

## Анализ прочностных и теплопроводных характеристик слоистых балок, состоящих из массива дерева и теплоизоляционного материала

Мария Сергеевна Панова<sup>1</sup>, Николай Алексеевич Татусь<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ); г. Москва, Россия;

<sup>2</sup> Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН); г. Москва, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Описывается экспериментально-теоретическая работа по исследованию характеристик слоистого строительного материала — термобруса, состоящего из массива дерева и слоев теплоизоляции. Подобные материалы применяются для строительства легковозводимых деревянных домов частного сектора и малоэтажных. Особенности такого типа материалов в том, что одновременно с конструкционным материалом — древесиной — брус содержит слой или слои утеплителя, что позволяет сократить этап утепления дома при его возведении. Прочная древесина и абсолютно ничего не способная нести теплоизоляция вместе могут дать материал, характеристики которого в корне отличаются как от первого, так и от второго.

**Материалы и методы.** Рассматривается влияние количества и толщины слоев теплоизоляции и древесины на прочностные и теплоизоляционные характеристики получаемого бруса. Зная закономерности изменения характеристик от количества слоев, становится возможным подобрать рациональную систему чередования слоев древесины и утеплителя. Проведены экспериментальные исследования балок с различным количеством и толщиной теплоизоляционных и силовых слоев; общая толщина и силовых, и теплоизоляционных слоев в каждой балке была одинаковой, но менялась последовательность их укладки.

**Результаты.** Показаны результаты экспериментального исследования прочности термобруса при изгибе и расчетное исследование его теплоизоляционных характеристик. Экспериментально получены зависимости максимальных нагрузок для балок с различным количеством слоев древесины/утеплителя.

**Выводы.** В результате проведенных экспериментов оказалось, что линейная теория изгиба не может точно описать поведение слоистого материала — выдерживаемая нагрузка росла с ростом количества слоев.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** деревянный брус, термобрус, прочность, изгиб, балки, слоистые конструкции, теплоизоляция, испытания на изгиб, расчеты на прочность

**ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:** Панова М.С., Татусь Н.А. Анализ прочностных и теплопроводных характеристик слоистых балок, состоящих из массива дерева и теплоизоляционного материала // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 6. С. 982–990. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.982-990

Автор, ответственный за переписку: Николай Алексеевич Татусь, nikalet@mail.ru.

## Analysis of strength and thermal conductivity characteristics of layered beams consisting of solid wood and thermal insulation material

Maria S. Panova<sup>1</sup>, Nikolay A. Tatus<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU); Moscow, Russian Federation;

<sup>2</sup> Blagonravov Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAS); Moscow, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** The paper describes experimental and theoretical work on the study of the characteristics of a layered building material — thermal timber, consisting of solid wood and layers of thermal insulation. Such materials are used for construction of lightly built wooden houses of private sector and low-rise houses. The peculiarities of this type of materials is that simultaneously with the construction material — wood beam contains a layer or layers of insulation, which allows to reduce the stage of insulation of the house during its construction. Strong wood and absolutely nothing capable of carrying insulation together can give a material whose characteristics are fundamentally different from both the first and the second.

**Materials and methods.** The influence of the number and thickness of layers of thermal insulation and wood on the strength and thermal insulation characteristics of the resulting timber is considered. Knowing the regularities of changing characteristics from the number of layers, it becomes possible to choose a rational system of alternation of wood and insulation layers. Experimental studies of beams with different number and thickness of thermal insulation and power layers were carried out, the total thickness of both power and thermal insulation layers in each beam were the same, but the sequence of laying was changed.

**Results.** The results of the experimental study of the bending strength of the thermal timber and the calculated study of its thermal insulation characteristics are shown. Dependences of maximum loads for beams with different number of wood/insulation layers were experimentally obtained.

**Conclusions.** As a result of the experiments it turned out that the linear bending theory cannot accurately describe the behaviour of the layered material — the withstand load grew with the increase in the number of layers.

**KEYWORDS:** wooden beams, thermal timber, strength, bending, beams, laminated structures, thermal insulation, bending tests, strength calculations

**FOR CITATION:** Panova M.S., Tatus N.A. Analysis of strength and thermal conductivity characteristics of layered beams consisting of solid wood and thermal insulation material. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(6):982-990. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.6.982-990 (rus.).

Corresponding author: Nikolay A. Tatus, nikalet@mail.ru.

## ВВЕДЕНИЕ

Термобрус — это современный строительный материал для малоэтажного строительства, который совмещает в себе высокие теплоизоляционные свойства современных изоляционных материалов и прочностные характеристики клееного бруса. Подобные конструкции называются сэндвичи [1–4], поскольку по краям располагается прочный материал, а в середине — легкий наполни-

тель, но есть оговорка. Сэндвичевые конструкции (как правило, это панели, а не балки) работают в плоскости листа, т.е. прочные слои — это верх и низ, однако принцип работы термобруса другой: силовые наружные слои работают в плоскостях, перпендикулярных плоскости листа (рис. 1) [5–10].

Термобрус производится с различными параметрами. Ламели бывают цельными или клееными (рис. 2), могут изготавливаться из хвойных пород древесины или лиственных [11–15]. Выбор тепло-

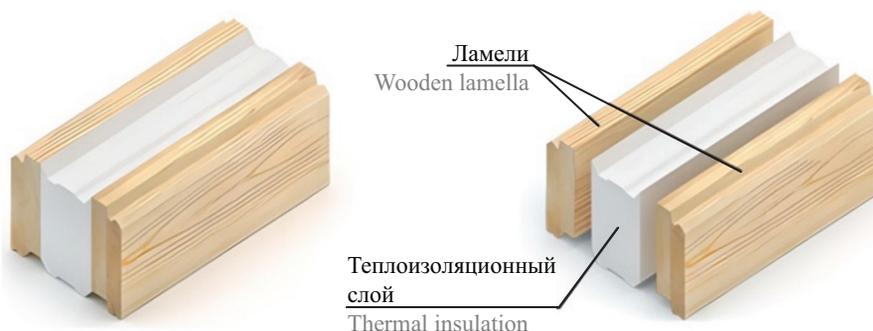


Рис. 1. Термобрус (общий вид)

Fig. 1. Thermal timber (general view)



Один теплоизоляционный  
слой пенополиуретана  
One layer of polyurethane foam



Один теплоизоляционный  
слой каменной ваты  
One layer of rockwool



Два теплоизоляционных слоя  
экструдированного пенополистирола  
Two layers of polystyrene foam

Рис. 2. Некоторые разновидности термобруса

Fig. 2. Some types of thermal timber

изоляционного материала (ТМ) обширен, но чаще всего применяются экструдированный пенополистирол (ППС) и пенополиуретан (ППУ), также можно использовать эковату или минеральную вату [16–21]. Вместо одного слоя ТМ может быть несколько слоев. Также существует пустотелый термобрус, у которого пространство между ламелями заполняется непосредственно в процессе строительства [22–25].

Цель исследования — изучение влияния количества и порядка расположения силовых и теплоизоляционных слоев на прочностные и теплоизоляционные [26, 27] характеристики термобруса. Для этого были подготовлены несколько образцов, проведены лабораторные испытания и аналитические исследования.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

*Подготовка образцов.* Для проведения испытаний подготовлены 4 типа образцов (рис. 3), 3 из которых имели одинаковое количество массива дерева

$b_t$  и теплоизоляции  $b_p$ , 4-й контрольный образец состоял только из массива дерева (табл. 1).

*Расчет теплоизоляционных характеристик.* Современные нормы строительства требуют, чтобы каждое здание обладало необходимым уровнем тепловой защиты, что возможно сделать, применяя высококачественные ТМ. Теплоизоляционные свойства материала зависят от теплопроводности, которая характеризуется коэффициентом  $\lambda$ .

Зная коэффициент теплопроводности, рассчитывают необходимую для соблюдения температурно-влажностного режима помещения толщину утеплителя. Для расчета тепло- и пароизоляционных свойств обычно используют СП 50.13330.2012, СНиП 23-02–2003 и СП 131.13330.2020, СНиП 23-01–99.

С целью анализа теплоизоляционных свойств термобруса проведено два расчета. Для задания условий, в которых находится строение из термобруса, взят г. Архангельск (влажная зона), внутри помещения был задан нормальный температурно-влажностный режим. Все ламели изготовлены

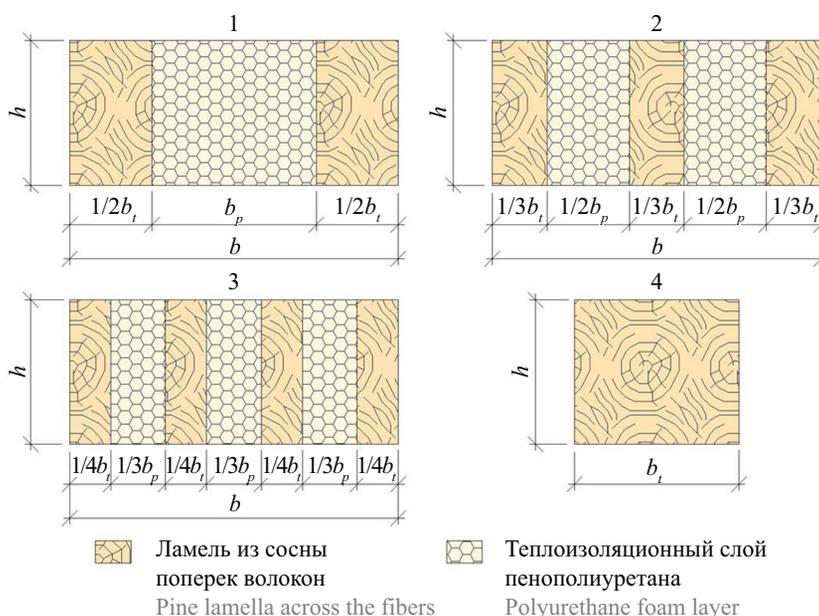


Рис. 3. Поперечное сечение лабораторных образцов для проведения испытаний

Fig. 3. Cross-section of laboratory test specimens

Табл. 1. Геометрические характеристики изготовленных образцов

Table 1. Geometric characteristics of the specimens

Номер образца Specimen No.	Ширина, $10^{-3}$ м Width, $10^{-3}$ m			$h$ , $10^{-3}$ м / m	$l$ , $10^{-3}$ м / m	$W$ , $10^{-9}$ м <sup>3</sup> / м <sup>3</sup>	
	$b_t$	$b_p$	$b$			Дерево Only wood	Общий Entire cross-section
1	29,0	29,0	58,0	24,2	150,00	2830,5	5661
2	28,25	28,25	56,50	24,0	150,00	2712	5424
3	28,75	28,75	57,50	24,2	150,00	2806	5612
4	25,30	–	25,30	23,9	150,00	2409	2409

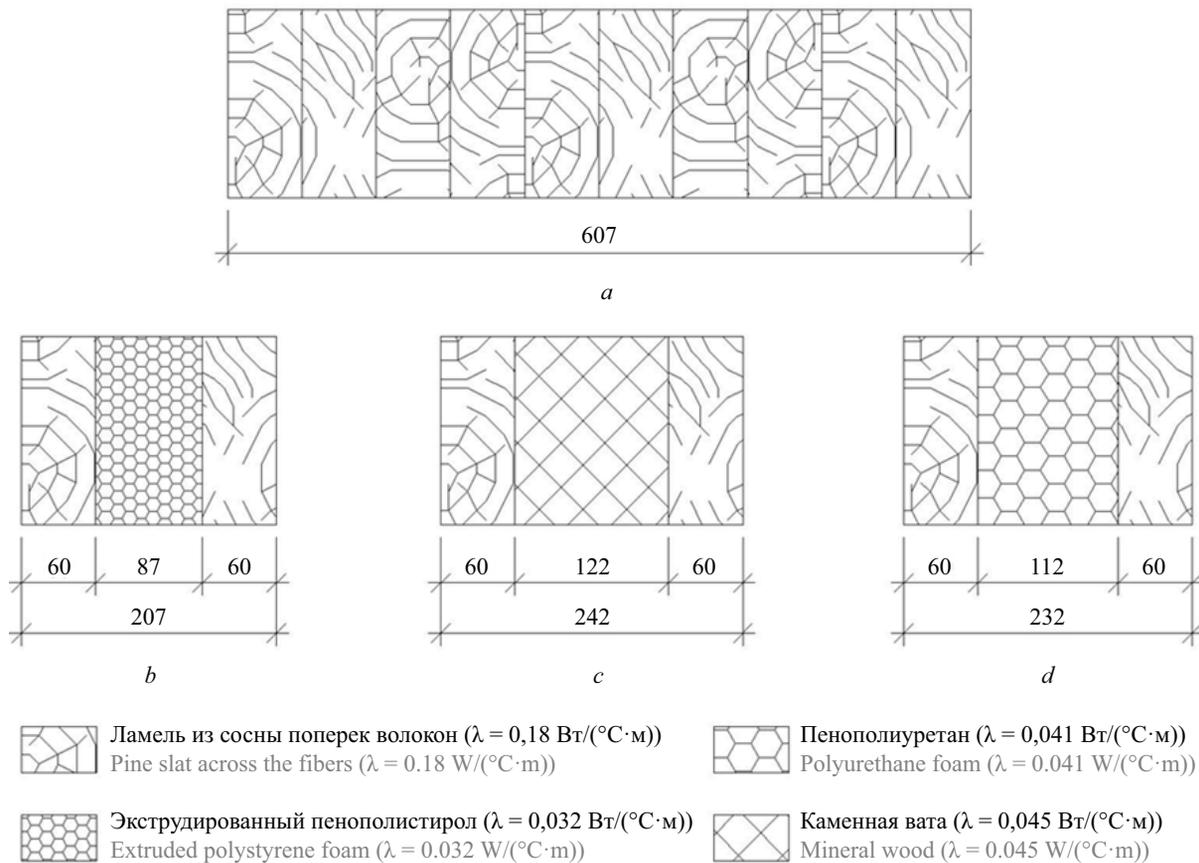


Рис. 4. Результаты теплотехнического расчета клееного бруса (а) и термобруса с разными теплоизоляционными материалами: б — экструдированный пенополистирол; с — каменная вата; д — пенополиуретан

Fig. 4. The results of thermal calculation of the glued timber (a) and the thermal timber made with different heat-insulating materials: b — extruded polystyrene foam; c — mineral wool; d — polyurethane foam

из сосны обыкновенной. Рассчитанное значение требуемого сопротивления теплопередаче термобруса составило  $R_0^{\text{тп}} = 3,53 \text{ (°С}\cdot\text{м}^2/\text{Вт})$ .

В первом расчете рассматривалось влияние необходимой для соблюдения эксплуатационных требований толщины различных видов применяемой теплоизоляции (экструдированный ППС, каменная вата и ППУ) на общую толщину термобруса. Результаты приведены на рис. 4. Из рис. 4 видно, что чем меньше коэффициент теплопроводности ТМ, тем меньшая толщина его нужна при соблюдении требований по утеплению здания.

Во втором расчете рассматривалось влияние разных вариантов «армирования» (чередование ламелей и утеплителя) термобруса на распределение температуры и парциального давления по его толщине. В качестве ТМ взят пенополиуретан. Результаты расчета приведены на рис. 5, где показаны кривые действительного  $e$  и максимального  $E$  парциального давления, которые пересекаются в каждом варианте, следовательно, выпадение конденсата возможно. В табл. 2 показано распределение значений  $t$ ,  $E$  и  $e$  в сечении термобруса.

Определение прочностных характеристик термобруса. От механических характеристик стро-

ительного материала зависит стойкость строений к эксплуатационным нагрузкам, поэтому слои теплоизоляции не должны ни в коем случае снижать прочность термобруса. Для оценки прочностных характеристик термобруса проведены испытания по схеме поперечного изгиба (рис. 6).

Формула для определения предела прочности при поперечном изгибе имеет вид:

$$\sigma_{\text{max}} = \frac{M}{W} = \frac{3 \cdot P \cdot l}{2 \cdot b \cdot h^2},$$

где  $M$  — максимальный изгибающий момент;  $W$  — момент сопротивления сечения;  $P$  — разрушающая сила при изгибе;  $l$  — пролет (длина) балки;  $b$  — ширина поперечного сечения;  $h$  — высота поперечного сечения.

Предел прочности зависит от геометрии сечения балки, основную нагрузку в термобрусе будут воспринимать деревянные ламели, поскольку прочностные характеристики ТМ очень малы. К примеру, прочность на изгиб у экструдированного ППС составляет 0,4–1 МПа, у сосны — порядка 78 МПа. Поэтому при расчете максимальных напряжений следует учитывать только поперечное сечение массива дерева. Результаты представлены в табл. 3.

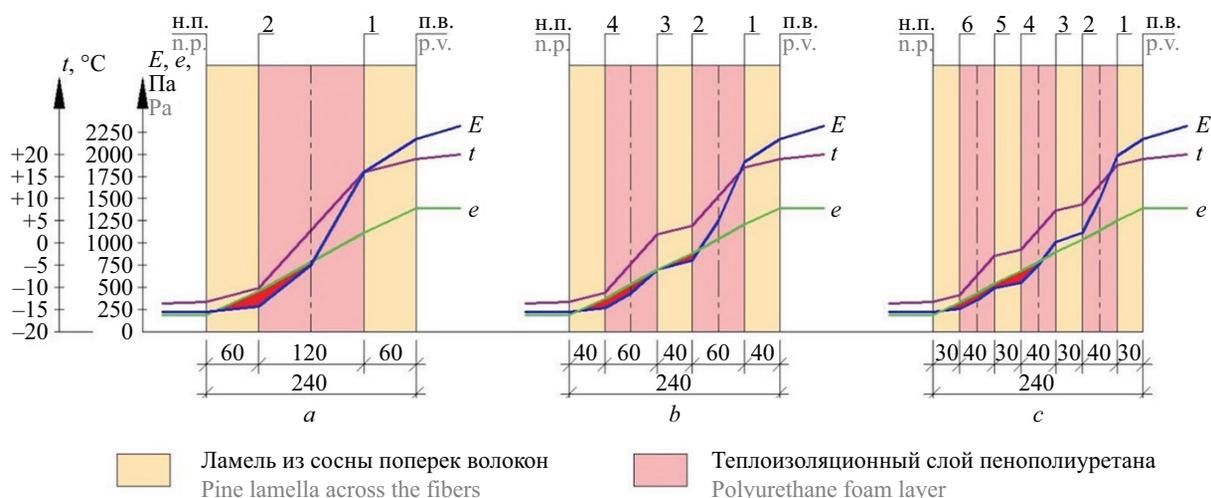


Рис. 5. Графики распределения температуры  $t$  и парциального давления водяного пара  $E$  и  $e$  по толще термобруса с разными вариантами чередования слоев

Fig. 5. Temperature  $t$  and water vapour partial pressure  $E$  и  $e$  distribution diagrams of the thermal timber with different options of layer alternation

Табл. 2. Распределение значений  $t$ ,  $E$  и  $e$  в сечении термобруса

Table 2. The distribution of  $t$ ,  $E$  и  $e$  values in the thermal timber

Сечение Location of section	Вариант $a$ Option $a$			Вариант $b$ Option $b$			Вариант $c$ Option $c$		
	$t$ , °C	$E$ , Па / Па	$e$ , Па / Па	$t$ , °C	$E$ , Па / Па	$e$ , Па / Па	$t$ , °C	$E$ , Па / Па	$e$ , Па / Па
Внутренний воздух Inner air	20	2315	1389	20	2315	1389	20	2315	1389
Внутренняя поверхность Inner surface	18,97	2171,2	1389	18,97	2171,2	1389	18,97	2171,2	1389
1	15,99	1797,7	1115,7	16,98	1913,6	1206,8	17,48	1976,2	1252,4
2	-10,24	285,2	460,0	3,87	802,3	878,9	8,74	1118,7	1033,7
3	-	-	-	1,88	698,0	696,7	7,24	1012,0	897,1
4	-	-	-	-11,24	264,0	368,7	-1,5	548,3	678,4
5	-	-	-	-	-	-	-3,0	491,3	541,8
6	-	-	-	-	-	-	-11,74	253,9	323,2
Наружная поверхность Outer surface	-13,23	226,0	186,5	-13,23	226,0	186,5	-13,23	226,0	186,5
Наружный воздух Outer air	-13,6	219,4	186,5	-13,6	219,4	186,5	-13,6	219,4	186,5

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На графиках распределения температур и парциального давления водяного пара по толще термобруса кривые действительного и максимально-го парциального давления пересекаются в каждом варианте, следовательно, выпадение конденсата возможно. В первом варианте присутствует 1 участок пересечения, во втором и третьем вариантах — по 2 участка пересечения. Это можно объяснить малым значением коэффициентов паропроницаемости

как дерева поперек волокон, так и ППУ. Можно заметить, что чем больше чередований ламель — утеплитель, тем меньше площадь участка, на котором может выпасть конденсат.

Испытания на изгиб показали интересный результат: максимальная нагрузка, а следовательно, и максимальные напряжения растут с увеличением количества слоев, но напряжения при изгибе зависят от ширины образца линейно и не должны меняться из-за порядка расположения слоев в термобрусе.

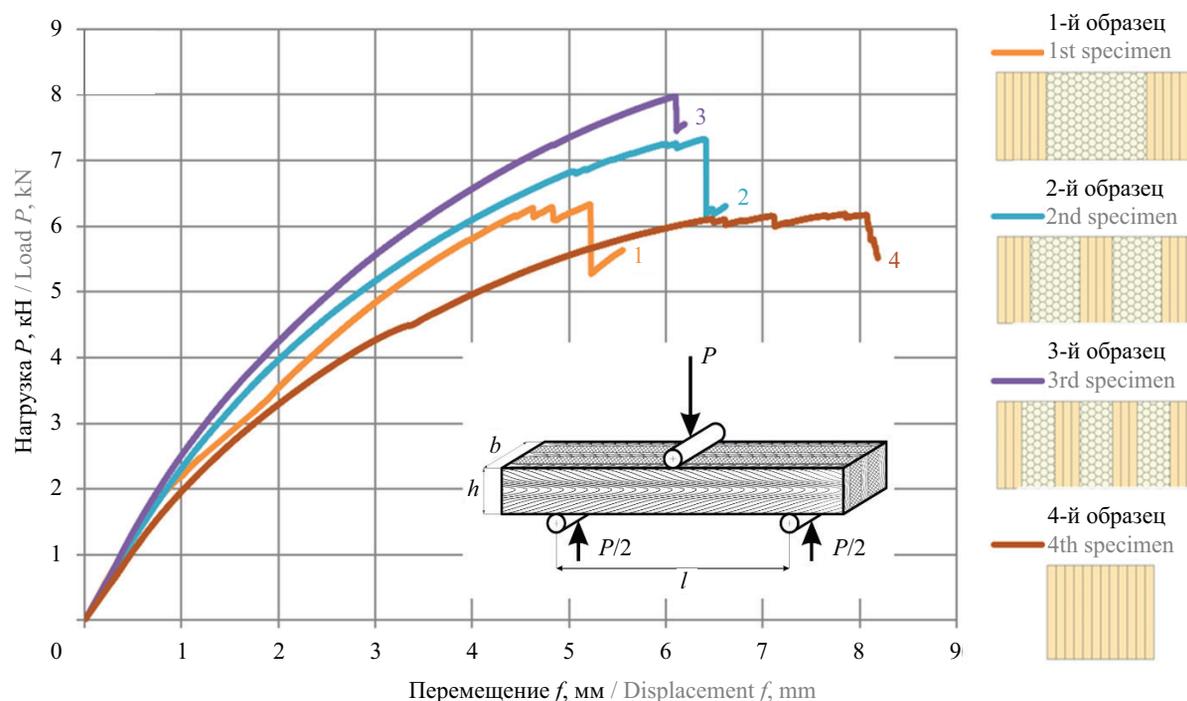


Рис. 6. Результаты эксперимента и схема проведения испытаний на поперечный изгиб

Fig. 6. Experimental results and scheme of cross-bending tests

Табл. 3. Максимальные напряжения при изгибе

Table 3. Maximum bending stresses

Номер образца Specimen No.	$P_{\max}$ , кН / kN	$f_{\max}$ , мм / mm	$\sigma_{\max}$ , МПа / MPa
1	6,332	5,22	39,1
2	7,324	6,39	47,3
3	7,976	6,12	49,7
4	6,186	7,86	89,9

Авторы считают, что увеличение максимальной силы связано с более равномерным распределением нагрузки по ширине сечения при увеличении количества деревянных ламелей, т.е. в первом случае ламелей 2, во втором — 3, в третьем — 4, в четвертом — сплошной брус, площадь поперечного сечения которого примерно равна площади древесины в термобрусе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С целью повышения степени теплоизоляции следует изготавливать термобрус с применением пористых материалов, таких как экструдированный пенополистирол и пенополиуретан.

Для большей несущей способности необходимо изготавливать термобрус с применением большего количества слоев.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Zaid N.Z.M., Rejab M.R.M., Mohamed N.A.N. Sandwich structure based on corrugated-core : a review // MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 74. P. 00029. DOI: 10.1051/mateconf/20167400029

2. Комаров В.А., Павлова С.А. Учет требований жесткости при проектировании трехслойных конструкций панелей пола самолета из высокопрочных композиционных материалов // Вестник Самарского

университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2021. Т. 20. № 2. С. 45–52. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-2-45-52. EDN SUXWWR.

3. Stefan A., Pelin G., Pelin C., Petre A., Marin M. Manufacturing process, mechanical behavior and modeling of composites structures sandwich panel // Incas Bulletin. 2021. Vol. 13. Issue 1. Pp. 183–191. DOI: 10.13111/2066-8201.2021.13.1.19

4. Павлычева Е.А., Пикалов Е.С. Современные энергоэффективные конструкционные и облицовочные строительные материалы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2020. № 7. С. 76–87. EDN TJASQP.
5. American Institute of Timber Construction. Timber construction manual. 2012. DOI: 10.1002/9781118279687
6. Hayward P.A. Timber-connector construction // Journal of Fluids Engineering. 1937. Vol. 59. Issue 5. Pp. 457–460. DOI: 10.1115/1.4020487
7. Bader T., Ormarsson S. Modeling the mechanical behavior of wood materials and timber structures // Springer Handbook of Wood Science and Technology. 2023. Pp. 507–568. DOI: 10.1007/978-3-030-81315-4\_10
8. Kuzman M., Oblak L., Vratuša S. Glued laminated timber in architecture // Drvna Industrija. 2010. Vol. 61. Issue 3.
9. Gao S., Xu M., Guo N., Zhang Y. Mechanical properties of glued-laminated timber with different assembly patterns // Advances in Civil Engineering. 2019. Pp. 1–13. DOI: 10.1155/2019/9495705
10. Хошимова Ф.Ф., Панфилов Д.В., Поликутин А.Э. Расчет деревянных мостовых брусев, армированных лентой из углеродного волокна, при циклических воздействиях // Научный журнал строительства и архитектуры. 2023. № 3 (71). С. 22–30. DOI: 10.36622/VSTU.2023.3.71.002. EDN JOWSQH.
11. Kopecky P., Staněk K., Bureš M., Richter J., Tywoniak J. Experimental investigations of wooden beam ends in masonry with internal insulation // Energy Procedia. 2017. Vol. 132. Pp. 682–687. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.10.006
12. Vereecken E., Roels S. Wooden beam ends in combination with interior insulation: An experimental study on the impact of convective moisture transport // Building and Environment. 2019. Vol. 148. Pp. 524–534. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.10.060
13. Mets T., Tilmans A. Evaluation of the risk of decay of wooden beams embedded in internally insulated walls by long-term measurements // E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 172. P. 01002. DOI: 10.1051/e3sconf/202017201002
14. Micháľková D., Ďurica P. Experimental verification of thermal insulation in timber framed walls // Materials. 2022. Vol. 15. P. 2040. DOI: 10.3390/ma15062040
15. Абу-Хасан М.С., Розанцева Н.В., Егоров В.В., Куправа Л.П. Оптимизация конфигурации перекрестно-балочной системы пространственной конструкции в зависимости от заданных параметров // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2020. № 9 (1033). С. 32–35. EDN UJGVIE.
16. Bozsaky D. The historical development of thermal insulation materials // Periodica Polytechnica Architecture. 2011. Vol. 41. Issue 2. Pp. 49–56. DOI: 10.3311/pp.ar.2010-2.02
17. Aksit M., Zhao C., Klose B., Kreger K., Schmidt H., Altstädt V. Extruded polystyrene foams with enhanced insulation and mechanical properties by a benzene-trisamide-based additive // Polymers. 2019. Vol. 11. Issue 2. P. 268. DOI: 10.3390/polym11020268
18. Mahajan U.R., Emmanuel I., Sreenivasarao A., Mhaske S.T. Development of smart polyurethane foam with combined capabilities of thermal insulation and thermal energy storage by integrating microencapsulated phase change material // Polymer Bulletin. 2023. Vol. 80. Issue 12. Pp. 13099–13115. DOI: 10.1007/s00289-023-04695-8
19. Samardzioska T., Jovanoska M. Recycled rebonded polyurethane foam as sustainable thermal insulation. 2023. DOI: 10.33552/CTCSE.2023.09.000719
20. Rapley S., Bompa D., Biswal S. Compression resistance of digitally fabricated hollow timber columns // Proceedings of the IASS Annual Symposium 2023 Integration of Design and Fabrication. 2023.
21. Неверов Е.Н., Короткий И.А., Коротких П.С., Расценкин А.Н., Самар С.А. Изучение процесса деформации различных видов теплоизоляционных материалов при воздействии низких температур и влаги // Вестник МГСУ. 2023. № 18 (8). С. 1251–1261. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1251-1261
22. Suthesh M., Chollackal A. Thermal performance of multilayer insulation : a review // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 396. P. 012061. DOI: 10.1088/1757-899X/396/1/012061
23. Perković N., Rajčić V. Mechanical and fire performance of innovative hollow glue-laminated timber beams // Polymers. 2022. Vol. 14. Issue 16. P. 3381. DOI: 10.3390/polym14163381
24. Zöllig S., Frangi A., Franke S., Muster M. Timber structures 3.0 — new technology for multi-axial, slim, high performance timber structures // World Conference on Timber Engineering. 2016.
25. Liu Y. Study on the influence of the arrangement of thermal insulation floor on the thermal insulation and mechanical properties of hollow slab // Lecture Notes in Civil Engineering. 2023. Pp. 125–136. DOI: 10.1007/978-981-99-1748-8\_10
26. Caniato M., Marzi A., da Silva S., Gasparella A. A review of the thermal and acoustic properties of materials for timber building construction // Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 43. P. 103066. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103066
27. Колесова А.В. Сравнительная характеристика теплотехнических свойств строительных материалов, использующихся во внешних ограждениях // Наукосфера. 2023. № 1–1. С. 322–325. EDN TKOMUK.

Поступила в редакцию 26 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 9 февраля 2024 г.

Одобрена для публикации 9 февраля 2024 г.

**ОБ АВТОРАХ:** **Мария Сергеевна Панова** — магистр кафедры сопротивления материалов; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; РИНЦ ID: 1233566; panova.mariya1999@gmail.com;

**Николай Алексеевич Татусь** — кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; заведующий лабораторией безопасности и прочности композитных конструкций; **Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН)**; 101000, г. Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4; РИНЦ ID: 157336, Scopus: 12039478400, ResearcherID: AAI-2387-2020, ORCID: 0000-0003-1748-9976; nikalet@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## REFERENCES

1. Zaid N.Z.M., Rejab M.R.M., Mohamed N.A.N. Sandwich structure based on corrugated-core : a review. *MATEC Web of Conferences*. 2016; 74:00029. DOI: 10.1051/mateconf/20167400029
2. Komarov V.A., Pavlova S.A. Optimal design of sandwich floor panels made of high-strength composite materials considering stiffness constraints. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021; 20(2):45-52. DOI: 10.18287/2541-7533-2021-20-2-45-52. EDN SUXWWR. (rus.)
3. Stefan A., Pelin G., Pelin C., Petre A., Marin M. Manufacturing process, mechanical behavior and modeling of composites structures sandwich panel. *Incas Bulletin*. 2021; 13(1):183-191. DOI: 10.13111/2066-8201.2021.13.1.19
4. Pavlycheva E.A., Pikalov E.S. Modern energy-efficient structural and facing building materials. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 2020; 7:76-87. EDN TJASPO. (rus.)
5. American Institute of Timber Construction. *Timber construction manual*. 2012. DOI: 10.1002/9781118279687
6. Hayward P.A. Timber-connector construction. *Journal of Fluids Engineering*. 1937; 59(5):457-460. DOI: 10.1115/1.4020487
7. Bader T., Ormarsson S. Modeling the mechanical behavior of wood materials and timber structures. *Springer Handbook of Wood Science and Technology*. 2023; 507-568. DOI: 10.1007/978-3-030-81315-4\_10
8. Kuzman M., Oblak L., Vratuša S. Glued laminated timber in architecture. *Drvna Industrija*. 2010; 61(3).
9. Gao S., Xu M., Guo N., Zhang Y. Mechanical properties of glued-laminated timber with different assembly patterns. *Advances in Civil Engineering*. 2019; 1-13. DOI: 10.1155/2019/9495705
10. Khoshimova F.F., Panfilov D.V., Polikutin A.E. Calculation of wooden bridge beams, reinforced with carbon fiber tape, with cyclic effects. *Russian Journal of Building Construction and Architecture*. 2023; 3(71):22-30. DOI: 10.36622/VSTU.2023.3.71.002. EDN JOWSQH. (rus.)
11. Kopecky P., Staněk K., Bureš M., Richter J., Tywoniak J. Experimental investigations of wooden beam ends in masonry with internal insulation. *Energy Procedia*. 2017; 132:682-687. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.10.006
12. Vereecken E., Roels S. Wooden beam ends in combination with interior insulation: An experimental study on the impact of convective moisture transport. *Building and Environment*. 2019; 148:524-534. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.10.060
13. Mets T., Tilmans A. Evaluation of the risk of decay of wooden beams embedded in internally insulated walls by long-term measurements. *E3S Web of Conferences*. 2020; 172:01002. DOI: 10.1051/e3sconf/202017201002
14. Micháľková D., Ďurica P. Experimental verification of thermal insulation in timber framed walls. *Materials*. 2022; 15:2040. DOI: 10.3390/ma15062040
15. Abu-Hasan M.S., Rozanceva N.V., Egorov V.V., Kuprava L.R. Optimization of configuration of cross-beam system of spatial structure depending on the given parameters. *BCT: Bulletin of Construction Technology*. 2020; 9(1033):32-35. EDN UJGVIE. (rus.)
16. Bozsaky D. The historical development of thermal insulation materials. *Periodica Polytechnica Architecture*. 2011; 41(2):49-56. DOI: 10.3311/pp.ar.2010-2.02
17. Aksit M., Zhao C., Klose B., Kreger K., Schmidt H., Altstädt V. Extruded polystyrene foams with enhanced insulation and mechanical properties by a benzene-trisamide-based additive. *Polymers*. 2019; 11(2):268. DOI: 10.3390/polym11020268
18. Mahajan U.R., Emmanuel I., Sreenivasarao A., Mhaske S.T. Development of smart polyurethane foam with combined capabilities of thermal

insulation and thermal energy storage by integrating microencapsulated phase change material. *Polymer Bulletin*. 2023; 80(12):13099-13115. DOI: 10.1007/s00289-023-04695-8

19. Samardzioska T., Jovanoska M. *Recycled re-bonded polyurethane foam as sustainable thermal insulation*. 2023. DOI: 10.33552/CTCSE.2023.09.000719

20. Rapley S., Bompa D., Biswal S. Compression resistance of digitally fabricated hollow timber columns. *Proceedings of the IASS Annual Symposium 2023 Integration of Design and Fabrication*. 2023.

21. Neverov E.N., Korotkiy I.A., Korotkih P.S., Rasshchepkin A.N., Samar S.A. Study of the deformation process of various types of thermal insulation materials under the influence of low temperatures and moisture. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2023; 18(8):1251-1261. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.8.1251-1261 (rus.).

22. Sutheesh M., Chollackal A. Thermal performance of multilayer insulation : a review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018; 396:012061. DOI: 10.1088/1757-899X/396/1/012061

23. Perković N., Rajcic V. Mechanical and fire performance of innovative hollow glue-laminated timber beams. *Polymers*. 2022; 14(16):3381. DOI: 10.3390/polym14163381

24. Zöllig S., Frangi A., Franke S., Muster M. Timber Structures 3.0 — New Technology for Multi-axial, Slim, High Performance Timber Structures. *World Conference on Timber Engineering*. 2016.

25. Liu Y. Study on the influence of the arrangement of thermal insulation floor on the thermal insulation and mechanical properties of hollow slab. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2023; 125-136. DOI: 10.1007/978-981-99-1748-8\_10

26. Caniato M., Marzi A., da Silva S., Gasparella A. A review of the thermal and acoustic properties of materials for timber building construction. *Journal of Building Engineering*. 2021; 43:103066. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.103066

27. Kolesova A.V. Comparative characteristics of thermal properties of building materials, used in external fences. *Naukosfera*. 2023; 1-1:322-325. EDN TKOMUK. (rus.).

Received September 26, 2023.

Adopted in revised form on February 9, 2024.

Approved for publication on February 9, 2024.

**B I O N O T E S :** **Maria S. Panova** — master of the Department of Strength of Materials; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; ID RSCI: 1233566; panova.mariya1999@gmail.com;

**Nikolay A. Tatus** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Strength of Materials; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; Head of the Laboratory of Safety and Strength of Composite Structures; **Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAS)**; 4 Maly Kharitonevsky pereulok, Moscow, 101000, Russian Federation; ID RSCI: 157336, Scopus: 12039478400, ResearcherID: AAI-2387-2020, ORCID: 0000-0003-1748-9976; nikalet@mail.ru.

*Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.*

*The authors declare no conflicts of interest.*