021. С. 183–190. EDN DVLLQV.

25. Устарханов О.М., Булгаков А.И., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О. Расчет трехслойных балок с учетом клеевого шва по методу конечных элементов с помощью ПК Лира // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2012. № 5 (168). С. 69–72. EDN PCXBZX.

Поступила в редакцию 15 июля 2025 г.

Принята в доработанном виде 28 октября 2025 г.

Одобрена для публикации 21 ноября 2025 г.

О Б А В Т О Р АХ: Роман Николаевич Фадеев — аспирант; Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ); 60000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87; SPIN-код: 9418-6728, РИНЦ ID: 1272133, ResearcherID: LFT-9506-2024, ORCID: 0009-0004-7803-8401; romazatti@yandex.ru;

Михаил Сергеевич Лисятников — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций; Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ); 60000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87; SPIN-код: 4089-7216, РИНЦ ID: 821084, Scopus: 59195815500, ResearcherID: V-6057-2018, ORCID: 0000-0002-5262-6609; mlisyatnikov@mail.ru;

Михаил Владимирович Лукин — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 6785-0793, РИНЦ ID: 859961, Scopus: 56195421800, ResearcherID: E-8085-2019, ORCID: 0000-0002-2033-3473; mihail_lukin_22@mail.ru;

Светлана Ивановна Рощина — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций; Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ); 60000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87; SPIN-код: 4159-8636, РИНЦ ID: 422868, Scopus: 57131029400, 57204526168, ResearcherID: A-7722-2019, ORCID: 0000-0003-0356-1383; rsi3@mail.ru.

Вклад авторов:

Фадеев Р.Н. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, написание исходного текста, итоговые выводы.

Лисятников М.С. — развитие методологии, доработка текста, итоговые выводы.

Лукин М.В. — развитие методологии, доработка текста.

Рощина С.И. — научное руководство.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Perekopskaya M.A., Alekseev Yu.V. Management of territories that accommodate advanced timber industry enterprises (as illustrated by Sweden and Russia). *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(9):1228-1238. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.9.1228-1238. EDN WXBSSP. (rus.).
2. Altuncu D., Kasapseçkin M.A. Management and recycling of constructional solid waste in Turkey. *Procedia Engineering*. 2011; 21:1072-1077. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2113
3. Mirski R., Dukarska D., Derkowsk A., Czarnecki R., Dziurka D. By-products of sawmill industry as raw materials for manufacture of chip-sawdust boards.

Journal of Building Engineering. 2020; 32:101460. DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101460

4. Telichenko V.I., Lapidus A.A., Slesarev M.Yu. Analysis and synthesis of images of environmentally oriented innovative technologies of construction production. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(8):1298-1305. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1298-1305. EDN RNDCL. (rus.).

5. Ghanbari-Ghazijahani T., Gorji Azandariani M., Vimonsatit V., Sulong N.H.R. Experiments and design of concrete-filled steel tubes with timber chips under axial compression. *Thin-Walled Structures*. 2023; 186:110679. DOI: 10.1016/j.tws.2023.110679

6. Dias S., Tadeu A., Almeida J., António J., de Brito J. Steel-concrete bond behaviour of concrete mixes with wood waste: pull-out and bending tests of full-scale beams and columns. *Construction and Building Materials*. 2023; 383:131343. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131343

7. Amiandamhen S.O., Adamopoulos S., Adl-Zarabi B., Yin H., Norén J. Recycling sawmilling wood chips, biomass combustion residues, and tyre fibres into cement-bonded composites: Properties of composites and life cycle analysis. *Construction and Building Materials*. 2021; 297:123781. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123781

8. Evseev A.V., Cherkasov A.V., Veselova P.A. Search for the optimal spacing of load-bearing wooden beams of interfloor overlap from structural insulated panels. *Science and Business: Ways of Development*. 2020; 4(106):61-63. EDN VYJZVG. (rus.).

9. Patent RU No. 2118589C1, IPC B27M 3/04. *Method for manufacturing wooden boards from sawn timber waste* / Pimyakov I.N., Kudashkin Yu.L.; Appl. No. 97109711/13 dated 10.06.1997; published 10.09.1998 EDN JWDWPK.

10. Patent RU No. 204008U1, IPC E04C 3/14. *Beam from plywood scraps* / Mikryukova E.V., Mitrofanov V.E., Voldayev M.N.; applicant Volga Region State Technological University; appl. No. 2020141664 dated 17.12.2020; published 04.05.2021. EDN PUDUGG.

11. Bond C.E., Killingsworth J., Elliott J.W., Schaller Z., Conrad S. Wood waste reduction through volumetric modular building techniques. *Cleaner Waste Systems*. 2025; 11:100253. DOI: 10.1016/j.clwas.2025.100253

12. Mayencourt P., Cousin T., Ganeles S., Mueller C. Zero-waste fabrication methodology for structurally optimized mass timber beams. *Journal of Cleaner Production*. 2025; 490:144518. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.144518

13. Chen H., Ma W., Kasal B., Wei Y., Yan L. Flexural behavior of adhesively bonded cross-laminated timber-concrete composite (TCC) panel with glass-fiber textile mesh as reinforcement in concrete: Experimental

studying and numerical simulation. *Engineering Structures*. 2025; 330:119916. DOI: 10.1016/j.engstruct.2025.119916

14. Dong W., Rose C.M., Stegemann J.A. Cross-laminated secondary timber: Validation of non-destructive assessment of structural properties by full-scale bending tests. *Engineering Structures*. 2024; 298:117029. DOI: 10.1016/j.engstruct.2023.117029

15. Llana D.F., González-Alegre V., Portela M., Íñiguez-González G. Cross Laminated Timber (CLT) manufactured with European oak recovered from demolition: Structural properties and non-destructive evaluation. *Construction and Building Materials*. 2022; 339:127635. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127635

16. Malyshkin A.P., Maximova O.M. National experience of LVL-beam application in load-bearing structures. *The Eurasian Scientific Journal*. 2023; 15(5). EDN NNZPNG. (rus.).

17. Lukin M.V., Chibrikin D.A., Roshchina S.I. Numerical studies of modified composite beams taking into account the physical nonlinearity of wood. News of Higher Educational Institutions. *Construction*. 2023; 5(773):5-19. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-773-5-19. EDN OWKAIK. (rus.).

18. Martynov V., Myasnikov D., Roshchina S. Investigation of the strength and deformability of glued wooden beams with lamellas made of thermally damaged (*Pinus Sylvestris L.*) wood based on experimental planning. *Forestry Engineering Journal*. 2024; 14(1):(53):170-189. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.1/10. EDN OLMPEI. (rus.).

19. Fadeev R.N., Mikhail S.L. Development of the field of application of modified wood in combined glued wooden structures. *International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Manufacturing Engineering (MPCPE-2024) : Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference*. 2024; 230-236. EDN LPDGJR. (rus.).

20. Chibrikin D.A., Lukin M.V., Lukina A.V., Tyurikova T.V., Roshchina S.I. Numerical study of the stress-strain state of a modified wooden beam. *Russian Forestry Journal*. 2022; 3(387):167-178. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-3-167-178. EDN PXYIDF. (rus.).

21. Repin V.A., Lukina A.V., Strekalkin A.A. Parameterization of Maxwell — Cremona diagram for determining forces in elements of a scissors truss. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024; 20(2):97-108. DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-2-97-108. EDN KZTKLX.

22. Minigaleeva S.A. Numerical modeling of a wooden beam in the ANSYS software package. *Modern science: problems, ideas, trends : materials of the International (correspondence) scientific and practical conference*. 2021; 95-101. EDN TQGHVV. (rus.).

23. Lukina A., Popova M., Sergeev M., Chibrikov D. Polymer compositions for restoration of destroyed wooden structures. *E3S Web of Conferences*. 2023; 03002. DOI: 10.1051/e3sconf/202340103002. EDN BVYQKA.
24. Lukina A.V., Sergeev M.S. Investigation of the stress-strain state of composite wooden beams. Safety of the construction stock of Russia. *Problems and solutions: materials of the International academic readings*. 2021; 183-190. EDN DVLLQV. (rus.).
25. Ustarkhanov O.M., Bulgakov A.I., Muselevich Kh.M., Ustarkhanov T.O. Calculation of three-layer beams based on adhesive joint finite element method with through the lira. University News. North-Caucasian Region. *Technical Sciences Series*. 2012; 5(168):69-72. EDN PCXBZX. (rus.).

Received July 15, 2025.

Adopted in revised form on October 28, 2025.

Approved for publication on November 21, 2025.

BIO NOTES: **Roman N. Fadeev** — postgraduate student; **Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (VISU)**; 87 Gorky st., Vladimir, 60000, Russian Federation; SPIN-code: 9418-6728, ID RSCI: 1272133, ResearcherID: LFT-9506-2024, ORCID: 0009-0004-7803-8401; romazatti@yandex.ru;

Mikhail S. Lisyatnikov — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Structures; **Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (VISU)**; 87 Gorky st., Vladimir, 60000, Russian Federation; SPIN-code: 4089-7216, ID RSCI: 821084, Scopus: 59195815500, ResearcherID: V-6057-2018, ORCID: 0000-0002-5262-6609; mlisyatnikov@mail.ru;

Mikhail V. Lukin — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Architectural and Construction Design and Environmental Physics; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 6785-0793, ID RSCI: 859961, Scopus: 56195421800, ResearcherID: E-8085-2019, ORCID: 0000-0002-2033-3473; mihail_lukin_22@mail.ru;

Svetlana I. Roschina — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Structures; **Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov (VISU)**; 87 Gorky st., Vladimir, 60000, Russian Federation; SPIN-code: 4159-8636, ID RSCI: 422868, Scopus: 57131029400, 57204526168, ResearcherID: A-7722-2019, ORCID: 0000-0003-0356-1383; rsi3@mail.ru.

Contribution of the authors:

Roman N. Fadeev — scientific guidance, research concept, development of methodology, writing the source text, final conclusions.

Mikhail S. Lisyatnikov — development of methodology, revision of the text, final conclusions.

Mikhail V. Lukin — development of methodology, revision of the text.

Svetlana I. Roschina — scientific guide.

The authors declare that there is no conflict of interest.