



Технология изготовления клееных деревянных конструкций с применением древесины, поврежденной огневым воздействием лесного пожара

Владислав А. Мартынов¹, martinov3369@gmail.com <https://orcid.org/0000-0002-6570-0265>

Михаил С. Лисятников¹, mlisyatnikov@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-5262-6609>

Анастасия В. Лукина¹, pismo.33@yandex.ru <https://orcid.org/0000-0001-6065-678X>

Светлана И. Рощина¹, rsi3@mail.ru <https://orcid.org/0000-0003-0356-1383>

¹ Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Институт архитектуры, строительства и энергетики, ул. Горького, 87, г. Владимир, 600000, Россия

Бережное отношение к природным ресурсам – одно из важнейших составляющих устойчивого развития народного хозяйства РФ. Этому способствует использование низкосортной древесины, в том числе и поврежденной воздействием пожара, в качестве конструкционного материала, что позволит сократить расходы на производство клееных деревянных конструкций (КДК) за счет использования более дешевого сырья. На основании систематического анализа источников и собственных эмпирических исследований приводятся особенности новой технология изготовления деревоклееных балок пролетом 6.0 м с применением древесины, поврежденной огневым воздействием лесного пожара. Данное исследование направлено на снижение материалоемкости клееных деревянных конструкций за счет частичного использования низкосортной древесины без снижения несущей способности балок. Установлено, что при замене 36% средних ламелей в сечении на термически поврежденную древесину снижение несущей способности балочной конструкции относительно балки, изготовленной целиком из древесины I сорта, составило 9.7%, при замене 62% древесины – 16.06%. Применение термически поврежденной древесины при изготовлении клееных деревянных конструкций позволит значительно сократить использование высокосортного пиломатериала при некоторых изменениях технологического процесса, не приводящих к его удорожанию. Используя положительный опыт испытания балочных КДК, предполагается дальнейшее исследование применения термически поврежденной древесины в сжато-изгибаемых конструкциях.

Ключевые слова: *огневое воздействие древесины, деревянные балки, лесные пожары, композитная балка, технология, рациональное использование, клеевые деревянные конструкции (КДК).*

Финансирование: данной исследование не получало внешнего финансирования.

Благодарности: авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи. Исследования проводились с использованием оборудования межрегионального многопрофильного и междисциплинарного центра коллективного пользования перспективных и конкурентоспособных технологий по направлениям развития и применения в промышленности/машиностроении отечественных достижений в области нанотехнологий (соглашение №075-15-2021-692 от 5 августа 2021 года).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Технология изготовления клееных деревянных конструкций с применением древесины, поврежденной огневым воздействием лесного пожара / В. А. Мартынов, М. С. Лисятников, А. В. Лукина, С. И. Рощина // Лесотехнический журнал. – 2023. – Т. 13. – № 4 (52). – Ч. 1. – С. 158–177. – Библиогр.: с. 170–176 (40 назв.). – DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/10>.

Поступила 16.08.2023 Пересмотрена 27.11.2023. Принята 28.11.2023. Опубликовано онлайн 29.12.2023

Review

Manufacturing technology of glued wooden structures with the use of wood damaged by the fire impact of a forest fire

Vladislav A. Martinov¹, martinov3369@gmail.com  <https://orcid.org/0000-0002-6570-0265>

Mikhail S. Lisyatnikov¹, mlisyatnikov@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0002-5262-6609>

Anastasiya V. Lukina¹, pismo.33@yandex.ru  <https://orcid.org/0000-0001-6065-678X>

Svetlana I. Roshchina¹ ✉ rsi3@mail.ru  <https://orcid.org/0000-0003-0356-1383>

¹Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Institute of Architecture Construction and Energy Engineering, st. Gorky, 87, Vladimir, 600000, Russian Federation

Abstract

Caring for natural resources is one of the most important components of the sustainable development of the national economy of the Russian Federation. This is facilitated by the use of low-grade wood, including fire-damaged wood, as a structural material, which will reduce the cost of producing laminated wood structures (GWB) through the use of cheaper raw materials. Based on a systematic analysis of sources and our own empirical research, the features of a new technology for manufacturing laminated wood beams with a span of 6.0 m using wood damaged by fire from a forest fire are presented. This study is aimed at reducing the material intensity of laminated timber structures through the partial use of low-grade wood without reducing the load-bearing capacity of the beams. It was found that when replacing 36% of the middle lamellas in the cross-section with thermally damaged wood, the reduction in the load-bearing capacity of the beam structure relative to a beam made entirely of grade I wood was 9.7%, and when replacing 62% of the wood – 16.06%. The use of thermally damaged wood in the manufacture of laminated wood structures will significantly reduce the use of high-grade lumber with some changes in the technological process that do not lead to an increase in its cost. Using the positive experience of testing beam FDCs, it is planned to further study the use of thermally damaged wood in compression-bending structures.

Keywords: *fire impact of wood, wooden beams, forest fires, composite beam, technology, rational use, adhesive wooden structures.*

Funding: this research received no external funding.

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to the peer review. The research was carried out using the equipment of the interregional multidisciplinary and interdisciplinary center for the collective use of promising and competitive technologies in the areas of development and application in industry/mechanical engineering of domestic achievements in the field of nanotechnology (agreement No. 075-15-2021-692 of August 5, 2021).

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Martinov V.A., Lisyatnikov M.S., Lukina A.V., Roshchina S.I. (2023). Manufacturing technology of glued wooden structures with the use of wood damaged by the fire impact of a forest fire. *Lesotekhnicheskii zhurnal* [Forestry Engineering journal], Vol. 13, No. 4 (52), part 1. pp. 158-177 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2023.4/10>.

Received 16.08.2023. *Revised* 27.11.2023. *Accepted* 28.11.2023. *Published online* 29.12.2023.

Введение

Древесина – ценнейший материал, обладающий множеством полезных физико-механических и эксплуатационных свойств, позволяющих использовать его в различных областях, таких как деревообрабатывающая промышленность, строительство, транспорт и энергетика. В целях экономии природных ресурсов следует максимально эффективно использовать древесину, в т.ч. в качестве конструкционного материала. Одним из ключевых аспектов исследований лесов является определение технического качества древесины, поврежденной термическим воздействием лесного пожара, и способах ее дальнейшего применения [6, 18, 30].

При прохождении низового пожара повреждения деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) носят весьма различный характер - от фатального, до совершенно незначительного. Жизнеспособность тех деревьев, у которых порыжела, посерела или тем более осыпалась основная часть хвои, не вызывает сомнения. Такие деревья относятся лесопатологами к категории отмирающих или даже свежего сухостоя (вполне правомерно) и подлежат удалению из насаждения по нормам санитарной безопасности (Правила санитарной безопасности в лесах РФ / Утверждены Правительством Российской Федерации 29 июня 2007 г. № 414. – 2007. – 6 с). А вот жизнеспособность тех деревьев, у которых произошел ожог корневой шейки, закопчен ствол, но крона осталась целой и внешне не отличается от деревьев, не затронутых огнем, объективно диагностировать по внешним признакам крайне сложно. Как известно, поврежденное пожаром дерево теряет иммунитет, становясь более уязвимым к воздействию короедов и нашествию паразитов. Увеличивающаяся продолжительность и интенсивность последних сезонов лесных пожаров ежегодно вызывают массовое поражение миллионов деревьев, способствуя последующей вспышке различных видов подкорковых насекомых, заражающих деревья, не затронутые пожаром [5-6, 21-22].

В предыдущих исследованиях авторами статьи [2-4] было установлено, что частично обугленная древесина сохраняет достаточно высокие физико-механические свойства, что дает возможность использовать ее как конструкционный материал. На прочность древесины в значительной степени оказывает влияние состояние камбия. Степень его повреждения

можно оценить визуально: внешним признаком омертвления камбия является его побурение. Камбий весьма чувствителен к повышению температуры: в различных литературных источниках приведены значения в 54-57 °С как критичные для состояния камбия и жизни дерева в целом [5, 7-10].

Материалы и методы

Объект и предмет исследования

Объектом является новая технология изготовления деревоклееных балок пролетом 6.0 м с учетом требований к клееным деревянным конструкциям (КДК), регламентированным ГОСТ 20850 «Конструкции деревянные клееные несущие. Общие технические условия». Согласно данному нормативному документу, балки пролетом до 7,5 м относятся к классам функционального назначения 2а и 2б, что позволяет использовать при их изготовлении древесину 3-го сорта, к которому, по результатам ранее выполненных испытаний [19, 24], можно отнести древесину, поврежденную огнем воздействием до 15 % от площади поперечного сечения ствола [19, 24].

Предметом исследования является снижение материалоемкости КДК за счет частичного использования низкосортной древесины без снижения несущей способности балок [6,11].

Сбор данных

Для комплексного изучения прочностных и физических характеристик древесины *P. sylvestris*, поврежденной термическим воздействием лесного пожара, были отобраны образцы деревьев из трех лесных хозяйств Якутии. Тип пожара: низовой, среднего масштаба. Отбор образцов произведен в течение двух лет, прошедших после пожара. Повреждение древостоя огнем воздействием составляло 10-15% по поперечному сечению.

Образцы были отобраны из комлевой (на высоте 1,3 м), срединной, а также верхушечной частей ствола дерева. Стандартные образцы для испытаний были изготовлены из каждого среза на разной глубине: в центре, на глубине 0.5 радиуса (в середине) и на периферии (около коры).

В качестве эталона были взяты образцы неповрежденной древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.).

Наряду с этим авторами статьи выполнен широкий комплекс исследований физико-механических

и прочностных свойств древесины, поврежденной огненным воздействием лесного пожара, и анализ механических свойств древесины путем сравнения ее характеристик с эталонными образцами, т.е. не подвергавшимся воздействию пожара. Для этого проведены экспериментальные исследования [12-15] стандартных образцов термически поврежденной древесины и древесины I сорта на сжатие вдоль волокон, скалывание вдоль волокон, поперечный изгиб и растяжение в соответствии с ГОСТ 16483.10-73, ГОСТ 16483.5-73*, ГОСТ 16483.3-84, ГОСТ 16483.23-73 (рис. 1), микроскопический анализ термически поврежденной древесины, а также испытания клеевого соединения на стойкость к температурно-влажностным воздействиям [12-15]. Для проведения исследований древесины были отобраны несколько деревьев (по среднему диаметру), подвергшихся воздействию низового пожара. Выбор данного типа пожара представляет определенный научный и практический интерес в плане дальнейшего использования древесины. Из каждого дерева были вырезаны срезы по высоте ствола. Из каждого среза образцы изготавливали по радиусу: в центре, на 0,5 радиуса (середина) и на периферии [7].



Рисунок 1. Испытание образцов термически поврежденной древесины: а) на сжатие вдоль волокон, б) на скалывание вдоль волокон, в) на поперечный изгиб, г) на растяжение

Figure 1. Testing samples of thermally damaged wood: a) for compression along the fibers, б) for shearing along the fibers, в) for transverse bending, д) for tension

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Для оценки адгезионных свойств было исследовано качество клеевого шва в образцах поврежденной пожаром древесины, при испытании циклическими температурно-влажностными воздействиями. Во время испытания использовался тот же клей, что и для производства самих КДК. Склеивание ламелей производится клеевой системой отдельного нанесения клея и отвердителя ММФ 1255/7555 AkzoNobel Cascomin на основе меламин. Данная ММФ система (меламин, мочевины, формальдегид) является одной из самых широко используемых как в России, так и в Европе. Данная клеевая система отличается очень коротким временем прессования (от 35 минут), высокой экологичностью и безопасностью, хорошей адгезией и проникающей способностью, высокой водо- и атмосферостойкостью, что позволяет применять ее для конструкций, работающих при отрицательных температурах. Следует также отметить, что данная клеевая система обладает конкурентной стоимостью. [25-26]. Испытания клеевого соединения проводились в соответствии с ГОСТ 33121 при помощи климатической камеры КТХВ-1000. Образцы древесины последовательно подвергались замачиванию, замораживанию, оттаиванию и сушке. Механические испытания на скалывание в клеевых соединениях образцов были проведены после 40 циклов температурно-влажностных воздействий. Установлено, что разрушение всех образцов произошло не по клеевому шву, а по волокнам материала. Следовательно, можно сделать вывод о достаточной адгезии термически поврежденной древесины, а также высоком качестве и прочности клеевого соединения (рис. 2).

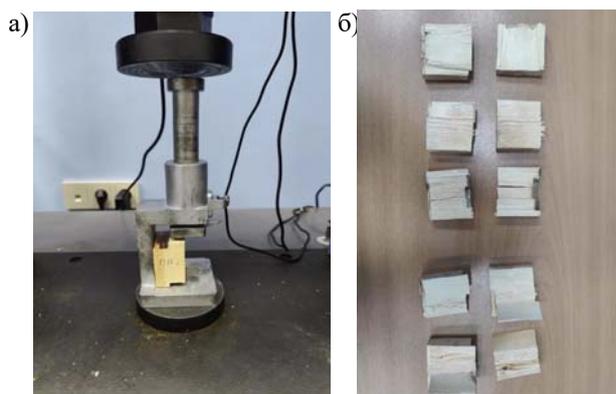


Рисунок 2 – Процесс испытания клевого соединения:
а) общий вид процесса испытания, б) характер разрушения образцов

Figure 2 - The process of testing the adhesive connection:
а) a general view of the test process, б) the nature of the destruction of the samples

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Анализ данных

По результатам испытаний была проведена статистическая обработка данных. Отбор образцов из генеральной совокупности производили в одну стадию с использованием систематического отбора [2]. Минимальное количество испытываемых образцов (n_{\min}) определяли по формуле:

$$n_{\min} = \frac{V^2 \cdot t_{\gamma}^2}{P_{\gamma}^2} \quad (1)$$

где V - коэффициент вариации свойства древесины, %;

γ -требуемая доверительная вероятность;

t_{γ} -квантиль распределения Стьюдента;

P_{γ} - относительная точность определения выборочного среднего с доверительной вероятностью.

Относительную точность определения выборочного среднего принимали 5 % при доверительной вероятности 0,95. На случай частичной замены или порчи образцов, количество образцов было увеличено на 20 % относительно расчетного количества в каждом виде испытании.

Результаты и обсуждение

Блок-схема новой технологии изготовления КДК из термически поврежденной древесины

В общем виде технологию изготовления клееных деревянных конструкций с применением древесины, поврежденной огнем, можно

представить в виде принципиальной блок-схемы, представленной на рис. 3:



Рисунок 3. Принципиальная блок-схема изготовления КДК:

1 – отбор деревьев, поврежденных пожаром, пригодных для изготовления КДК; 2 - визуальный контроль и распил древесины, поврежденной огнем воздействием; 3 - приемка входящего обрезного пиломатериала; 4 - контроль качества и формирование сушильных пакетов; 5 - буферный склад хранения пиломатериалов; 6 - сушка пиломатериала в конвективных сушильных камерах; 7 - транспортировка сухого материала в цех переработки; 8 - черновая калибровка пиломатериала, вскрытие дефектов; 9 - маркировка и вырезка недопустимых дефектов; 10 - торцевое сращивание; 11 - буфер хранения сращенной заготовки для адгезии клея; 12 - чистовая калибровка сращенной ламели; 13 - клеенанесение; 14 - запрессовка балки в силовом поле; 15 - буфер хранения клееной заготовки; 16 - калибровка клееной балки; 17 - изготовление сборочных соединений; 18 - формирование транспортного пакета и отгрузка.

Figure 3. Schematic flowchart for the manufacture of glued timber structures:

1 - selection of trees damaged by fire, suitable for the manufacture of glued wooden structures; 2 - inspection and sawing of fire-damaged wood; 3 - acceptance of incoming edged lumber; 4 - quality control and formation of drying bags; 5 - buffer warehouse for storing lumber; 6 - drying lumber in convective drying chambers; 7 - transportation of dry material to the processing shop; 8 - rough calibration of lumber, opening of defects; 9 - marking and cutting out unacceptable defects; 10 - end splicing; 11 - storage buffer of the spliced workpiece for adhesive adhesion; 12 - final calibration of the spliced lamella; 13 - glue application; 14 - pressing the beam in the force field; 15 - storage buffer for glued blanks; 16 - calibration of the glued beam; 17 - production of assembly joints; 18 - formation of a transport package and shipment.

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Обоснование возможности применения термически поврежденной древесины

В ходе испытаний [12-15] было установлено, что наибольшее снижение прочности по всем видам проведенных испытаний наблюдается в образцах, взятых из верхней части ствола дерева. Так, при статическом изгибе относительно «эталонной» древесины снижение предела прочности составляет более 20%, при сжатии вдоль волокон – до 28.8%, при растяжении – 30.6%, при скалывании вдоль волокон – 22.7%. Минимальное снижение прочности во всех видах испытаний наблюдалось у образцов, отобранных из комлевой части ствола: при статическом изгибе снижение предела прочности составило почти 6.0%, при сжатии вдоль волокон — 15.0%, при растяжении вдоль волокон — 8.4%, при скалывании вдоль волокон – 10.0% [2-4].

По результатам исследований древесины, поврежденной огнем воздействием пожара, установлено, что, несмотря на сниженные прочностные характеристики, она пригодна для использования в качестве конструкционного материала при изготовлении клееных деревянных конструкций [2-4, 6-9].

Отбор сырьевой древесины, поврежденной огнем воздействием

Технологический процесс отбора и распиловки леса, поврежденного огнем воздействием лесного пожара, на пиломатериал для изготовления КДК несколько отличается от классического процесса обработки древесины. Отбор древесины следует осуществлять в течение первых двух лет после пожара. Исследования [2-4, 7-9] показывают, что древесина *P. sylvestris* через 37 месяцев после низового пожара почти полностью сохраняет физико-механические свойства. При этом разрушаются полностью или частично анатомические элементы древесины, в первую очередь смоляные ходы. Смола сильно пропитывает комлеву часть ствола, чем повышает её плотность. Но одновременно создаются благоприятные условия развития грибных окрасок. Такого рода изменения вызывают грибы, получившие название древоокрашивающих. Проникая в древесину, гифы этих грибов распространяются по полостям клеток, разрушая их содержимое. Плотность при этом снижается, но механические свойства практически сохраняются [7-9].

Перед началом распила следует при помощи измерительных приборов оценить степень повреждения ствола по радиальному срезу. Степень обугливания можно также оценить методом пенетрации (протыкания) с помощью любого тонкого заостренного предмета: шила, ножа, штангенциркуля, стальной линейки. Использование этого метода может быть затруднено в зимний период, когда частицы воды замерзают в порах и трещинах древесины.

Глубина обугливания также включает в себя, кроме непосредственно толщины слоя угля, измеряемого пенетрацией, величину потери сечения древесины. Потеря сечения образуется в результате нарушения смежных с обугленной частью древесины слоев, непригодных для использования [16, 28-29]. Поэтому для заготовки пиломатериала не рекомендуется использовать древесину с огневым поражением более 15% поперечного сечения ствола, поскольку после распила выход полезной древесины будет минимален (рис. 4).



Рисунок 4. Процесс отбора древесины, поврежденной огнем воздействием

Figure 4. The process of selecting wood damaged by fire
Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

При наличии на бревне глубоких локальных повреждений в виде подгаров, оголения потемневшего камбия, их следует вскрывать вручную, и, при необходимости, вырезать, при этом остаточная длина хлыста не должна быть менее 3 м.

Распил древесины может производиться как радиальным, так и тангенциальным методом, при этом следует визуально контролировать наличие подгаров и побурения камбия. Изменение цвета камбия

говорит о его отмирании в процессе пожара, рыхлой пористой структуре вследствие быстрого испарения влаги, и, как следствие, низких механических характеристиках [8-9]. Небольшие потемнения древесины допускаются при изготовлении КДК классов функционального назначения 2а и 2б согласно ГОСТ 20850.

Приемка входящего обрезного пиломатериала

Пиломатериалы хвойных пород по качеству древесины и обработки должны соответствовать ГОСТ 8486. Качество пилопродукции так же, как и круглых материалов, зависит от наличия пороков древесины, дефектов и качества обработки. Оценка качества пиломатериалов (размеры пороков и дефектов) производится по худшей пласти и кромке, а брусков и брусьев квадратного сечения — по худшей стороне.

Основными пороками древесины, в значительной степени влияющими на сорт пилопродукции, являются гниль, сучки, трещины, пороки строения древесины, поражения грибами и насекомыми, дефекты обработки, деформации. Пороки нормируются в каждом сорте на 1 м или на всю длину сортимента.

Для классов функционального назначения клееных деревянных конструкций (КДК) 2а и 2б согласно ГОСТ 20850 допускается использование древесины 1, 2 и 3 сорта. При этом возможно наличие некоторых дефектов, но не допускаются инородные включения и любые гнили, за исключением пестрой ситовой ядровой гнили, которая допускается только в 4-м сорте в виде пятен и полос общей площадью не более 10% площади пиломатериала.

На данном этапе пиломатериал естественной влажности поступает на склад исходного сырья, сортируется по качеству и штабелируется в сушильные пакеты, которые затем перемещаются на промежуточное хранение перед камерной сушкой.

Камерная сушка термически поврежденной древесины

Камерная сушка пиломатериалов – это процесс, который позволяет сократить количество влаги в древесине до заданного уровня. Этот процесс является важным этапом производства деревянных изделий, так как влажность древесины влияет на ее прочность и долговечность.

Камерная сушка происходит в специальных камерах, где древесина подвергается воздействию

тепла и воздуха. Процесс начинается с загрузки пиломатериалов в камеру на деревянных «прокладках» одинаковой толщины, которые способствуют качественной, быстрой и равномерной сушке с минимальными потерями на растрескивание досок. Температура внутри камеры пошагово повышается до 60-80 °С, при этом древесина начинает испарять влагу. Равномерность испарения влаги контролируется стационарными влагомерами древесины серии СВД, предназначенными для дистанционного определения влажности пиломатериалов в сушильных камерах с помощью четырех кондуктометрических датчиков. Современные вакуумные сушильные камеры оснащены автоматикой, позволяющей получить качественный сухой пиломатериал в автоматическом режиме. Управление сушкой задается измерениями относительной влажности в древесине.

Процесс сушки обычной сырьевой древесины занимает до 6 суток для достижения древесиной влажности 10-12%. Такое довольно длительное время, занимаемое технологическим процессом, практически полностью исключает появление усадочных трещин. После окончания сушки камера охлаждается, пакеты древесины перемещаются в цех КДК, где они выдерживаются не менее 8 часов в соответствующих условиях (рис. 5).



Рисунок 5. Пакет древесины после сушки

Figure 5. Wood package after drying

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Следует отметить, что время сушки термически поврежденной древесины до требуемой влажности сокращается, поскольку влажность такой древесины значительно ниже в связи с потерей основного

количества влаги в процессе пожара. В данном случае процесс сушки термически поврежденной древесины составил трое суток до влажности 10%. Это приводит к некоторым неудобствам, поскольку сушить пиломатериал, полученный из древесины, поврежденной пожаром, следует отдельно от основного пакета сырьевой древесины. При этом важно контролировать влажность каждой поступившей на производство партии пиломатериала ручным измерителем влажности древесины (влажмером).

Калибровка материала, полученного из термически поврежденной древесины

После процесса выдержки древесина передается на участок черновой обработки, где удаляются дефекты, которые недопустимы для использования в производстве клееных несущих конструкций.

На этом этапе обработки доски сначала проверяются на соответствие параметров влажности и геометрии, подвергаются калибровке на четырехстороннем продольно-строгальном станке «SCM profiset 60» для вскрытия дефектов и придания четкой геометрии для последующей обработки. Дефекты маркируются вручную и вырезаются на автоматическом торцовочном станке (рис. 6).



Рисунок 6. Автоматический торцовочный станок

Figure 6. Automatic crosscut saw

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Далее готовые детали автоматически перемещаются на линию продольного сращивания. Для предотвращения избыточного количества соединений «мини шип», минимальная длина пиломатериалов для склеивания по длине заготовок элементов

должна быть не менее 600 мм для классов функционального назначения 1а, 1б и 2а и не менее 300 мм для классов 2б и 3. На линии сращивания торцы заготовок автоматически профилируются под шиповое соединение, на торцевой профиль наносятся клей и отвердитель, и заготовки поступают в продольный пресс, где сращиваются в бесконечную заготовку. Длина ламелей может достигать 24, 36 или 50 метров, в зависимости от максимальной длины изготавливаемых КДК.



Рисунок 7. Шиповое соединение ламелей

Figure 7. Stud connection of lamellas

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Заготовки ламелей после сращивания укладываются в штабели на поперечном автоматическом транспортере и выдерживаются не менее 4-5 часов для достижения необходимой прочности торцевым шиповым соединением. После сращенные ламели поштучно поступают чистовую скоростную калибровку на четырехстороннем строгальном станке со скоростью острожки 100-120 м/мин. Такая высокая скорость острожки обусловлена установленным на линии после калибровки ламелей клеенаносящего станка для автоматического нанесения клея на пластъ доски.



Рисунок 8. Участок автоматизированного нанесения клея и отвердителя

Figure 8. Automated adhesive and hardener application area

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Особенности запрессовки ламелей и формирования пакета КДК из первосортной и термически поврежденной древесины

После нанесения клея заготовки поштучно поступают на гидравлический пресс и формируются в пакет необходимой высоты. Набор древесины в пакет осуществляется следующим образом: верхние и нижние слои будущей балочной конструкции формируются из ламелей, изготовленных из древесины I сорта, средние – из термически поврежденной древесины. Это объясняется тем, что максимальные растягивающие и сжимающие усилия возникают в крайних слоях поперечного сечения. Поскольку древесина, поврежденная термическим воздействием, имеет сниженные прочностные характеристики, использование ее в крайних ламелях приведет к снижению несущей способности балки, поэтому наиболее эффективно ее использование в средней части балочной конструкции, где не возникает максимальных нормальных напряжений [25, 27].



Рисунок 9. Формирование пакета ламелей перед запрессовкой

Figure 9. Formation of a stack of lamellas before pressing

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Запрессовка пакета ламелей в прессе осуществляется под давлением 170 бар в течение 45-50 минут при определенном температурно-влажностном режиме в цеху: температура воздуха должна составлять 18-20 °С, влажность воздуха – 60%. После склейки «биндера» (заготовки для клееного бруса) идет следующий этап производства – чистовая обработка бруса. Строгание клееного бруса выполняется на двустороннем станке LEDINEK SUPERLES при скорости строжки 15 м/мин.



Рисунок 10. Запрессовка пакета ламелей гидравлическими домкратами

Figure 10. Pressing the lamella package with hydraulic jacks

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

В случае производства конструкционных КДК криволинейной формы их склеивание производится в силовых полях. Вертикальные опоры силового поля, к которым производится прижим ламелей, заранее выставляются по необходимой геометрии производимой балки. Выставление геометрии производится либо по шаблону, либо по компьютерной модели балки. После укладки пакета ламелей производят его равномерное затягивание струбцинами при помощи специального гидравлического домкрата, тем самым прижимая заготовку к направляющим для придания ей необходимой формы. Затяжка пакета ламелей для формирования одной балки занимает 10-15 минут. После затяжки на первый слой укладывается следующий ряд струбцин и формируется следующий пакет ламелей. Общее количество балок, одновременно прессуемых в одном силовом поле, не должно превышать 6 штук. После застывания клеевого шва силовое поле освобождается от КДК при помощи кран-балки или тельфера, балки поступают на чистовую калибровку и снятие наплывов клея на широкоформатном рейсмусе на специальной поворотной платформе для калибровки криволинейной балки.

После чистовой обработки и ремонта вскрытых при чистовой калибровке дефектов балки отправляются на склад готовой продукции для отправки заказчику.



Рисунок 11. Серия клееных балок, выполненных по приведенной технологии

Figure 11. A series of glued beams made according to the above technology

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

*Несущая способность крупномасштабных моделей балочных конструкций, включающих элементы термически поврежденной древесины сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.)*

Для определения фактической несущей способности балочных конструкций, изготовленных с применением термически поврежденной древесины *P. sylvestris*, а также для подтверждения предлагаемой технологии, авторами статьи были изготовлены три серии однопролетных балок сечением 70x250(h) мм пролетом 3.0 м с различным процентным соотношением термически поврежденной древесины в середине сечения: 38.4%, 64.0% и эталонные балки, изготовленные целиком из древесины I сорта (рис. 12). Такие процентные соотношения термически поврежденной древесины к общей массе древесины в сечении определены как наиболее оптимальные по результатам ранее выполненных численных исследований в ПК «ЛИРА 10.12». В каждой серии было по 3 балки, выполненные со следующими соотношениями термически поврежденной древесины в сечении:

– БК-1 с 62% замещением ламелей в сечении на термически поврежденную древесину. Результаты численных исследований показывают, что применение термически поврежденной древесины позволяет снизить применение древесины I-го сорта сосны обыкновенной (*P. sylvestris* L.) более чем в 1.6 раза, при этом снижение несущей способности балки составит всего 13.36%;

– БК-2 с 36% замещением ламелей на термически поврежденную древесину *P. sylvestris*. Было установлено наименьшее снижение несущей способности по сравнению с эталонной на 2.49 %;

– БК-3, выполненная целиком из древесины сосны (*P. sylvestris*) 1-го сорта.

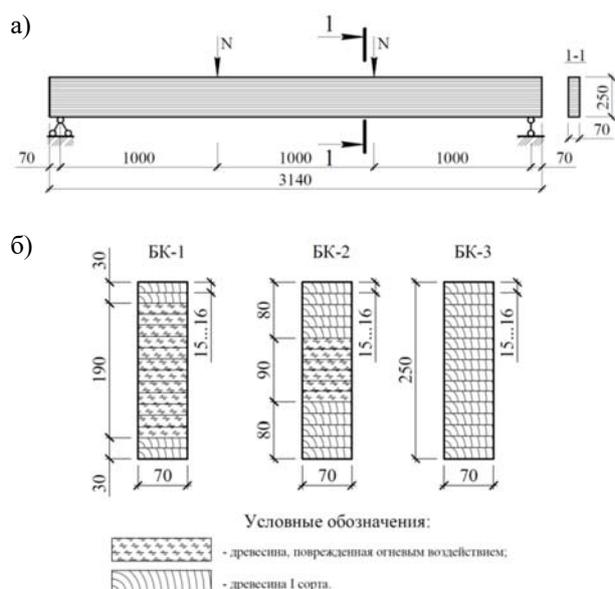


Рисунок 12. Модель исследуемой деревоклееной конструкции:

а) расчетная схема; б) сечения деревоклееной балки со следующими соотношениями термически поврежденной древесины к общей массе: БК-1 – 62%; БК-2 – 36%; БК-3 – «эталонная» балка из древесины I сорта.

Figure 12. Model of the studied laminated wood structure:

а) design diagram; б) cross-sections of a laminated wood beam with the following ratios of thermally damaged wood to the total mass: GB-1 – 62%; GB-2 – 36%; GB-3 – “standard” beam made of grade I wood.

Источник: собственная композиция авторов
Source: author’s composition

Согласно рекомендациям по испытанию деревянных конструкций балки покрытий и перекрытой должны испытываться в условиях шарнирного опирания в опорных точках [17, 23, 27]. Испытание крупномасштабных моделей балочных конструкций выполнено на экспериментальном испытательном стенде, схема которого представлена на рис. 13.

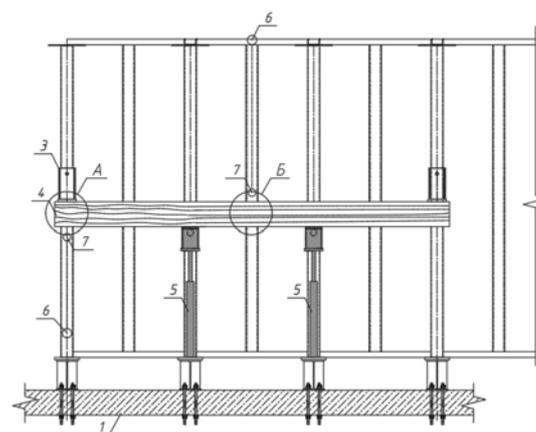


Рисунок 13. Схема испытательного стенда и оборудования: 1 – силовой пол; 2 – рама стенда; 3 – опора балки; 4 – балка; 5 – гидравлический домкрат, соединенный с динамометром; 6 – прогибомер; 6-ПАО; 7 – индикаторы часового типа.

Figure 13. Diagram of the test bench and equipment: 1 – force floor; 2 – stand frame; 3 – beam support; 4 – beam; 5 – hydraulic jack connected to a dynamometer; 6 – deflection meter; 6-PAO; 7 – dial indicators.

Источник: собственная композиция авторов
Source: author’s composition

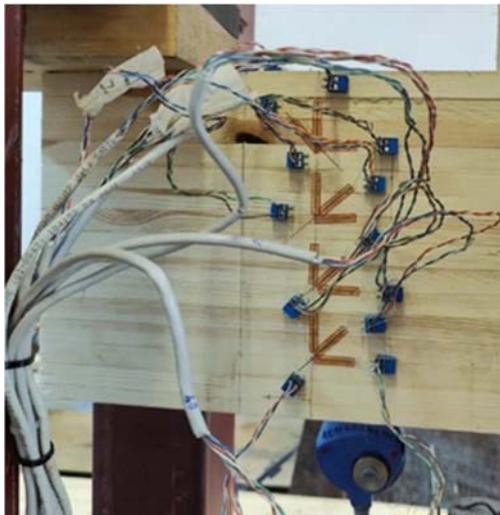
Экспериментальная установка представляет собой каркас из двутавровых балок, к которому прикреплены стальные направляющие в виде труб сечением 120x120 мм. По данным направляющим перемещается траверса с подвижным роликом. За счет подвижного ролика обеспечивается переход нагрузки от домкрата к балке через шарнир. Боковые опоры воспринимают нагрузки от испытываемой балки и представляют собой направляющие из прямоугольных труб с подвижной траверсой, которая фиксируется на необходимой высоте. Источником силовых воздействий являются гидравлические домкраты, объединенные шлангами высокого давления с устройством создания давления – ручным гидравлическим насосом с контрольным манометром [20].

Нагружение балки производили поэтапно с шагом 2,0 кН. Время выдержки после каждого этапа принимали равным 5-10 мин с целью стабилизации деформаций на каждом этапе нагружения.

Для экспериментальных исследований выбран тензометрический метод с использованием измерительного комплекса TDS-530 и тензорезисторов с основанием 20 мм. Тензорезисторы расположены в зоне действия максимального изгибаю-

щего момента по ширине сечения (рис. 14). Вертикальные перемещения и углы поворота устанавливались измерителями отклонения ПАО-6.

а)



б)



Рисунок 14. Размещение тензорезисторов: а) на опоре балки; б) в пролете

Figure 14. Placement of strain gauges: a) on the beam support; b) in the span of the beam

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Фотофиксация испытаний балочных конструкций представлена на рис. 14 и 15. По результатам экспериментальных исследований построены диаграммы зависимости максимальных нормальных напряжений и прогибов от действующей нагрузки (рис. 16 и 17). Разрушение всех балок происходило с разрывом волокон в зоне растягивающих усилий. Этому предшествовало образование пластических шарниров на сжатых волокнах.



Рисунок 15. Разрушение балки БК-1 в зоне растяжения

Figure 15. Failure of beam GB-1 in the tension zone

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

Фактическая несущая способность балок БК-1, БК-2 и БК-3 составила 42.53, 45.73 и 50.67 кН/м соответственно. Снижение несущей способности относительно «эталонной» балки БК-3 составила: у БК-1 – 16.06%, БК-2 – 9.7%.

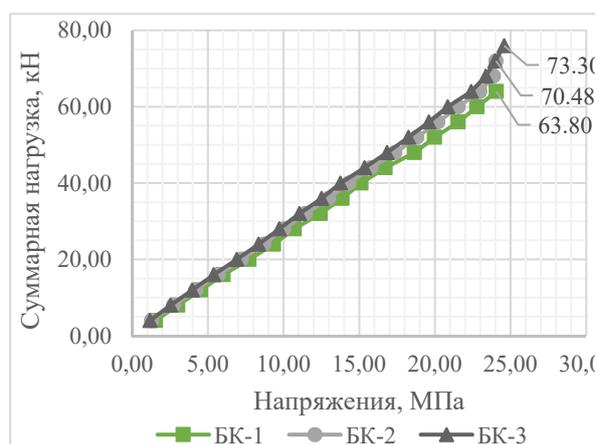


Рисунок 16. Диаграммы зависимости максимальных нормальных напряжений исследуемых балок от действующей нагрузки по результатам экспериментальных данных

Figure 16. Diagrams of the dependence of the maximum normal stresses of the studied beams on the effective load according to the results of experimental data

Источник: собственная композиция авторов

Source: author's composition

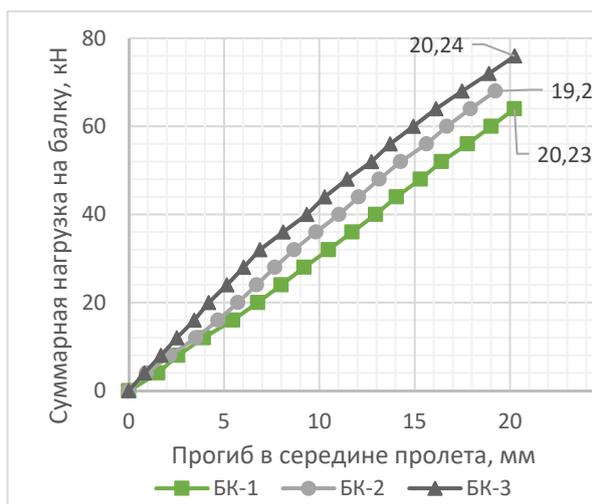


Рис. 17. Диаграммы зависимости прогибов исследуемых балок от действующей нагрузки

Fig. 17. Diagrams of the dependence of the deflections of the studied beams on the effective load based

Источник: собственная композиция авторов
Source: author's composition

Заключение

Приведенная выше технология в значительной степени раскрывает технологические особенности изготовления клееных деревянных балочных конструкций с применением термически поврежденной древесины. Она не требует значительного изменения технологического процесса, для производства используются те же станки, оборудование, клеевой состав, что и для изготовления КДК по классической технологии, следовательно, применение данной технологии не приведет к удорожанию производства.

Список литературы

1. Martinov, V., Lisyatnikov, M., Roshchina, S., Lukina, A. (2024). Physical and Mechanical Properties of Coniferous Wood After Exposure to Fire. In: Vatin, N., Roshchina, S., Serdjuks, D. (eds) Proceedings of MPCPE 2022. MPCPE 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 335. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30570-2_18.
2. Mechanical and microstructural changes in post-fire raw wood / A. Lukina, M. Lisyatnikov, V. Martinov [et al.] // Architecture and Engineering. – 2022. – Vol. 7, No. 3. – P. 44-52. – DOI 10.23968/2500-0055-2022-7-3-44-52. – EDN OHGQVJ. Режим доступа: <https://elibrary.ru/ohgqvj>.
3. Прочностные свойства сырой древесины после лесного пожара / А. Лукина, М. Лисятников, М. Лукин [и др.] // Гражданский журнал. – 2023. – № 3(119). – С. 11907. – DOI 10.34910/MCE.119.7. Режим доступа: <https://elibrary.ru/ЛУННХК>.
4. Прочность и деформативность сырьевой древесины после огневого воздействия / А. В. Лукина, М. С. Лисятников, В. А. Мартынов, С. И. Рощина // Строительство и реконструкция. – 2022. – № 6(104). – С. 40-49. – DOI 10.33979/2073-7416-2022-104-6-40-49. Режим доступа: <https://elibrary.ru/FUHDDN>.

Численность состава рабочих, задействованных на производстве, также остается неизменной. Из вышеперечисленного следует, что применение термически поврежденной древесины при изготовлении клееных деревянных конструкций позволит значительно сократить использование высокосортного пиломатериала при некоторых изменениях технологического процесса, не приводящих к его удорожанию.

Для подтверждения предлагаемой технологии, а также для проведения эксперимента на крупномасштабных моделях, авторами статьи были изготовлены три серии однопролетных балок сечением 70x250(h) мм пролетом 3.0 м с различным процентным соотношением термически поврежденной древесины в середине сечения: 62%, 36% и эталонные балки, изготовленные целиком из древесины I сорта (рис. 11, 12). Такие процентные соотношения термически поврежденной древесины к общей массе древесины в сечении определены как наиболее оптимальные по результатам ранее выполненных численных исследований. Фактическая несущая способность балок БК-1...БК-3 составила 42.53, 45.73 и 50.67 кН/м соответственно. Снижение несущей способности относительно «эталонной» балки БК-5 составила: у БК-1 – 16.06%, БК-2 – 9.7%.

5. Арефьев, С. П. Западносибирская широтно-зональная ксиломикологическая шкала и ее использование для индикации лесорастительных условий / С. П. Арефьев // Сибирский экологический журнал. – 2018. – Т. 25, № 5. – С. 616-633. – DOI 10.15372/SEJ20180509. Режим доступа: <https://elibrary.ru/ycnejf>.
6. Губенко, Л. А. Возможность применения низкосортной древесины в клееных деревянных конструкциях / Л. А. Губенко, М. Г. Хандов // Строительная наука - XXI век : теория, образование, практика, инновации Северо-Арктическому региону : Сборник трудов VII международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения ученых СПбГАСУ (ЛИСИ) В. А. Лебедева, В. А. Трулля, Е. И. Светозаровой, Архангельск, 28–30 июня 2016 года. – Архангельск: ООО "Агентство рекламы РАД", 2016. – С. 64-68. Режим доступа: <https://elibrary.ru/XDQTWV>.
7. Курьянова Т. К., Платонов А. Д., Макаров А. В. Прочность древесины сосны после воздействия пожара (2010 года УОЛ ВГЛТА, Воронеж). Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса. Материалы международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию кафедры механической технологии древесины ФГБОУ ВПО КГТУ. Администрация Костромской области, Департамент образования и науки, Международная академия наук о древесине (ИАВС), Региональный координационный совет по современным проблемам лесоведения, ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет леса», ФГБОУ ВПО «Костромской государственный технологический университет». 2012. С. 20-22. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22281919>.
8. Макаров, А. В. Технические качества древесины, поврежденной различными видами пожара / А. В. Макаров // Лесотехнический журнал. – 2011. – № 4(4). – С. 14-18. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17295210>.
9. Макаров А. В. Оценка технического качества древесины сосны, поврежденной пожаром : автореферат дис. ... канд. технических наук : 05.21.05 / Макаров Андрей Васильевич; [Место защиты: Воронеж. гос. лесотехн. акад.]. Воронеж, 2013. 16 с. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17261786>.
10. Влияние вида пожара на структуру и качество древесины сосны / Т. К. Курьянова, А. Д. Платонов, Н. Е. Косиченко [и др.] // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2011. – № 74. – С. 291-304. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17261786>.
11. Suzuki, Ji., Mizukami, T., Naruse, T. et al. Fire Resistance of Timber Panel Structures Under Standard Fire Exposure. *Fire Technol* 52, 1015–1034 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10694-016-0578-2>.
12. Roshchina, S., Lukin, M., Lisyatnikov, M. (2020). Compressed-Bent Reinforced Wooden Elements with Long-Term Load. In: Anatolijs, B., Nikolai, V., Vitalii, S. (eds) *Proceedings of ECE 2019. ECE 2019. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 70. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42351-3_7.
13. Sergeev, Michail & Lukin, M & Strekalkin, A & Roshchina, Svetlana. (2021). Mathematical modeling of stress-strain state of the nodal joint of wooden beams. *Journal of Physics: Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032088>.
14. Lisyatnikov, M., Lukina, A., Chibrikin, D., Labudin, B. (2022). The Strength of Wood-Reinforced Polymer Composites in Tension at an Angle to the Fibers. In: Vatin, N., Roshchina, S., Serdjuks, D. (eds) *Proceedings of MPCPE 2021. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 182. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_46.
15. Griбанov, A. S. Experimental investigations of composite wooden beams with local wood modification / A. S. Griбанov, V. I. Rimshin, S. I. Roshchina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety, Chelyabinsk, 25–27 сентября 2019 года. Vol. 687, 3. – Chelyabinsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 033039. – DOI 10.1088/1757-899X/687/3/033039. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43233459>.
16. Федотов, И. О. Параметры обугливания древесины с огнезащитой для расчетной методики оценки пределов огнестойкости деревянных конструкций / И. О. Федотов, П. В. Халепа, А. Б. Сивенков // Актуальные проблемы и инновации в обеспечении безопасности : Сборник материалов Дней науки с международным участием, Екатеринбург, 06–10 декабря 2021 года / Уральский институт ГПС МЧС России. Том Часть 1. – Екатеринбург:

Уральский институт Государственной противопожарной службы МЧС России, 2022. – С. 262-266. Режим доступа: <https://elibrary.ru/IQGDAG>.

17. Прочность древесины, модифицированной полимерной композицией с наноструктурным наполнителем / М. С. Лисятников, М. В. Лукин, Д. А. Чибрикин, С. И. Рощина // Строительство и реконструкция. – 2022. – № 4(102). – С. 41-51. – DOI 10.33979/2073-7416-2022-102-4-41-51. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49435789>.

18. Найчук, А. Я. Теория и практика дальнейшего развития деревянных конструкций. Часть 1. Нагрузки, расчетные сопротивления и длительная прочность древесины / А. Я. Найчук, А. А. Погорельцев, Е. Н. Серов // Промышленное и гражданское строительство. 2018; 6: 38-44. Режим доступа: <https://elibrary.ru/XRHQGD>.

19. Разработка конструкций из цельной древесины для объектов инфраструктуры / К. П. Пятикрестовский, В. И. Травуш, А. А. Погорельцев, А. А. Клюкин // Международный журнал по расчету гражданских и строительных конструкций. 2018; 14 (1): 145-154. DOI: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-14-1-145-154>. Режим доступа: <https://elibrary.ru/EDN YUOFTN>.

20. Roshchina, S., Lukin, M., Lisyatnikov, M., & Koscheev, A. (2018). The phenomenon for the wood creep in the reinforced glued wooden structures. In MATEC Web of Conferences (Vol. 245). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824503020>.

21. Veselkin, D.; Kuyantseva, N.; Pustovalova, L.; Mumber, A. Trends in Forest Fire Occurrence in the Ilmensky Nature Reserve, Southern Urals, Russia, between 1948 and 2014. Forests 2022, 13, 528. <https://doi.org/10.3390/f13040528>.

22. Nemirovsky, Y.V. & Boltaev, Artem. (2017). Calculation and design of hybrid wooden beams. PNRPU Mechanics Bulletin. 129-152. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2017.3.08>.

23. Сопротивление клееной древесины растяжению под различными углами к направлению волокон / Б. В. Лабудин, В. С. Морозов, О. Н. Попов [и др.] // Строительная механика и расчет сооружений. – 2019. – № 3(284). – С. 12-17. Режим доступа: <https://elibrary.ru/MSBNLB>.

24. Berwart, Sebastián & Estrella, Xavier & Montaña, Jairo & Santa Maria, Hernan & Almazán, José & Guindos, Pablo. (2022). A simplified approach to assess the technical prefeasibility of multistory wood-frame buildings in high seismic zones. Engineering Structures. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114035>.

25. Патент № 2587215 С1 Российская Федерация, МПК E04B 1/10, E04B 2/70. Деревянный клееный строительный элемент, способ возведения стеновых конструкций из деревянных клееных строительных элементов : № 2015103127/03 : заявл. 30.01.2015 : опубл. 20.06.2016 / К. В. Иванов. Режим доступа: <https://elibrary.ru/WAWQZZ>.

26. Никитина, А. В. Древесина и клеи, применяемые при изготовлении клееных деревянных конструкций / А. В. Никитина, В. В. Исакова, А. А. Ашихмина // Интеграция наук. – 2018. – № 8(23). – С. 431-433. Режим доступа: <https://elibrary.ru/YWVWOT>.

27. Stress–Strain State of a Wood-Glued Three-Span Beam with Layer-By-Layer Modification / M. Sergeev, A. Lukina, D. Reva, N. Zdravovic // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 182. – P. 485-491. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_43.

28. Zhang, Ying & Sun, Jinhua & Huang, Xinjie & Chen, X.F.. (2013). Heat transfer mechanisms in horizontal flame spread over wood and extruded polystyrene surfaces. International Journal of Heat and Mass Transfer. 61. 28-34. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.069>.

29. Bu, Rongwei & Zhou, Yang & Shi, Long & Fan, Chuangang. (2021). Experimental study on combustion and flame spread characteristics in horizontal arrays of discrete fuels. Combustion and Flame. 225. 136-146. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.10.049>.

30. Погорельцев, А. А. Дальнейшее развитие и совершенствование норм проектирования конструкций из древесины / А. А. Погорельцев, К. П. Пятикрестовский // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – № 3. – С. 35-41. – DOI 10.33622/0869-7019.2019.03.35-41. Режим доступа: <https://elibrary.ru/ZAHMEX>.

31. Волынский, В. Н. Взаимосвязь и изменчивость физико-механических свойств древесины / В. Н. Волынский. – 2-е, Исправленное. – Санкт-Петербург : Издательство Лань, 2012. – 224 с. – ISBN 978-5-8114-1308-9. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25483768>.
32. Изменение плотности древесины сосны, поврежденной пожаром при длительном хранении в различных условиях / А. Д. Платонов, Т. К. Курьянова, С. Н. Снегирева, А. В. Макаров // Лесотехнический журнал. – 2014. – Т. 4, № 1(13). – С. 133-135. – DOI 10.12737/3356. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21427585>.
33. Куликов, В. В. Показатели основных физико-механических свойств древесины наиболее твердых древесных пород мира / В. В. Куликов // Наукосфера. – 2023. – № 3-1. – С. 135-142. – DOI 10.5281/zenodo.7714721. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50455065>.
34. Ковтун, И. Ю. Механизм изменения физико-механических свойств древесины при различных температурах и времени термообработки / И. Ю. Ковтун, А. З. Мальцева // Матрица научного познания. – 2021. – № 11-2. – С. 45-50. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47276526>.
35. Корчагов, С. А. Сравнительная характеристика физико-механических свойств древесины сосны в посадках по типам леса / С. А. Корчагов, С. Е. Грибов, Н. А. Клюквина // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. – 2007. – № 5. – С. 54-56. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=10133785>.
36. Распределение влаги по стволу сосны, поврежденной пожаром / Т. К. Курьянова, А. Д. Платонов, С. Н. Снегирева [и др.] // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. – 2014. – Т. 2, № 2-1(7-1). – С. 275-279. – DOI 10.12737/3017. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21307755>.
37. Polishchuk, E. Yu. Heating and charring of timber constructions with thin-layer fire protection / E. Yu. Polishchuk, A. B. Sivenkov, S. K. Kenzhehan // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – No. 5(81). – P. 3-14. – DOI 10.18720/MCE.81.1. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36314110>.
38. Roshchina, S. Compressed-Bent Reinforced Wooden Elements with Long-Term Load / S. Roshchina, M. Lukin, M. Lisvatnikov // Proceedings of ECE 2019 : Energy, Environmental and Construction Engineering, St. Petersburg, Russia, 19–20 ноября 2019 года. – Cham: Springer, 2020. – P. 81-91. – DOI 10.1007/978-3-030-42351-3_7. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43282722>.
39. Strength properties of raw wood after a wildfire / A. Lukina, M. Lisvatnikov, M. Lukin [et al.] // Magazine of Civil Engineering. – 2023. – No. 3(119). – P. 11907. – DOI 10.34910/MCE.119.7. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53806550>.
40. Никитин, А. Н. Влияние высокотемпературной обработки на физико-механические свойства древесины сосны / А. Н. Никитин, М. М. Баяндина, М. А. Баяндин // Молодые ученые в решении актуальных проблем науки : Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (с международным участием), Красноярск, 20–21 апреля 2023 года. – Красноярск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева", 2023. – С. 379-381. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54756207>.

References

1. Martinov, V., Lisvatnikov, M., Roshchina, S., Lukina, A. (2024). Physical and Mechanical Properties of Coniferous Wood After Exposure to Fire. In: Vatin, N., Roshchina, S., Serdjuks, D. (eds) Proceedings of MPCPE 2022. MPCPE 2022. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 335. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-30570-2_18.
2. Mechanical and microstructural changes in post-fire raw wood / A. Lukina, M. Lisvatnikov, V. Martinov [et al.] // Architecture and Engineering. – 2022. – Vol. 7, No. 3. – P. 44-52. – DOI 10.23968/2500-0055-2022-7-3-44-52. – EDN OHGQVJ. Access mode: <https://elibrary.ru/ohgqvj>.

3. Strength properties of raw wood after a forest fire / A. Lukina, M. Lisyatnikov, M. Lukin [etc.] // *Civil Journal*. – 2023. – No. 3(119). – P. 11907. – DOI 10.34910/MCE.119.7. Access mode: <https://elibrary.ru/JIUHQK>.
4. Strength and deformability of raw wood after fire exposure / A. V. Lukina, M. S. Lisyatnikov, V. A. Martynov, S. I. Roshchina // *Construction and reconstruction*. – 2022. – No. 6(104). – pp. 40-49. – DOI 10.33979/2073-7416-2022-104-6-40-49. Access mode: <https://elibrary.ru/FUHDDN>.
5. Arefiev, S.P. West Siberian latitudinal-zonal xylomycological scale and its use for indicating forest conditions / S.P. Arefiev // *Siberian Ecological Journal*. – 2018. – Т. 25, No. 5. – P. 616-633. – DOI 10.15372/SEJ20180509. Access mode: <https://elibrary.ru/ycnejf>.
6. Gubenko, L. A. Possibility of using low-grade wood in laminated wood structures / L. A. Gubenko, M. G. Khandov // *Construction science - XXI century: theory, education, practice, innovations for the North Arctic region: Collection of works VII international scientific and technical conference dedicated to the 100th anniversary of the birth of scientists SPbGASU (LISI) V. A. Lebedev, V. A. Trull, E. I. Svetozarova, Arkhangelsk, June 28–30, 2016*. – Arkhangelsk: RAD Advertising Agency LLC, 2016. – pp. 64-68. Access mode: <https://elibrary.ru/XDQTWV>.
7. Kuryanova T.K., Platonov A.D., Makarov A.V. Strength of pine wood after exposure to fire (2010 UOL VGLTA, Voronezh). Current problems and prospects for the development of the timber industry complex. Materials of the international scientific and technical conference dedicated to the 50th anniversary of the Department of Mechanical Wood Technology of the KSTU. Administration of the Kostroma Region, Department of Education and Science, International Academy of Wood Sciences (IAWS), Regional Coordination Council on Contemporary Problems of Wood Science, Moscow State Forest University, Kostroma State Technological University. 2012. pp. 20-22. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22281919>.
8. Makarov, A.V. Technical qualities of wood damaged by various types of fire / A.V. Makarov // *Forestry Journal*. – 2011. – No. 4(4). – pp. 14-18. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17295210>.
9. Makarov A.V. Assessment of the technical quality of pine wood damaged by fire: abstract of thesis. ...cand. technical sciences: 05.21.05 / Makarov Andrey Vasilievich; [Place of protection: Voronezh. state forestry engineering academician]. Voronezh, 2013. 16 p. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17261786>.
10. The influence of the type of fire on the structure and quality of pine wood / T.K. Kuryanova, A.D. Platonov, N.E. Kosichenko [et al.] // *Polythematic network electronic scientific journal of the Kuban State Agrarian University*. – 2011. – No. 74. – P. 291-304. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=17261786>.
11. Suzuki, Ji., Mizukami, T., Naruse, T. et al. Fire Resistance of Timber Panel Structures Under Standard Fire Exposure. *Fire Technol* 52, 1015–1034 (2016). <https://doi.org/10.1007/s10694-016-0578-2>.
12. Roshchina, S., Lukin, M., Lisyatnikov, M. (2020). Compressed-Bent Reinforced Wooden Elements with Long-Term Load. In: Anatolijs, B., Nikolai, V., Vitalii, S. (eds) *Proceedings of EECE 2019*. EECE 2019. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 70. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-42351-3_7.
13. Sergeev, Michail & Lukin, M & Strekalkin, A & Roshchina, Svetlana. (2021). Mathematical modeling of stress-strain state of the nodal joint of wooden beams. *Journal of Physics: Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2131/3/032088>.
14. Lisyatnikov, M., Lukina, A., Chibrikin, D., Labudin, B. (2022). The Strength of Wood-Reinforced Polymer Composites in Tension at an Angle to the Fibers. In: Vatin, N., Roshchina, S., Serdjuks, D. (eds) *Proceedings of MPCPE 2021*. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 182. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_46.
15. Gribanov, A. S. Experimental investigations of composite wooden beams with local wood modification / A. S. Gribanov, V. I. Rimshin, S. I. Roshchina // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety, Chelyabinsk, 25–27 сентября 2019 года*. Vol. 687, 3. – Chelyabinsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 033039. – DOI 10.1088/1757-899X/687/3/033039. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43233459>.
16. Fedotov, I. O. Parameters of charring wood with fire protection for a calculation method for assessing the fire resistance limits of wooden structures / I. O. Fedotov, P. V. Khalepa, A. B. Sivenkov // *Current problems and innovations*

in ensuring safety: Collection materials of Science Days with international participation, Ekaterinburg, December 06–10, 2021 / Ural Institute of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Volume Part 1. – Ekaterinburg: Ural Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2022. – P. 262-266. Access mode: <https://elibrary.ru/IQGDAG>.

17. Strength of wood modified with a polymer composition with a nanostructured filler / M. S. Lisyatnikov, M. V. Lukin, D. A. Chibrikin, S. I. Roshchina // Construction and reconstruction. – 2022. – No. 4(102). – P. 41-51. – DOI 10.33979/2073-7416-2022-102-4-41-51. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49435789>.

18. Naichuk, A. Ya. Theory and practice of further development of wooden structures. Part 1. Loads, calculated resistances and long-term strength of wood / A. Ya. Naychuk, A. A. Pogoreltsev, E. N. Serov // Industrial and civil construction. 2018; 6: 38-44. Access mode: <https://elibrary.ru/XRHQGD>.

19. Development of solid wood structures for infrastructure facilities / K. P. Pyatikrestovsky, V. I. Travush, A. A. Pogoreltsev, A. A. Klyukin // International Journal of Calculation of Civil and Construction Structures. 2018; 14 (1): 145-154. DOI: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-14-1-145-154>. Access mode: <https://elibrary.ru/EDN YUOFTN>.

20. Roshchina, S., Lukin, M., Lisyatnikov, M., & Koscheev, A. (2018). The phenomenon for the wood creep in the reinforced glued wooden structures. In MATEC Web of Conferences (Vol. 245). EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824503020>.

21. Veselkin, D.; Kuyantseva, N.; Pustovalova, L.; Mumber, A. Trends in Forest Fire Occurrence in the Ilmsky Nature Reserve, Southern Urals, Russia, between 1948 and 2014. Forests 2022, 13, 528. <https://doi.org/10.3390/f13040528>.

22. Nemirovsky, Y.V. & Boltaev, Artem. (2017). Calculation and design of hybrid wooden beams. PNRPU Mechanics Bulletin. 129-152. <https://doi.org/10.15593/perm.mech/2017.3.08>.

23. Resistance of laminated wood to tension at different angles to the direction of the fibers / B.V. Labudin, V.S. Morozov, O.N. Popov [etc.] // Structural mechanics and design of structures. – 2019. – No. 3(284). – pp. 12-17. Access mode: <https://elibrary.ru/MSBNLB>.

24. Berwart, Sebastián & Estrella, Xavier & Montaña, Jairo & Santa Maria, Hernan & Almazán, José & Guindos, Pablo. (2022). A simplified approach to assess the technical prefeasibility of multistory wood-frame buildings in high seismic zones. Engineering Structures. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114035>.

25. Patent No. 2587215 C1 Russian Federation, IPC E04B 1/10, E04B 2/70. Wooden glued building element, method of erecting wall structures from wooden glued building elements: No. 2015103127/03: application. 01/30/2015: publ. 06.20.2016 / K.V. Ivanov. Access mode: <https://elibrary.ru/WAWQZZ>.

26. Nikitina, A.V. Wood and adhesives used in the manufacture of laminated wood structures / A.V. Nikitina, V.V. Isakova, A.A. Ashikhmina // Integration of Sciences. – 2018. – No. 8(23). – pp. 431-433. Access mode: <https://elibrary.ru/YWVWOT>.

27. Stress–Strain State of a Wood-Glued Three-Span Beam with Layer-By-Layer Modification / M. Sergeev, A. Lukina, D. Reva, N. Zdralovic // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2022. – Vol. 182. – P. 485-491. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_43.

28. Zhang, Ying & Sun, Jinhua & Huang, Xinjie & Chen, X.F.. (2013). Heat transfer mechanisms in horizontal flame spread over wood and extruded polystyrene surfaces. International Journal of Heat and Mass Transfer. 61. 28-34. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.069>.

29. Bu, Rongwei & Zhou, Yang & Shi, Long & Fan, Chuangang. (2021). Experimental study on combustion and flame spread characteristics in horizontal arrays of discrete fuels. Combustion and Flame. 225. 136-146. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.10.049>.

30. Pogoreltsev, A. A. Further development and improvement of design standards for wood structures / A. A. Pogoreltsev, K. P. Pyatikrestovsky // Industrial and civil construction. – 2019. – No. 3. – P. 35-41. – DOI 10.33622/0869-7019.2019.03.35-41. Access mode: <https://elibrary.ru/ZAHMEX>.

31. Volynsky, V. N. Interrelation and variability of physical and mechanical properties of wood / V. N. Volynsky. – 2nd, Corrected. – St. Petersburg: Lan Publishing House, 2012. – 224 p. – ISBN 978-5-8114-1308-9. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=25483768>.
32. Change in the density of pine wood damaged by fire during long-term storage in various conditions / A. D. Platonov, T. K. Kuryanova, S. N. Snegireva, A. V. Makarov // *Forestry Journal*. – 2014. – Т. 4, No. 1(13). – pp. 133-135. – DOI 10.12737/3356. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21427585>.
33. Kulikov, V.V. Indicators of the basic physical and mechanical properties of wood of the hardest tree species in the world / V.V. Kulikov // *Scienceosphere*. – 2023. – No. 3-1. – pp. 135-142. – DOI 10.5281/zenodo.7714721. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50455065>.
34. Kovtun, I. Yu. mechanism of changes in the physical and mechanical properties of wood at different temperatures and heat treatment times / I. Yu. Kovtun, A. Z. Maltseva // *Matrix of scientific knowledge*. – 2021. – No. 11-2. – P. 45-50. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47276526>.
35. Korchagov, S. A. Comparative characteristics of the physical and mechanical properties of pine wood in plantings by forest type / S. A. Korchagov, S. E. Gribov, N. A. Klyukvina // *Bulletin of the Moscow State Forest University - Forest Bulletin*. – 2007. – No. 5. – P. 54-56. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=10133785>.
36. Distribution of moisture along the trunk of a pine tree damaged by fire / T.K. Kuryanova, A.D. Platonov, S.N. Snegireva [etc.] // *Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*. – 2014. – Т. 2, No. 2-1(7-1). – pp. 275-279. – DOI 10.12737/3017. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21307755>.
37. Polishchuk, E. Yu. Heating and charring of timber constructions with thin-layer fire protection / E. Yu. Polishchuk, A. B. Sivenkov, S. K. Kenzhehan // *Magazine of Civil Engineering*. – 2018. – No. 5(81). – P. 3-14. – DOI 10.18720/MCE.81.1. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36314110>.
38. Roshchina, S. Compressed-Bent Reinforced Wooden Elements with Long-Term Load / S. Roshchina, M. Lukin, M. Lisyatnikov // *Proceedings of ECECE 2019: Energy, Environmental and Construction Engineering*, St. Petersburg, Russia, November 19–20, 2019. – Cham: Springer, 2020. – P. 81-91. – DOI 10.1007/978-3-030-42351-3_7. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43282722>.
39. Strength properties of raw wood after a wildfire / A. Lukina, M. Lisyatnikov, M. Lukin [et al.] // *Magazine of Civil Engineering*. – 2023. – No. 3(119). – P. 11907. – DOI 10.34910/MCE.119.7. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=53806550>.
40. Nikitin, A. N. The influence of high-temperature treatment on the physical and mechanical properties of pine wood / A. N. Nikitin, M. M. Bayandina, M. A. Bayandin // *Young scientists in solving current problems of science: Collection of materials of the All-Russian scientific -practical conference of students, graduate students and young scientists (with international participation), Krasnoyarsk, April 20–21, 2023*. – Krasnoyarsk: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Siberian State University of Science and Technology named after Academician M.F. Reshetnev”, 2023. – P. 379-381. Access mode: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54756207>.

Сведения об авторах

Мартынов Владислав Алексеевич – ассистент кафедры строительных конструкций, Институт архитектуры, строительства и энергетики, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых» (ВлГУ), ул. Горького, 87, г. Владимир, Российская Федерация, 600000, <http://orcid.org/0000-0002-6570-0265>, e-mail: martynov3369@gmail.com.

Лисятников Михаил Сергеевич – к.т.н., доцент, доцент кафедры строительных конструкций, Институт архитектуры, строительства и энергетики, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых» (ВлГУ), ул. Горького, 87, г. Владимир, Российская Федерация, 600000, <http://orcid.org/0000-0002-5262-6609>, e-mail: mlisyatnikov@mail.ru.

Лукина Анастасия Васильевна – к.т.н., доцент кафедры строительных конструкций, Институт архитектуры, строительства и энергетики, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г.

Столетовых» (ВлГУ), ул. Горького, 87, г. Владимир, Российская Федерация, 600000, <http://orcid.org/0000-0001-6065-678X>, e-mail: pismo.33@yandex.ru.

✉ Рощина Светлана Ивановна, д.т.н., проф., зав. кафедрой строительных конструкций, Институт архитектуры, строительства и энергетики, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых» (ВлГУ), ул. Горького, 87, г. Владимир, Российская Федерация, 600000, <http://orcid.org/0000-0003-0356-1383>, e-mail: rsi3@mail.ru.

Information about the authors

Vladislav A. Martinov – assistant of the Department of Civil Engineering, Institute of Architecture, Construction and Energy, Vladimir State University. A.G. and N.G. Stoletovs (VIGU), Gorky street, 87, Vladimir, Russian Federation, 600000, <http://orcid.org/0000-0002-6570-0265>, e-mail: martinov3369@gmail.com.

Mikhail S. Lisyatnikov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Civil Engineering, Institute of Architecture, Construction and Energy, Vladimir State University. A.G. and N.G. Stoletovs (VIGU), Gorky street, 87, Vladimir, 600000, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0002-5262-6609>, e-mail: mlisyatnikov@mail.ru.

Anastasia V. Lukina, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Civil Engineering, Institute of Architecture, Construction and Energy, Vladimir State University. A.G. and N.G. Stoletovs (VIGU), Gorky street, 87, Vladimir, 600000, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0001-6065-678X>, e-mail: pismo.33@yandex.ru.

Svetlana I. Roshchina, Doctor of Technical Sciences, Prof., Head. Department of Civil Engineering, Institute of Architecture, Construction and Energy, Vladimir State University. A.G. and N.G. Stoletovs (VIGU), Gorky street, 87, Vladimir, 600000, Russian Federation, <http://orcid.org/0000-0003-0356-1383>, e-mail: rsi3@mail.ru.

✉ – Для контактов | Corresponding author