

Научная статья

УДК 691.11

DOI: 10.37482/0536-1036-2024-1-168-181

## Применение термически поврежденной древесины в деревоклееных балочных конструкциях

**В.А. Мартынов, аспирант;** ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6570-0265>

**М.С. Лисятников, канд. техн. наук, доц.;** ResearcherID: [V-6057-2018](https://orcid.org/0000-0002-5262-6609),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5262-6609>

**А.В. Лукина, канд. техн. наук, доц.;** ResearcherID: [O-1352-2016](https://orcid.org/0000-0001-6065-678X),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6065-678X>

**С.И. Рощина<sup>✉</sup>, д-р техн. наук, проф.;** ResearcherID: [A-7722-2019](https://orcid.org/0000-0003-0356-1383),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0356-1383>

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, ул. Горького, д. 87, г. Владимир, Россия, 600000; martinov3369@gmail.com, mlisyatnikov@mail.ru, pismo.33@yandex.ru, rsi3@mail.ru<sup>✉</sup>

Поступила в редакцию 11.06.23 / Одобрена после рецензирования 10.09.23 / Принята к печати 15.09.23

**Аннотация.** Приведены результаты экспериментальных исследований деревоклееных балочных конструкций, выполненных с применением ламелей, изготовленных из деревьев сосны, частично поврежденных в лесонасаждениях. Цель – изучение напряженно-деформированного состояния деревоклееных балочных конструкций с применением древесины, нарушенной термическим воздействием лесного пожара. Ранее авторами выполнен значительный объем исследований физико-механических и прочностных свойств термически поврежденной древесины сосны, установлены зависимости прочностных характеристик древесины от степени огневого повреждения, мест отбора древесины по высоте ствола. Перед началом описанного в статье эксперимента на крупномасштабных моделях в программном комплексе «Лири 10.12» проведены численные исследования 4 серий однопролетных балок пролетом 6,0 м и сечением 140×500 мм, изготовленных в верхней и нижней частях сечения из древесины сосны 1-го сорта, а в средней части – из термически поврежденной древесины сосны. Выполнен сопоставительный анализ балок с различной долей замещения здоровой древесины сосны на ослабленную огнем воздействием пожара по высоте сечения: 76, 62, 51 и 36 %. В результате численного расчета исследуемых балок с применением выведенного коэффициента запаса (1,136) определена их фактическая несущая способность. Установлено, что снижение несущей способности балок БК-2 составляет 12,2 кН, это 16,05 % относительно эталонной балки БК-5, выполненной полностью из древесины сосны 1-го сорта; балок БК-4 – 7,4 кН, 9,74 % относительно балки БК-5. Разница между расчетными и экспериментальными разрушающими нагрузками равняется 9,5...14,3 %. Введение коэффициента запаса 1,136 при численном расчете обеспечивает достаточную сходимость расчетных и экспериментальных данных – погрешность составляет 3 %. Несущая способность эталонной балки БК-5 – 12,38 кН/м, балок БК-1–БК-4 – 8,53...12,06 кН/м, относительное снижение несущей способности не превышало 31,1...32,5 %. Установлено, что балка БК-4 с 34 % термически поврежденной древесины сосны позволяет обеспечить несущую способность на 97,5 % относительно балок, полностью выполненных из древесины сосны 1-го сорта.

**Ключевые слова:** древесина сосны, термически поврежденная древесина сосны, моделирование, деревоклееная балочная конструкция, деревокомпозитная балка, прочность, ресурсосбережение, лесной пожар

**Благодарности:** Исследование выполнено при поддержке гранта РНФ № 22-29-01579, <https://rscf.ru/project/22-29-01579/>, в рамках гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (МК-2972.2021.4).

**Для цитирования:** Мартынов В.А., Лисятников М.С., Лукина А.В., Рощина С.И. Применение термически поврежденной древесины в деревоклееных балочных конструкциях // Изв. вузов. Лесн. журн. 2024. № 1. С. 168–181. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-168-181>

Original article

## The Use of Thermally Damaged Wood in Laminated Wood Beam Structures

*Vladislav A. Martynov, Postgraduate Student;*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6570-0265>

*Mikhail S. Lisyatnikov, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;*

ResearcherID: [V-6057-2018](https://orcid.org/0000-0002-5262-6609), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5262-6609>

*Anastasiya V. Lukina, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.;*

ResearcherID: [O-1352-2016](https://orcid.org/0000-0001-6065-678X), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6065-678X>

*Svetlana I. Roshchina*<sup>✉</sup>, *Doctor of Engineering, Prof.;* ResearcherID: [A-7722-2019](https://orcid.org/0000-0003-0356-1383),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0356-1383>

Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletovs, ul. Gor'kogo, 87, Vladimir, 600000, Russian Federation; [martynov3369@gmail.com](mailto:martynov3369@gmail.com), [mlisyatnikov@mail.ru](mailto:mlisyatnikov@mail.ru), [pismo.33@yandex.ru](mailto:pismo.33@yandex.ru), [rsi3@mail.ru](mailto:rsi3@mail.ru)<sup>✉</sup>

Received on June 11, 2023 / Approved after reviewing on September 10, 2023 / Accepted on September 15, 2023

**Abstract.** This paper deals with the experimental research results of laminated wood beam structures made using lamellas produced from the pine trees, partially damaged in forest plantations. The purpose of the research has been to study the stress-strain state of laminated wood beam structures utilizing the wood damaged by the thermal exposure caused by a forest fire. Previously, the authors have carried out a significant amount of research into the physical, mechanical and strength properties of thermally damaged pine wood. They have established the dependence of the strength properties of the wood on the degree of fire damage and the wood sampling points according to the height of the stem. Prior to the experiment on the large-scale models in the “Lira 10.12” software complex, numerical studies of four series of single beams with a span of 6.0 m and a section of 140×500 mm produced from the 1st grade pine wood in the upper and lower parts of the section and from thermally damaged pine wood in the middle part of the section. A comparative analysis of the beams has been performed with varying percentages of replacement of the healthy pine wood with the one weakened by the fire along the height of the section: 76, 62, 51 and 36 %. As a result of the numerical calculation of the beams under study using the derived safety factor equaling 1.136, their actual load-bearing capacity has been determined. It has been established that a decrease in the load-bearing capacity of the CB-2 beams equals 12.2 kN, which is 16.05 % relative to

the reference beam CB-5, made entirely of the 1st grade pine wood. For the CB-4 beams a decrease in the load-bearing capacity equals 7.4 kN, which is 9.74 % relative to the reference beam CB-5. The difference between the calculated and experimental breaking loads is 9.5 to 14.3 %. The introduction of the safety factor equaling 1.136 in the numerical calculation ensures sufficient convergence of the calculated and experimental data (the measurement error is 3 %). The load-bearing capacity of the reference beam CB-5, made entirely of the 1st grade pine wood, is 12.38 kN/m. For beams CB-1 to CB-4 it equals from 8.53 to 12.06 kN/m. The relative decrease in the load-bearing capacity did not exceed 31.1 to 32.5 %. It has been established that the CB-4 beam, made using 34 % of lamellas produced from thermally damaged pine wood, allows for the load-bearing capacity of 97.5 % relative to the beams made entirely of the 1st grade pine wood.

**Keywords:** pine wood, thermally damaged pine wood, modeling, laminated wood beam structure, wood composite beam, strength, resource saving, forest fire

**Acknowledgments:** This work was supported by the Russian Science Foundation grant no. 22-29-01579, <https://rscf.ru/project/22-29-01579/>, as part of the grant from the President of the Russian Federation for state support of young Russian scientists – candidates of science (МК-2972.2021.4).

**For citation:** Martynov V.A., Lisyatnikov M.S., Lukina A.V., Roshchina S.I. The Use of Thermally Damaged Wood in Laminated Wood Beam Structures. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2024, no. 1, pp. 168–181. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2024-1-168-181>

### Введение

В России расположены огромные территории лесов, простирающиеся от Западной Европы до тихоокеанского побережья, что составляет 1/4 всех мировых запасов древесины (1,019 млрд га по данным ФГБУ «Рослесинфорг»). Главной проблемой сохранения естественных лесных экосистем являются лесные пожары. Ежегодно в России регистрируется от 9 до 35 тыс. лесных пожаров, охватывающих площади от 500 тыс. до нескольких миллионов гектаров [12].

Лесные пожары далеко не всегда приводят к полному уничтожению древесных насаждений. Степень повреждения деревьев напрямую зависит от вида пожара: низовой пожар с высотой пламени до 0,5 м, только снизу опаливший стволы деревьев, незначительно влияет на состояние древостоев, и при этом есть большая вероятность их сохранения. Где прошел сильный низовой пожар с высотой пламени свыше 1,5 м и протяженностью подгара на стволах деревьев от 6–8 до 18 м и более, древостои подвергаются значительным повреждениям, а следовательно, изменяется качество древесины. Подвергшееся негативному воздействию пожара дерево теряет иммунитет, становясь более уязвимым к биоповреждениям. Увеличивающиеся продолжительность и интенсивность последних сезонов лесных пожаров ежегодно вызывают массовое поражение деревьев, способствуя последующей вспышке массового размножения различных видов подкорковых насекомых, заражающих впоследствии также и деревья, не затронутые пожаром [8, 13, 20].

Древесина является возобновляемым природным ресурсом, но тенденция сохранения природных ресурсов в настоящее время остается актуальной. Применение термически поврежденной древесины возможно в де-

ревоклееных конструкциях [2, 3, 6, 7, 10, 11, 15]. Предполагается, что это позволит значительно сократить использование высокосортного пиломатериала [10, 19, 21].

Ранее авторами выполнен значительный объем исследований физико-механических и прочностных свойств термически поврежденной древесины сосны, установлены зависимости прочностных характеристик древесины от степени огневого повреждения, мест отбора древесины по высоте ствола [4, 16, 17]. Установлено, что древесина сосны из комлевой части с огневым повреждением до 15 % поперечного сечения ствола сохраняет достаточно высокие физико-механические свойства, что дает возможность использовать ее как конструкционный материал, например в производстве ревоклееных конструкций. В ходе испытаний стандартных образцов из древесины сосны было обнаружено, что наибольшее снижение прочности по всем видам проведенных испытаний наблюдается в образцах, взятых из верхней части ствола дерева. Так, при статическом изгибе относительно «эталонной» (здоровой) древесины уменьшение предела прочности составляет более 20 %, при сжатии вдоль волокон – до 28,8 %, при растяжении – 30,6 %, при скалывании вдоль волокон – 22,7 %. Минимальное снижение предела прочности во всех видах испытаний наблюдалось у образцов, отобранных из комлевой части ствола: при статическом изгибе – 6,0 %, при сжатии вдоль волокон – 15,0 %, при растяжении вдоль волокон – 8,4 %, при скалывании вдоль волокон – 10,0 %.

Цель данной работы – изучение напряженно-деформированного состояния ревоклееных балочных конструкций с применением древесины, поврежденной термическим воздействием лесного пожара. Исследование направлено на определение и научное обоснование несущей способности таких конструкций.

#### *Объекты и методы исследования*

В качестве объекта исследования приняты однопролетные балки пролетом 6,0 м и сечением 140×500 мм, изготовленные в верхней и нижней частях сечения из древесины сосны 1-го сорта, а в средней части – из термически поврежденной комлевой древесины сосны. Выбранная длина пролета обусловлена требованием нормативных документов. Согласно ГОСТ 20850, балки пролетом до 7,5 м относятся к классам функционального назначения 2а и 2б [5], что позволяет использовать при их изготовлении древесину 3-го сорта, к которому, как показали испытания стандартных образцов на сжатие, растяжение, скалывание и статический изгиб, можно отнести древесину сосны, поврежденную огнем.

В эксперименте принимали участие балочные конструкции со следующими долями замещения древесины 1-го сорта на термически поврежденную древесину для балок: БК-1 – 76 %, БК-2 – 62 %, БК-3 – 51 %, БК-4 – 36 %. Такие процентные соотношения приняты исходя из толщины ламелей (30...32 мм) и пропорционального замещения древесины в растянутой и сжатой зонах балочной конструкции. Эти сечения и обозначения для серии балочных конструкций показаны на рис. 1.

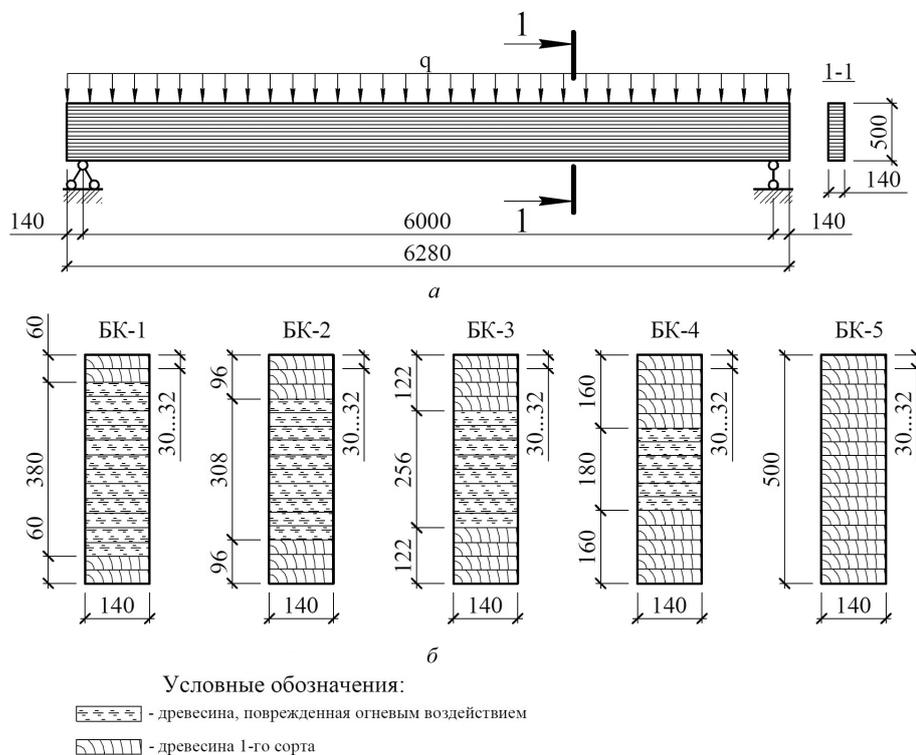


Рис. 1. Модель исследуемой деревоклееной конструкции: *a* – расчетная схема; *б* – сечения деревоклееной балки: БК-1–БК-4; БК-5 – «эталонная» балка из древесины 1-го сорта (*q* – равномерно распределенная нагрузка)

Fig. 1. Model of the laminated wood structure under study: *a* – design diagram; *б* – the sections of the laminated wood beams: CB-1 to CB-4; CB-5 – the reference beam made of the 1st grade pine wood (*q* – uniformly distributed load)

Для определения рациональных отношений массы термически поврежденной древесины сосны к общей массе поперечного сечения деревоклееной балки выполнены численные исследования в программном комплексе (ПК) «Лири 10.12». На 1-м этапе была сформирована линейная задача. Древесина в случае линейного расчета задана как универсальный пространственный 8-узловой изопараметрический конечный элемент. В параметрах данного элемента заданы плотность древесины ( $500 \text{ кг/м}^3$ ) и следующие жесткостные характеристики [3, 9, 14, 18]: модуль упругости для древесины сосны 1-го сорта – 400, 10 000 и снова 400 МПа; для древесины сосны, поврежденной огнем воздействием, – 320, 6400 и 320 МПа; коэффициент Пуассона для обоих видов древесины – 0,50 и 0,02; модуль сдвига, также для обоих видов древесины, – 500 МПа.

Нагружение балок в численном расчете осуществлялось равномерно распределенной нагрузкой с шагом 2,0 кН/м. Расчетные схемы исследуемых балок, деформированные схемы и характер распределения нормальных напряжений отражены на рис. 2. Результаты линейного расчета представлены значениями нормальных напряжений в табл. 1.

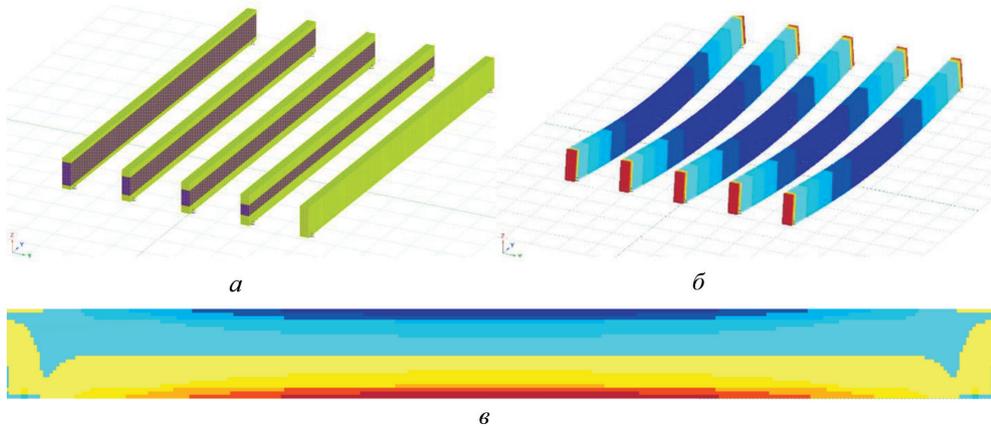


Рис. 2. Численные исследования балок БК-1–БК-5: *a* – расчетные схемы; *б* – деформированные схемы; *в* – характер распределения нормальных напряжений

Fig. 2. Numerical studies of the beams CB-1 to CB-5: *a* – design diagrams; *б* – deformed diagrams; *в* – the nature of the normal stress distribution

Таблица 1

**Значения нормальных напряжений (МПа) для деревоклееных балок**

**Normal stress values (MPa) for laminated wood beams**

Нагрузка, кН/м	БК-1	БК-2	БК-3	БК-4	БК-5
22	<u>20,70</u> 8,71	<u>19,24</u> 5,75	<u>18,89</u> 4,63	<u>18,45</u> 2,81	<u>18,27</u> –
24	<u>22,58</u> 9,50	<u>20,99</u> 6,27	<u>20,57</u> 5,05	<u>20,12</u> 3,06	<u>19,93</u> –
26	<u>24,47</u> 10,29	<u>22,74</u> 6,79	<u>22,28</u> 5,47	<u>21,80</u> 3,32	<u>21,60</u> –
28	–	<u>24,49</u> 7,32	<u>24,00</u> 5,89	<u>23,48</u> 3,57	<u>23,26</u> –
30	–	–	–	<u>25,15</u> 3,83	<u>24,92</u> –
Разрушающая нагрузка, кН/м	7,51	9,44	10,00	10,62	10,90
Относительное снижение несущей способности, %	31,12	13,36	8,20	2,49	–

Примечание: Здесь и в табл. 2 в числителе приведены напряжения в древесине 1-го сорта, в знаменателе – 3-го.

Для сопоставления результатов численного расчета с фактической работой деревоклееных балочных конструкций выполнены экспериментальные исследования балок, изготовленных с применением термически поврежденной древесины сосны. Проведен численный расчет в нелинейной постановке

задачи с моделированием фактических физико-механических характеристик материалов, определенных по результатам ранее выполненных испытаний древесины сосны на стандартных образцах. Протестированы модели деревоклееных балок, выполненных в масштабе 1:2, с уменьшением всех геометрических параметров, в т. ч. толщины ламелей, в 2 раза. Для анализа сходимости результатов необходимо сравнение не менее 3 показателей разрушающей нагрузки, определенных численным расчетом и экспериментально. Было изготовлено 2 серии экспериментальных балок БК-2 и БК-4 пролетом 3,0 м и сечением 70×250 мм с частичным замещением ламелей на термически поврежденную древесину сосны и 1 серия эталонных балок БК-5. Результаты численных исследований балок БК-2 показывают, что применение термически поврежденной древесины позволяет уменьшить использование древесины 1-го сорта более чем в 1,6 раза, при этом снижение несущей способности балки составит всего 13,36 %. Для балок БК-4 установлено наименьшее снижение несущей способности по сравнению с эталонной – на 2,49 %. Балки БК-1, обладающие наименьшей несущей способностью, не были взяты для эксперимента, как и балки БК-3, целесообразность применения которых, исходя из расчетов, ниже по сравнению с БК-2 и БК-4.

Исследуемые деревоклееные балки изготовлены в производственных условиях на сертифицированном оборудовании. Толщина ламелей принята равной 15–16 мм исходя из требований СП 64.13330 и технологических особенностей производства. Склеивание ламелей осуществлялось с применением клеевой композиции раздельного нанесения клея с отвердителем ММФ 1255/7555 AkzoNobel Cascomin на основе меламина. Перед выполнением работ по производству экспериментальных балок клеевое соединение термически поврежденной древесины испытано на образцах в соответствии с ГОСТ 33121 в климатической камере КТХВ-1000. Образцы древесины последовательно подвергались замачиванию, замораживанию, оттаиванию и высушиванию [1]. Механические испытания на скалывание в клеевых соединениях образцов были проведены после 40 циклов температурно-влажностных воздействий. Установлено, что разрушение всех образцов произошло по древесине, т. е. имеет когезионный характер. Следовательно, можно сделать вывод о достаточной адгезии термически поврежденной древесины сосны, а также высоком качестве и прочности клеевого соединения.

Согласно рекомендациям [11], балки покрытий и перекрытий должны испытываться в условиях шарнирного опирания в опорных точках. Испытание крупномасштабных моделей балочных конструкций выполнено на экспериментальном испытательном стенде, схема которого представлена на рис. 3.

Экспериментальная установка представляет собой каркас из двутавровых балок, к которому прикреплены стальные направляющие в виде труб сечением 120×120 мм. По данным направляющим перемещается траверса с подвижным роликом. За счет него 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.

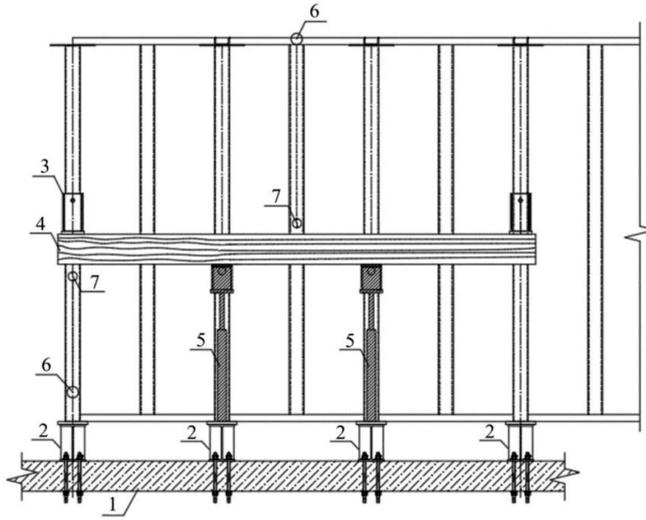


Рис. 3. Схема испытательного стенда и оборудования:  
 1 – силовой пол; 2 – рама стенда; 3 – опора балки; 4 – балка; 5 – гидравлический домкрат, соединенный с динамометром; 6 – прогибомер (6-ПАО); 7 – индикаторы часового типа

Fig. 3. Diagram of the test bench and equipment:  
 1 – force plate; 2 – stand structure; 3 – beam seat; 4 – beam; 5 – hydraulic jack connected to the dynamometer; 6 – deflectometer 6-PAO; 7 – dial indicators

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 изгибающего момента по ширине сечения. Вертикальные перемещения и углы поворота устанавливались измерителями отклонения 6-ПАО.

Перед испытанием выполнен численный расчет балок в нелинейной постановке задачи в ПК «Лира 10.12». Это позволило предварительно оценить распределение напряжений в деревоклееных балках и установить разрушающую нагрузку. В качестве физической модели древесины сосны принята трансформная модель. Формирование типов жесткости для древесины происходит с помощью физически нелинейных универсальных пространственных 8-узловых изопараметрических конечных элементов. По результатам ранее выполненной серии испытаний термически поврежденной древесины и древесины сосны 1-го сорта на стандартных образцах были построены усредненные графики зависимости «напряжение – деформация». Задание фактических значений коэффициента Пуассона, объемного веса, напряжений и соответствующих им деформаций позволяет провести численный расчет с учетом действительной работы древесины сосны.

Нагружение балок в численном эксперименте в нелинейной постановке задачи осуществлялось 2 сосредоточенными нагрузками с шагом 2,0 кН. Расчетная схема исследуемых балок представлена на рис. 4, характер распределения нормальных напряжений в балках – на рис. 5.

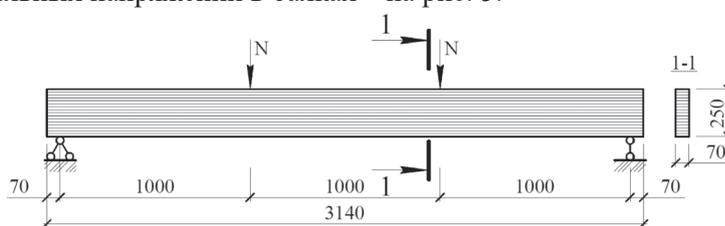


Рис. 4. Расчетная схема испытываемых балочных конструкций (N – напряжение)

Fig. 4. Design diagram of the tested beam structures (N – stress)



Рис. 5. Характер распределения нормальных напряжений балок БК-2, БК-4, БК-5, МПа

Fig. 5. The nature of the normal stress distribution for the CB-2, CB-4 and CB-5 beams, MPa

#### Результаты исследования и их обсуждение

Оценка несущей способности экспериментальных крупномасштабных моделей балок выполнялась по предельным состояниям I и II группы методом сравнения максимальных нормальных напряжений в слоях древесины сосны 1-го сорта и термически поврежденной древесины с их расчетными сопротивлениями изгибу, при превышении которых произойдет разрушение. Расчетное сопротивление древесины сосны 1-го сорта составляет 39 МПа, древесины сосны 3-го сорта, которому соответствует термически поврежденная древесина, – 30 МПа. Значения нормальных напряжений приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Значения нормальных напряжений (МПа) крупномасштабных моделей  
деревянных балок при нелинейном расчете**  
**Normal stress values (MPa) of the large-scale models of laminated wood beams  
in nonlinear calculations**

Сосредоточенная нагрузка, кН	БК-2	БК-4	БК-5
32	<u>23,81</u> 9,32	<u>22,78</u> 5,10	<u>22,04</u> –
34	<u>24,71</u> 9,86	<u>23,64</u> 5,42	<u>22,96</u> –
36	<u>25,64</u> 10,58	<u>24,50</u> 5,74	<u>23,79</u> –
38	<u>26,49</u> 11,33	<u>25,41</u> 6,06	<u>24,66</u> –
Суммарная разрушающая нагрузка, кН	66,12	70,48	73,30
Относительное снижение несущей способности, %	9,79	3,84	–

Рис. 6 иллюстрирует ход испытаний крупномасштабных моделей. По результатам данных работ построены диаграммы зависимости максимальных нормальных напряжений и прогибов от действующей нагрузки (рис. 7, см. с. 178). Результаты численного и экспериментальных исследований приведены в табл. 3.

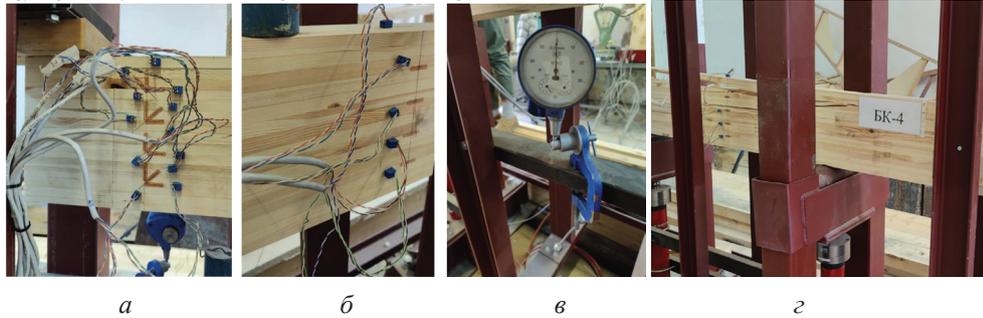


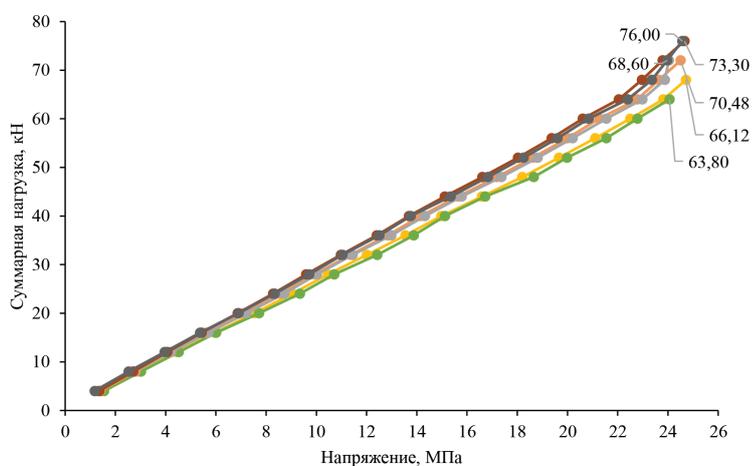
Рис. 6. Ход эксперимента: *а-в* – размещение измерительных приборов (*а, б* – тензорезисторы на опоре балки и в середине пролета соответственно; *в* – прогибомер); *з* – разрушение балки БК-4 в зоне растяжения

Fig. 6. The course of the experiment: *a-v* – placement of the measuring instruments (*a* – the strain gauges on the beam seat; *б* – the strain gauges in the middle of the span; *в* – deflectometer); *з* – the fracture of the CB-4 beam in the tension zone

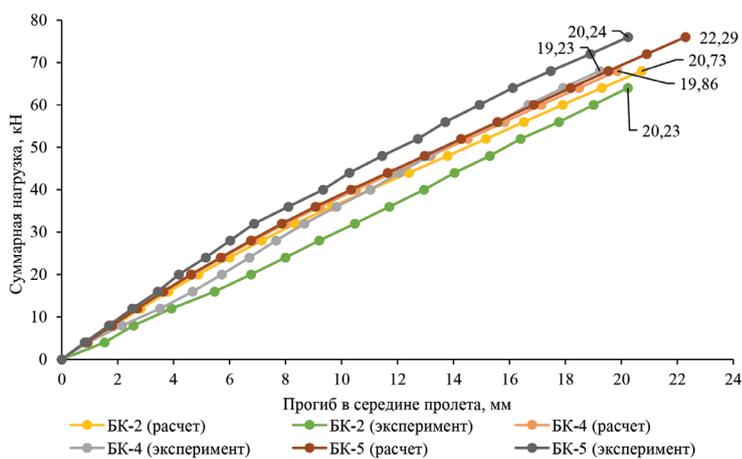
Таблица 3

**Сопоставительный анализ результатов численного расчета и экспериментальных исследований крупномасштабных моделей деревоклееных балок**  
**Comparative analysis of the results of the numerical calculations and the experimental research on the large-scale models of laminated wood beams**

Источник данных	Суммарная разрушающая нагрузка, кН	Нормальные напряжения в ламелях, МПа				Прогиб, мм
		из древесины 1-го сорта		из термически поврежденной древесины		
		при сжатии	при растяжении	при сжатии	при растяжении	
<i>Балка БК-2</i>						
Нелинейный расчет в ПК «Лира 10.12»	66,12	23,99	17,32	9,61	8,98	19,54
Эксперимент	63,80	24,00	17,14	9,49	8,72	19,01
<i>Балка БК-4</i>						
Нелинейный расчет в ПК «Лира 10.12»	70,48	24,00	17,38	6,53	5,13	20,56
Эксперимент	68,60	23,90	17,20	6,38	4,78	19,23
<i>Балка БК-5</i>						
Нелинейный расчет в ПК «Лира 10.12»	73,30	24,00	17,32	–	–	21,36
Эксперимент	76,00	24,57	17,57	–	–	20,24



а



б

Рис. 7. Диаграммы зависимости максимальных нормальных напряжений (а) и прогибов (б) исследуемых балок от действующей нагрузки по результатам расчетов в сравнении с экспериментальными данными

Fig. 7. Diagrams of the dependence of the maximum normal stresses (а) and deflections (б) of the beams under study on the actual load according to the results of the calculations compared to the experimental data

Разница между расчетными и экспериментальными разрушающими нагрузками составляет 2,67...3,55 %, что подтверждает корректность выбора математической модели и расчетных характеристик материала. Разница разрушающих нагрузок натуральных деревоклееных балочных конструкций и крупномасштабных моделей балок составляет 9,5...14,3 %. Для учета фактического напряженно-деформированного состояния натуральных деревоклееных балочных конструкций при численном линейном расчете введен коэффициент 1,136, позволяющий обеспечить сходимость расчетных и определенных экспериментально значений несущей способности конструкции с погрешностью до 3 %.

Введенный коэффициент запаса дает возможность определить фактическую несущую способность исследуемых деревоклееных балок БК-1–БК-5 пролетом 6,0 м. Для этого выполнен расчет исследуемых балок в ПК «Лира 10.12» в нелинейной постановке задачи с использованием фактических характеристик материалов, примененных авторами для моделирования работы крупномасштабных моделей, и полученного коэффициента. Расчетная схема исследуемых балочных конструкций приведена на рис. 1, 2. Фактическая несущая способность балок БК-1–БК-5 равнялась 8,53; 10,72; 11,36; 12,06 и 12,38 кН/м соответственно. Снижение несущей способности относительно «эталонной» балки БК-5 составило (%): у БК-1 – 31,12; БК-2 – 13,36; БК-3 – 8,20 и БК-4 – 2,49.

### Выводы

1. Научно обоснована и экспериментально доказана возможность реального применения в деревоклееных балочных конструкциях термически поврежденной древесины сосны. Это позволяет расширить реальную базу пиломатериалов для производства деревоклееных конструкций.

2. Установлено, что разница между расчетными и экспериментальными разрушающими нагрузками составляет 9,5...14,3 %. Введение коэффициента запаса 1,136 при численном расчете обеспечивает достаточную сходимость расчетных и экспериментальных данных: погрешность – 3 %.

3. На крупномасштабных моделях установлено снижение несущей способности балок: БК-2 – на 12,20 кН, что составляет 16,05 % относительно данных эталонной балки БК-5 из древесины сосны 1-го сорта; балок БК-4 – на 7,4 кН, это 9,74 % от показателя балки БК-5.

4. Определена фактическая несущая способность деревоклееных балочных конструкций, частично выполненных из ламелей термически поврежденной сосны. Несущая способность балки БК-5 составила 12,38 кН/м, балок БК-1–БК-4 – 8,53...12,06 кН/м, снижение несущей способности по сравнению с показателем эталонной балки при этом равняется 31,12...32,49 %.

5. Установлено, что балка БК-4, выполненная с 34 % применением ламелей из термически поврежденной древесины сосны, позволяет обеспечить несущую способность на 97,5 % относительно балок, полностью выполненных из древесины сосны 1-го сорта.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Баланцева Н.Б., Мелехов В.И., Калиничева О.А. Совершенствование метода расчета процесса конвективной сушки пиломатериалов // Изв. вузов. Лесн. журн. 2018. № 4. С. 132–139.

Balantseva N.B., Melekhov V.I., Kalinicheva O.A. Improvement of the Method for Calculating the Process of Convective Drying of Sawn Timber. *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2018, no. 4, pp. 132–139. (In Russ.). <https://doi.org/10.17238/issn0536-1036.2018.4.132>

2. Губенко Л.А., Хандов М.Г. Возможность применения низкосортной древесины в клееных деревянных конструкциях // Строительная наука – XXI век: теория, образование, практика, инновации Северо-Арктическому региону: сб. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения ученых СПбГАСУ (ЛИСИ) В.А. Лебедева, В.А. Трулля, Е.И. Светозаровой, Архангельск, 28–30 июня 2016 г. /

САФУ им. М.В. Ломоносова, СПбГАСУ, Ассоц. выпускников АГТУ, РААСН, М-во стр-ва Архангельской обл., Союз проф. строителей, Союз проектировщиков, Ассоц. инж. изыскания в стр-ве; отв. ред. Б.В. Лабудин. Архангельск: Агентство рекламы РАД, 2016. С. 64–68.

Gubenko L.A., Khandov M.G. The Possibility of Using Low-Grade Wood in Glued Wooden Structures. *Proc. of the VII Int. Sci-Tech Conf. dedicated to the 100th anniversary of the birth of SPbGASU (LISI) scientists V.A. Lebedev, V.A. Trull, E.I. Svetozarova "Construction Science – XXI century: Theory, Education, Practice, Innovations for the North Arctic Region"*, June 28–30, 2016. Arkhangelsk, RAD Advertising Agency LLC, 2016, pp. 64–68. (In Russ.)

3. Лабудин Б.В., Морозов В.С., Попов О.Н., Никитина Т.А., Орлов А.О. Сопrotивление клееной древесины растяжению под различными углами к направлению волокон // Строит. механика и расчет сооружений. 2019. № 3(284). С. 12–17.

Labudin B.V., Morozov V.S., Popov O.N., Nikitina T.A., Orlov A.O. The Resistance of Laminated Wood to Tension at Different Angles of the Orientation of the Fibers. *Stroitel'naya Mekhanika i Raschet Sooruzheniy = Structural Mechanics and Analysis of Constructions*, 2019, no. 3(284), pp. 12–17. (In Russ.)

4. Лукина А.В., Лисятников М.С., Мартынов В.А., Рощина С.И. Прочность и деформативность сырьевой древесины после огневого воздействия // Строительство и реконструкция. 2022. № 6(104). С. 40–49.

Lukina A.V., Lisyatnikov M.S., Martinov V.A., Roschina S.I. Strength and Deformability of Raw Wood after Fire Exposure. *Construction and Reconstruction*, 2022, no. 6(104), pp. 40–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2022-104-6-40-49>

5. Найчук А.Я., Погорельцев А.А., Серов Е.Н. Теория и практика дальнейшего развития деревянных конструкций. Ч. 1. Нагрузки, расчетные сопротивления и длительная прочность древесины // Промышл. и гражд. строительство. 2018. № 6. С. 38–44.

Naichuk A.Ya., Pogorel'tsev A.A., Serov Ye.N. Theory and Practice of Further Development of Wooden Structures. Part 1: Loads, Design Resistance and Long-Term Strength of Timber. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*, 2018, no. 6, pp. 38–44. (In Russ.)

6. Никитина А.В., Исакова В.В., Ашихмина А.А. Древесина и клеи, применяемые при изготовлении клееных деревянных конструкций // Интеграция наук. 2018. № 8(23). С. 431–433.

Nikitina A.V., Isakova V.V., Ashikhmina A.A. Wood and Adhesives Used in the Manufacture of Laminated Wood Structures. *Integratsiya Nauk = Integration of Sciences*, 2018, no. 8(23), pp. 431–433. (In Russ.)

7. Патент № 2587215 С1 РФ, МПК E04B 1/10 (2006.01), E04B 2/70 (2006.01). 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.

Ivanov K.V. Wooden Glued Structural Element, Method of Erecting Wall Structures from Wooden Glued Structural Elements. Patent RF, no. RU 2587215 C1, 2016. (In Russ.)

8. Пирцхалава-Карпова Н.Р., Карпов А.А., Козловский Е.Е., Грищенко М.Ю. Защита еловых лесов от вспышек *Ips typographus* (обзор) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2021. № 4. С. 55–67.

Pirtskhalava-Karpova N.R., Karpov A.A., Kozlovski E.E., Grishchenko M.Yu. Protection of Spruce Forests from Outbreaks of *Ips Typographus* (Review). *Lesnoy Zhurnal = Russian Forestry Journal*, 2021, no. 4, pp. 55–67. (In Russ.) <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2021-4-55-67>

9. Погорельцев А.А., Пятикрестовский К.П. Дальнейшее развитие и совершенствование норм проектирования конструкций из древесины // Промышл. и гражд. строительство. 2019. № 3. С. 35–41.

Pogorel'tsev A.A., Pyatikrestovskiy K.P. Issues of Further Development and Improvement of Design Standards for Wood Structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* = Industrial and Civil Engineering, 2019, no. 3, pp. 35–41. (In Russ.). <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.03.35-41>

10. Пятикрестовский К.П., Травуш В.И., Погорельцев А.А., Клюкин А.А. Разработка конструкций из цельной древесины для объектов инфраструктуры // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2018. Т. 14, № 1. С. 145–154.

Pyatikrestovskiy K.P., Travush V.I., Pogorel'tsev A.A., Klukin A.A. Development of Structures from Solid Wood for Objects of Infrastructure. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 145–154. (In Russ.). <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-14-1-145-154>

11. Тюрин О.Е. Повышение прочности и жесткости деревоклееных балочных элементов с армированием композитными стержнями: дис. ... канд. техн. наук. Архангельск, 2022. 128 с.

Tyurina O.E. *Increasing the Strength and Rigidity of Wood-Laminated Beam Elements Reinforced with Composite Rods*: Cand. Tech. Sci. Diss. Arkhangelsk, 2022. 128 p. (In Russ.).

12. Arefyev S.P. West Siberian Latitudinal Xylomycological Scale and Its Use for Indicating Forest Conditions. *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, vol. 11, iss. 5, pp. 527–541. <https://doi.org/10.1134/S1995425518050037>

13. Castillo M.E., Garfias R., Plaza Á. Effects of Fire on Forest Communities and Sclerophyllous Scrubs in Central Chile as a Basis for the Formulation of Restoration Guidelines. *Forestist*, 2021, vol. 71, iss. 1, pp. 9–17. <https://doi.org/10.5152/forestist.2020.20042>

14. Lisyatnikov M., Lukina A., Chibrikov D., Labudin B. The Strength of Wood-Reinforced Polymer Composites in Tension at an Angle to the Fibers. *Proceedings of MPCPE 2021. Lecture Notes in Civil Engineering*. Cham, Springer, 2022, vol. 182, pp. 523–533. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8\\_46](https://doi.org/10.1007/978-3-030-85236-8_46)

15. Lukin M., Prusov E., Roshchina S., Karelina M., Vatin N. Multi-Span Composite Timber Beams with Rational Steel Reinforcements. *Buildings*, 2021, vol. 11, iss. 46. <https://doi.org/10.3390/buildings11020046>

16. Lukina A., Lisyatnikov M., Lukin M., Vatin N., Roschina S. Strength Properties of Raw Wood after a Wildfire. *Magazine of Civil Engineering*, 2023, iss. 3(119), art. no. 11907. <https://doi.org/10.34910/MCE.119.7>

17. Lukina A., Lisyatnikov M., Martinov V., Chernykh A., Roschina S. Mechanical and Microstructural Changes in Post-Fire Raw Wood. *Architecture and Engineering*, 2022, vol. 7, iss. 3, pp. 44–52. <https://doi.org/10.23968/2500-0055-2022-7-3-44-52>

18. Scandelli H., Ahmadi-Senichault A., Richard F., Lachaud J. Simulation of Wood Combustion in PATO Using a Detailed Pyrolysis Model Coupled to fireFoam. *Applied Sciences*, 2021, vol. 11, iss. 22, art. no. 10570. <https://doi.org/10.3390/app112210570>

19. Suzuki J., Mizukami T., Naruse T., Araki Y. Fire Resistance of Timber Panel Structures Under Standard Fire Exposure. *Fire Technology*, 2016, vol. 52, pp. 1015–1034. <https://doi.org/10.1007/s10694-016-0578-2>

20. 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, vol. 13, iss. 4, art. no. 528. <https://doi.org/10.3390/f13040528>

21. Yang Y., Hu X., Han M., He K., Liu B., Jin T., Cao X., Wang Y., Huang J. Post-Fire Temporal Trends in Soil Properties and Revegetation: Insights from Different Wildfire Severities in the Hengduan Mountains, Southwestern China. *Catena*, 2022, vol. 213, art. no. 106160. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106160>

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов  
**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest

**Вклад авторов:** Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи  
**Authors' Contribution:** All authors contributed equally to the writing of the article