

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 624.074.1

DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1587-1598

Влияние толщины поперечных и продольных слоев на деформативность и распределение напряжений в пятислойных плитах древесины перекрестно-клееной

Михаил Юрьевич Трошин, Андрей Викторович Турков

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева (ОГУ им. И.С. Тургенева);
г. Орел, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Отличительной чертой древесины перекрестно-клееной (ДПК, CLT-панелей) является перекрестное расположение досок (ламелей) в разных слоях плиты. Ввиду анизотропии древесины такая конструкция позволяет добиться высокой прочности и жесткости в разных направлениях действия напряжений, что сделало данный материал одним из самых перспективных для изучения в последние десятилетия. Рассматривается влияние толщины поперечных и продольных слоев в пятислойных плитах из ДПК на деформации и распределение возникающих нормальных и касательных напряжений. Актуальность обусловлена необходимостью получения расчетных данных для анализа изменения прочностных характеристик плит при различных вариациях толщины продольных и поперечных слоев с целью выбора наиболее эффективной конфигурации плиты.

Материалы и методы. Исследования проведены численными методами при помощи ПК SCAD+ с помощью МКЭ (метода конечных элементов). При этом объемными конечными элементами являются параллелепипеды. Расчетная схема определена как система общего вида, деформации которой и ее основные неизвестные представлены линейными перемещениями узловых точек вдоль осей X, Y, Z и поворотами вокруг этих осей. В качестве расчетной конструкции выбрана пятислойная плита с перекрестно направленными слоями таким образом, что наружные (1, 5) и центральный внутренние (3) слои являются продольными, а оставшиеся внутренние (2, 4) — поперечными. Упрощенная расчетная схема представляет собой шарнирно опертую балку.

Результаты. По результатам исследования и произведенных расчетов в SCAD+ составлены таблицы, на основании которых построены графики, отражающие зависимость прогиба, распределения нормальных и тангенциальных напряжений от толщины поперечных и продольных слоев плиты.

Выводы. Полученные данные позволяют оценить влияние толщины на деформативность и распределение напряжений в пятислойных CLT-панелях. Значимость выполненных исследований заключается в расширении научно-технической базы знаний в области деревянных конструкций.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: деревянные конструкции, CLT-панели, древесина, многослойные материалы, напряжения, прогиб, механические свойства, метод конечных элементов

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Трошин М.Ю., Турков А.В. Влияние толщины поперечных и продольных слоев на деформативность и распределение напряжений в пятислойных плитах древесины перекрестно-клееной // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. Вып. 10. С. 1587–1598. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1587-1598

Автор, ответственный за переписку: Михаил Юрьевич Трошин, mtr997@mail.ru.

Influence of thickness of transverse and longitudinal layers on deformability and stress distribution in five-layer cross-glued wood boards

Mikhail Yu. Troshin, Andrej V. Turkov

Orel State University named after I.S. Turgenev (Orel State University); Orel, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. A distinctive feature of CLT panels is the cross arrangement of planks (lamellae) in different layers of the board. Due to the anisotropy of wood, this design allows for high strength and stiffness in different directions of stress action, which has made this material one of the most promising to be studied in recent decades. This article examines the influence of the thickness of transverse and longitudinal layers in five-layer slabs of cross-glued timber boards, or CLT panels, on the deformation and distribution of the resulting normal and tangential stresses. The relevance of the work is conditioned by the necessity of obtaining calculated data to analyze changes in the strength characteristics of boards with different variations in the thickness of longitudinal and transverse layers in order to choose the most effective configuration of the board.

Materials and methods. The studies were carried out by numerical methods using SCAD+ PC using FEM (Finite element method). At the same time, the three-dimensional finite elements are parallelepipeds. The design scheme is defined as

a general-type system, whose deformations and its main unknowns are represented by linear displacements of nodal points along the X , Y , Z axes and rotations around these axes. As a design structure, a five-layer slab with cross-directed layers was chosen in such a way that the outer (1, 5) and central inner (3) layers are longitudinal, and the remaining inner (2, 4) are transverse. The simplified design scheme is a pivotally supported beam.

Results. The results of the study and calculations made using SCAD+ were applied to make tables and graphs showing dependence of deflection, distribution of normal and tangential stresses on the thickness of transverse and longitudinal layers of the board.

Conclusions. The obtained data allow us to evaluate the influence of thickness on deformability and stress distribution in five-layer CLT panels. The significance of the conducted research is in the expansion of scientific and technical knowledge base in the field of wooden structures.

KEYWORDS: wooden structures, CLT panels, wood, multilayer materials, stresses, deflection, mechanical properties, finite-element method

FOR CITATION: Troshin M.Yu., Turkov A.V. Influence of thickness of transverse and longitudinal layers on deformability and stress distribution in five-layer cross-glued wood boards. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(10):1587-1598. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.10.1587-1598 (rus.).

Corresponding author: Mikhail Yu. Troshin, mtr997@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия древесина перекрестно-клееная (ДПК, CLT-панели) стала одним из самых перспективных материалов в современной строительной индустрии. Уникальные механические свойства CLT-панелей и широкий спектр применения привлекают все большее внимание исследователей, инженеров и архитекторов.

Изучение механических свойств CLT-панелей играет важную роль в понимании и оценке их производственных и конструктивных характеристик. Механические свойства определяют прочность, устойчивость и деформационные характеристики материала, что влияет на его способность противостоять нагрузкам, а также на долговечность конструкций.

Ранее авторами проводились исследования трехслойных плит из ДПК [1]. Кроме того, изучением механических свойств плит из ДПК при разных условиях занимались как зарубежные [2–9], так и отечественные авторы [10–20].

В статье представлены результаты расчета, проведенного на моделях пятислойных плит древесины

перекрестно-клееной, или CLT-панелей, с различной толщиной поперечных и продольных слоев. Были измерены деформации и напряжения во множестве конечных элементов (КЭ) и узлов. Для анализа взяты максимальные значения деформаций и напряжений в узлах КЭ для каждой вариации плиты.

Цель исследования — выявление влияния толщины поперечных и продольных слоев на деформативность и распределение напряжений в пятислойных плитах ДПК. Полученные результаты могут быть полезными для оптимизации проектирования и производства CLT-панелей, а также для повышения их механической прочности и устойчивости к деформациям.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проведены численными методами при помощи программно-вычислительного комплекса SCAD+. Расчетная схема определена как система общего вида, деформации которой и ее основные неизвестные представлены линейными перемещениями узловых точек вдоль осей X , Y , Z и поворотами вокруг этих осей.

Расчетная конструкция — пятислойная плита из ДПК, шарнирно опертая на опорах. Пространственная модель показана на рис. 1.

Плиты закреплены по нижнему слою с двух противоположных сторон пластин по направлению XZ и XYZ (шарнирно-подвижная и шарнирно-неподвижная опоры). Нагружение плиты из пере-

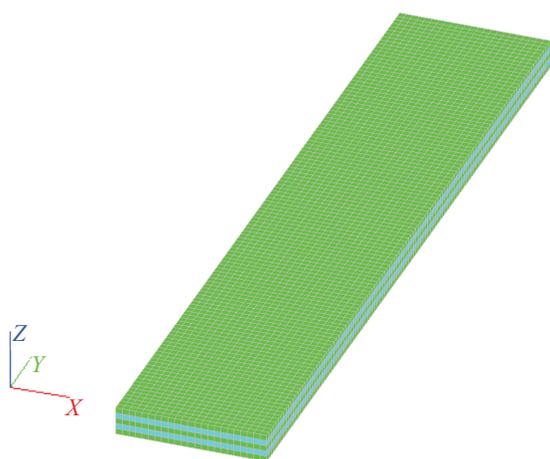


Рис. 1. Общий вид расчетной модели пятислойной плиты из ДПК

Fig. 1. General view of the calculation model of a five-layer CLT board

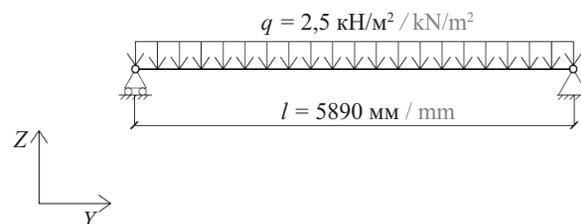


Рис. 2. Расчетная схема пятислойной плиты из перекрестной древесины

Fig. 2. Design scheme of a five-layer CLT board

крестной древесины задается равномерно распределенной нагрузкой на грани объемных элементов, равной 2,5 кН/м². Длина конструкции — 5890 мм, ширина — 1140 мм. Ламели в слоях имеют ширину 190 мм и варьируемую толщину 9; 12; 18; 25; 32; 42 мм. Ламели расположены так, что в первом, третьем и пятом слоях они направлены вдоль плиты, а во втором и четвертом слоях — поперек. Упрощенная плоская расчетная схема представляет собой статически определимую балку (рис. 2).

Программный комплекс (ПК) SCAD+ позволяет определять механические свойства за счет присвоения расчетной модели параметров, соответствующих реальному материалу. Учитывая анизотропные свойства древесины, поперечным и продольным слоям были заданы разные модули упругости вдоль *OX* и *OY*. Упругие характеристики, присвоенные КЭ в соответствии с нормативом¹ для расчета в SCAD+, представлены в табл. 1, 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выявления основных зависимостей деформаций и напряжений от изменения толщины в продольном и поперечном направлениях были построены модели пятислойных плит из ДПК с различной толщиной продольных слоев (1, 3, 5), составляющих 9, 12, 18, 25,

¹ СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции.

Табл. 1. Упругие характеристики ортотропных элементов в продольном направлении

Table 1. Elastic characteristics of orthotropic elements in the longitudinal direction

Модуль упругости, Т/м ² / Modulus of elasticity, T/m ²					
E_x		E_y		E_z	
40 789		1 019 716		40 789	
Модуль сдвига, Т/м ² / Shear modulus, T/m ²					
G_{xy}		G_{xz}		G_{yz}	
50 986		50 986		50 986	
Коэффициент Пуассона / Poisson's ratio					
ν_{xy}	ν_{yx}	ν_{xz}	ν_{zx}	ν_{yz}	ν_{zy}
0,45	0,018	0,45	0,018	0,018	0,018

Табл. 2. Упругие характеристики ортотропных элементов в поперечном направлении

Table 2. Elastic characteristics of orthotropic elements in the transverse direction

Модуль упругости, Т/м ² / Modulus of elasticity, T/m ²					
E_x		E_y		E_z	
1 019 716		40 789		40 789	
Модуль сдвига, Т/м ² / Shear modulus, T/m ²					
G_{xy}		G_{xz}		G_{yz}	
50 986		50 986		50 986	
Коэффициент Пуассона / Poisson's ratio					
ν_{xy}	ν_{yx}	ν_{xz}	ν_{zx}	ν_{yz}	ν_{zy}
0,018	0,45	0,018	0,018	0,45	0,018

32 и 42 мм; и с различной толщиной поперечных слоев (2, 4), составляющих 9, 12, 18, 25, 32 и 42 мм.

По результатам проведенного линейного расчета моделей в ПК SCAD+ получены числовые значения деформаций узлов и напряжений в КЭ, отображены максимальные их значения для каждой плиты соответственно. Впоследствии данные систематизированы и внесены в табл. 3.

На основе полученных результатов построены линейные графики зависимостей вычисляемых параметров от толщины продольных слоев, отображенные на рис. 3–5.

Повторный расчет выполнен для моделей с изменяемой толщиной поперечных слоев. Полученные значения занесены в табл. 4, и построены графики (рис. 6–8).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам расчета при действии статической равномерно распределенной нагрузки выявлено, что:

- при уменьшении толщины досок в продольных слоях прогиб возрастает на ~84 %, а при уменьшении толщины досок в поперечных слоях — на ~39 %. Такая значительная разница указывает на то, что в плитах ДПК наибольшее влияние на жесткость конструкции оказывают продольные наружные слои;

Табл. 3. Пятислойная панель с продольным расположением досок в наружных слоях с варьируемой толщиной продольных слоев

Table 3. A five-layer CLT panel with longitudinal arrangement of boards in outer layers with variable thickness of longitudinal layers

Номер слоев Number layers	Толщина продольных слоев, мм Thickness of longitudinal layers, mm	Толщина поперечных слоев, мм Thickness of transverse layers, mm	u , мм / mm	N_{x^2} , кН/м ² kN/m ²	N_{y^2} , кН/м ² kN/m ²	N_{z^2} , кН/м ² kN/m ²	τ_{xy} , кН/м ² kN/m ²	τ_{xz} , кН/м ² kN/m ²	τ_{yz} , кН/м ² kN/m ²
1, 5	9	42	106,1	-219,2	-15 267,1	-265,2	-12,2	-20,9	-128,3
	12	42	72,3	-156,9	-11 008,3	-258,9	-10,1	-19,5	-132,7
	18	42	39,8	-94,2	-6705,8	-246,5	-7,8	-16,1	-137,9
	25	42	23,2	-59,9	-4346,2	-246,5	-7,8	-16,0	-138,5
	32	42	14,9	-48,5	-3075,2	-217,6	-6,2	-10,0	-135,1
	42	42	8,9	-44,6	-2058,6	-198,6	-6,0	-7,2	-127,2
2, 4	9	42	106,1	-77,2	-289,9	-168,3	-6,7	-3,9	-143,2
	12	42	72,3	-74,3	-209,3	-163,7	-5,7	-3,3	-135,3
	18	42	39,8	-68,2	-127,9	-155,4	-4,6	-3,5	-118,8
	25	42	23,2	-61,9	-83,4	-145,9	-3,9	-3,7	-100,3
	32	42	14,9	-56,1	-59,5	-136,3	-3,4	-3,6	-98,7
	42	42	8,9	-49,0	-40,4	-123,4	-2,8	-3,1	-93,7
3	9	42	106,1	-25,0	-361,5	-105,6	-2,0	-21,7	-130,1
	12	42	72,3	-23,4	-299,5	-99,7	-2,0	-19,1	-122,9
	18	42	39,8	-20,8	-216,6	-89,8	-1,9	-15,5	-110,1
	25	42	23,2	-18,3	-171,5	-80,4	-1,9	-12,6	-96,5
	32	42	14,9	-16,4	-144,6	-72,7	-1,8	-10,3	-84,5
	42	42	8,9	-14,3	-113,0	-63,9	-1,6	-8,0	-75,1

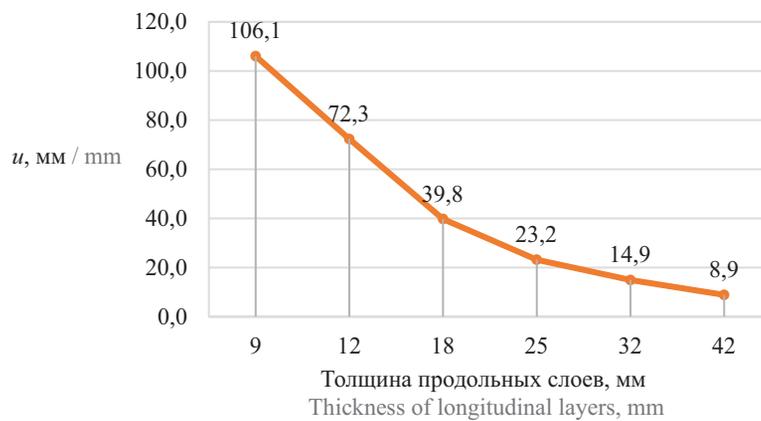


Рис. 3. Зависимость прогиба от толщины продольных слоев

Fig. 3. Dependence of deflection on thickness of longitudinal layers

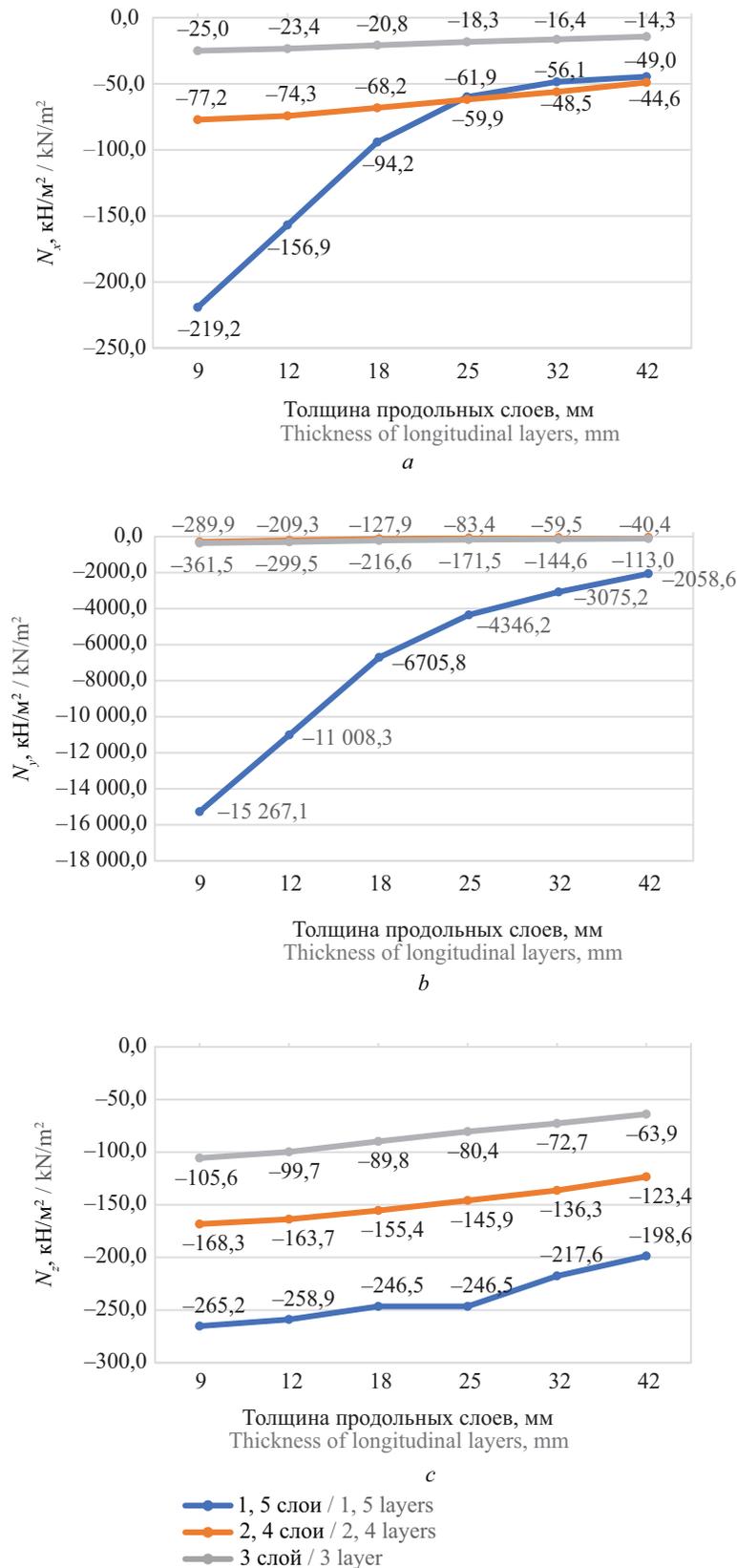


Рис. 4. Зависимость нормальных напряжений N_x , N_y , N_z от толщины продольных слоев

Fig. 4. Dependence of normal stresses N_x , N_y , N_z on thickness of longitudinal layers

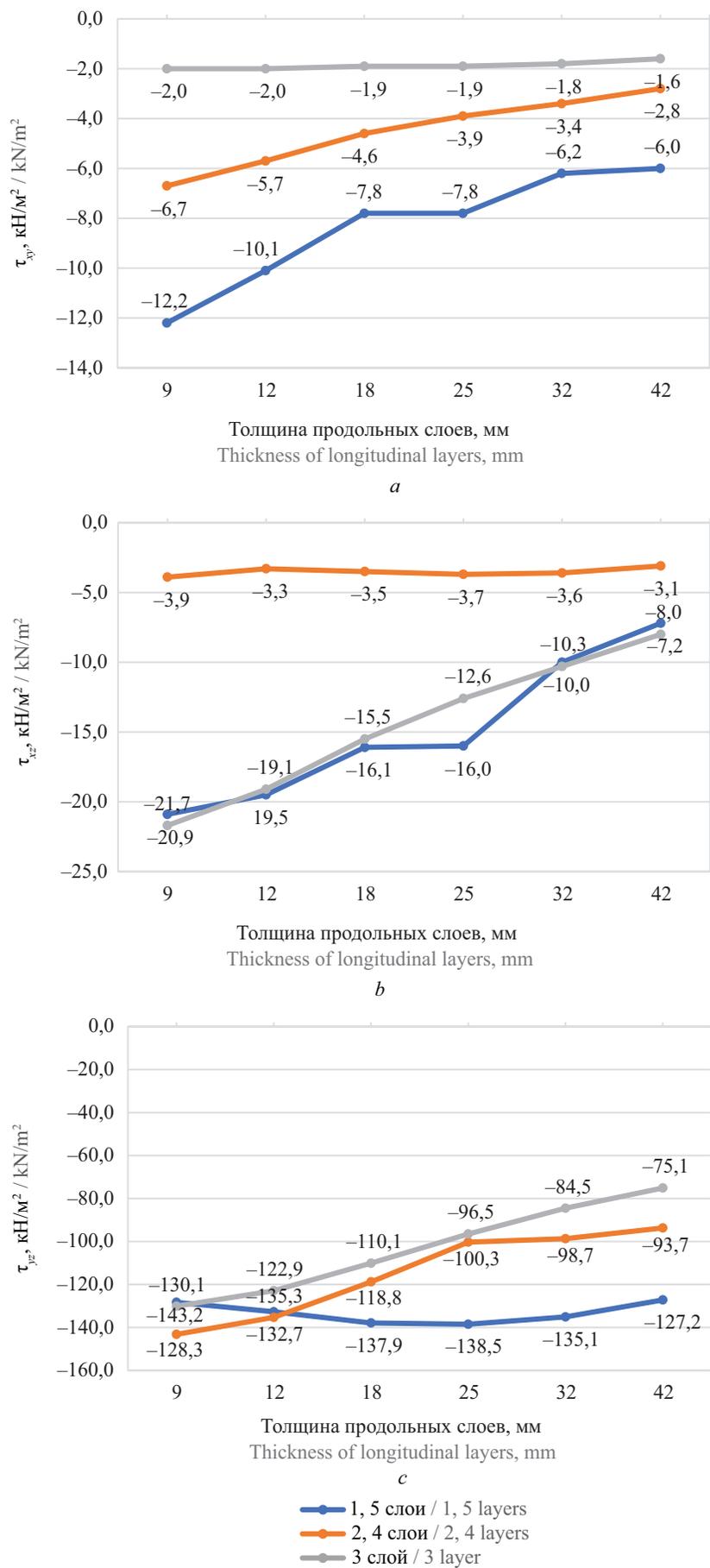


Рис. 5. Зависимость касательных напряжений τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} от толщины продольных слоев

Fig. 5. Dependence of tangential stresses τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} on thickness of longitudinal layers

Табл. 4. Пятислойная панель с продольным расположением досок в наружных слоях с варьируемой толщиной поперечных слоев

Table 4. A five-layer CLT-panel with longitudinal arrangement of boards in outer layers with varying thickness of transverse layers

Номер слоев Number layers	Толщина продольных слоев, мм Thickness of longitudinal layers, mm	Толщина поперечных слоев, мм Thickness of transverse layers, mm	u , мм mm	N_x , кН/м ² kN/m ²	N_y , кН/м ² kN/m ²	N_z , кН/м ² kN/m ²	τ_{xy} , кН/м ² kN/m ²	τ_{xz} , кН/м ² kN/m ²	τ_{yz} , кН/м ² kN/m ²
1, 5	42	9	22,9	-45,4	-3245,3	-208,0	-13,9	-8,2	-145,9
	42	12	20,6	-45,1	-3089,0	-205,5	-11,6	-8,4	-142,3
	42	18	16,9	-44,7	-2814,4	-202,4	-8,6	-8,5	-137,2
	42	25	13,7	-44,5	-2546,2	-200,4	-7,2	-8,1	-133,0
	42	32	11,3	-44,5	-2321,7	-199,3	-6,6	-7,7	-130,0
	42	42	8,9	-44,6	-2058,6	-198,6	-6,0	-7,2	-127,2
2, 4	42	9	22,9	-246,4	-61,6	-155,3	-7,6	-6,5	-135,6
	42	12	20,6	-199,0	-59,2	-150,5	-6,5	-5,1	-130,0
	42	18	16,9	-137,9	-54,6	-143,2	-4,9	-3,4	-120,1
	42	25	13,7	-96,3	-49,7	-136,6	-3,9	-3,2	-110,7
	42	32	11,3	-71,0	-45,4	-130,8	-3,3	-3,3	-102,8
	42	42	8,9	-49,0	-40,4	-123,4	-2,8	-3,1	-93,7
3	42	9	22,9	-18,0	-125,7	-89,2	-2,5	-15,2	-123,8
	42	12	20,6	-17,7	-123,8	-85,7	-2,3	-15,3	-116,1
	42	18	16,9	-17,1	-121,1	-79,8	-2,1	-14,1	-103,2
	42	25	13,7	-16,2	-118,6	-74,2	-1,9	-12,1	-91,2
	42	32	11,3	-15,4	-116,4	-69,5	-1,8	-10,2	-83,7
	42	42	8,9	-14,3	-113,0	-63,9	-1,6	-8,0	-75,1

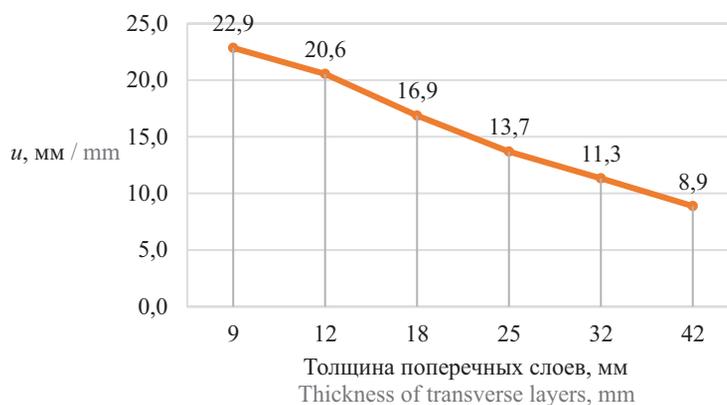


Рис. 6. Зависимость прогиба от толщины поперечных слоев

Fig. 6. Dependence of deflection on thickness of transverse layers

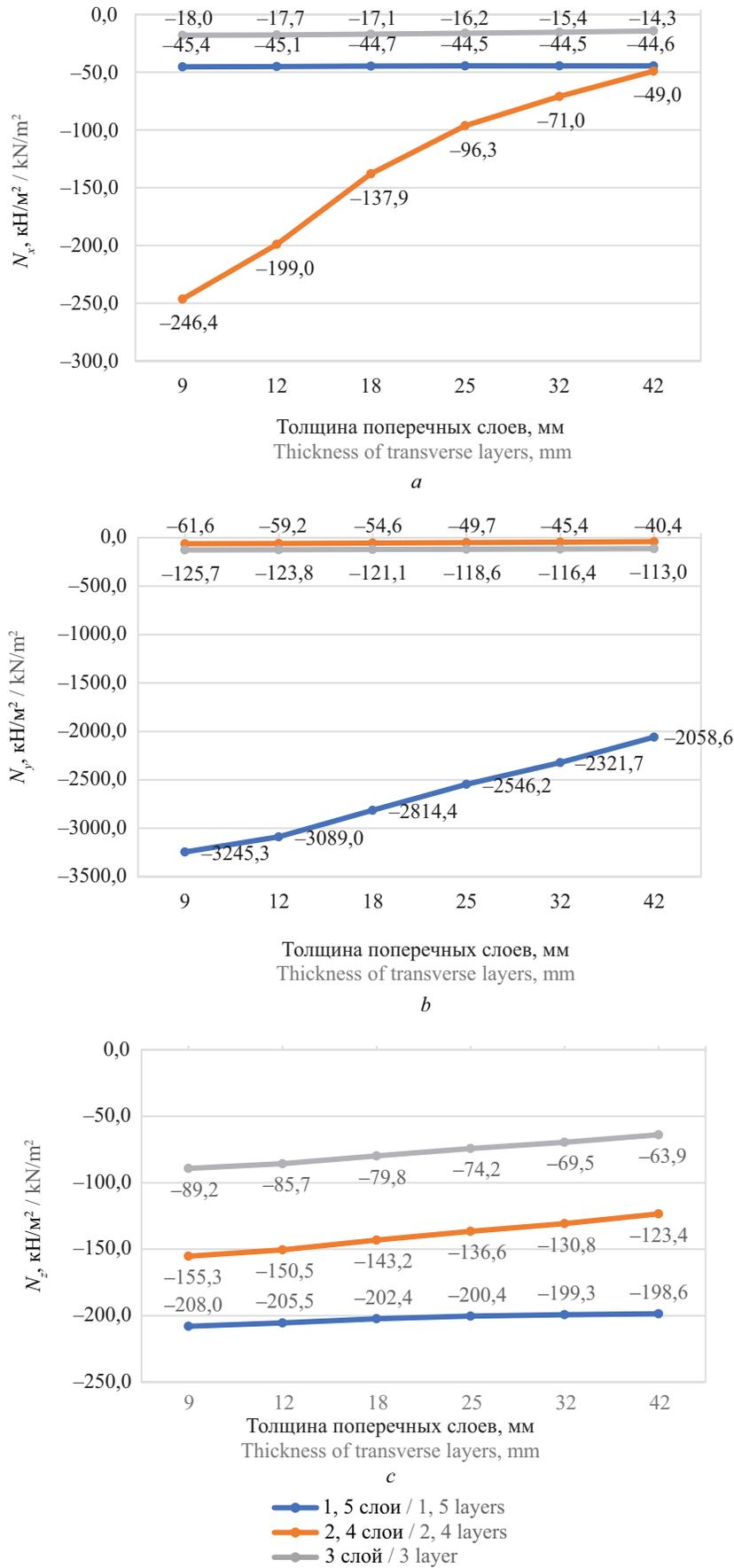


Рис. 7. Зависимость нормальных напряжений N_x , N_y , N_z от толщины поперечных слоев

Fig. 7. Dependence of normal stresses N_x , N_y , N_z on thickness of transverse layers

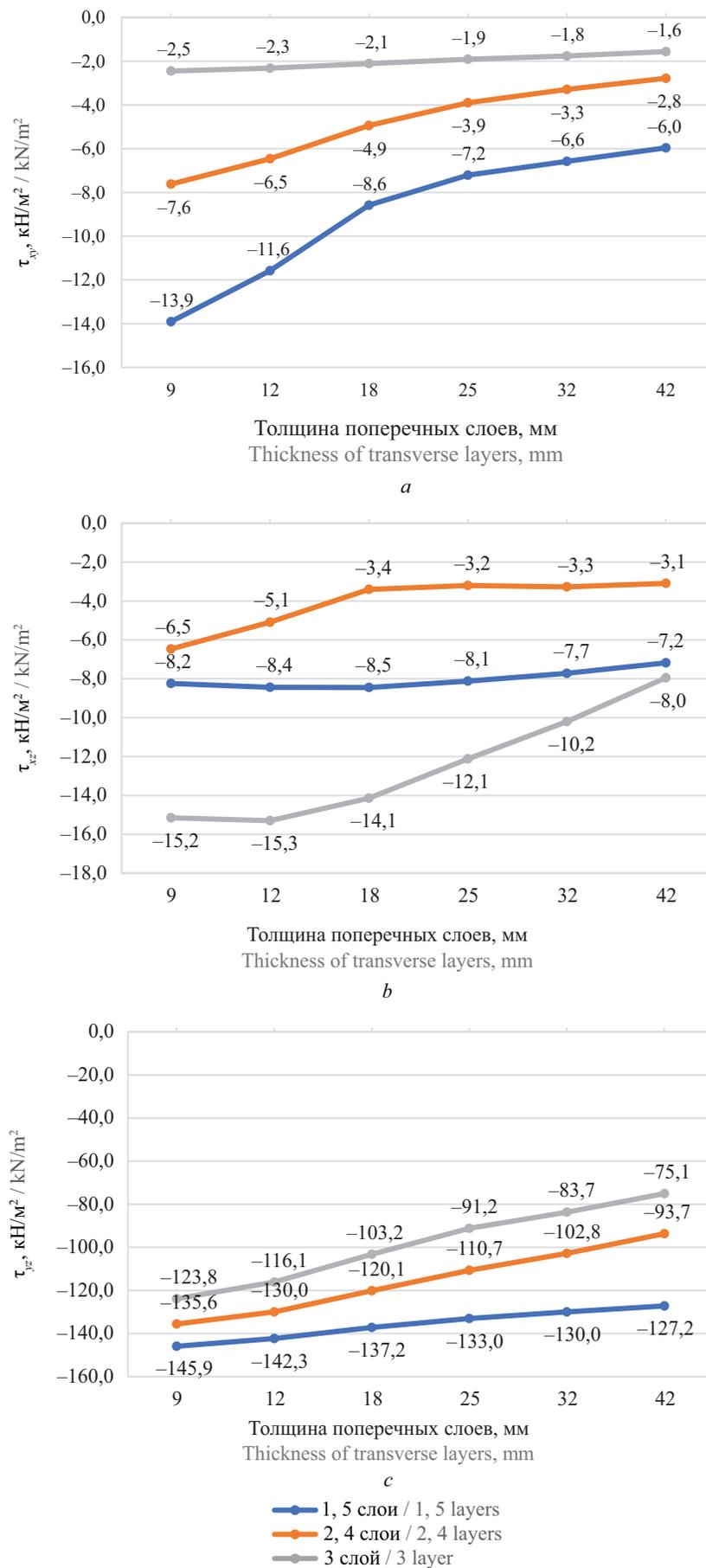


Рис. 8. Зависимость касательных напряжений τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} от толщины поперечных слоев

Fig. 8. Dependence of tangential stresses τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} on thickness of transverse layers

- по построенным графикам видно, что изменение толщины продольных и поперечных слоев оказывает существенное влияние на нормальные напряжения N_x в слоях 1, 5 и 2, 4 соответственно;
- при изменении толщины продольных и поперечных слоев нормальные напряжения N_z изменяются по одной закономерности и наибольшие значения возникают в слоях 1, 5, однако влияние

толщины продольных слоев на изменение этой величины сильнее, чем поперечных;

- изменение толщины продольного слоя досок оказывает существенное влияние на нормальные напряжения N_y в слоях 1, 5. При этом максимальное значение больше минимального более чем в 17 раз и возрастает с большой скоростью;
- в целом значения напряжений возрастают равномерно при уменьшении толщины досок.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Трошин М.Ю., Турков А.В. Влияние толщины поперечных и продольных слоев на деформативность и распределение напряжений в трехслойных плитах древесины перекрестно-клееной // Вестник МГСУ. 2023. Т. 18. № 3. С. 391–400. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.391-400

2. Shen Y., Schneider J., Stiemer S.F., Ren X. Failure Modes and Mechanical Properties of Bracket Anchor Connections for Cross-Laminated-Timber // MATEC Web of Conferences. 2019. Vol. 275. P. 01011. DOI: 10.1051/mateconf/201927501011

3. Sebera V., Muszyński L., Tippner J., Noyel M., Pisaneschi T., Sundberg B. FE analysis of CLT panel subjected to torsion and verified by DIC // Materials and Structures. 2013. Vol. 48. Pp. 451–459. DOI: 10.1617/s11527-013-0195-1

4. Huang Z., Huang D., Chui Y.-H., Shen Y., Daneshvar H., Sheng B. et al. Modeling of Cross-Laminated Timber (CLT) panels loaded with combined out-of-plane bending and compression // Engineering Structures. 2022. Vol. 250. P. 113335. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113335

5. Christovasilis I.P., Brunetti M., Follesa M., Nocetti M., Vassallo D. Evaluation of the Mechanical Properties of Cross Laminated Timber with Elementary Beam Theories // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 122. Pp. 202–213. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.082

6. Lu W., Gu J., Wang B. Study on Flexural Behavior of Cross-Laminated Timber Based on Different Tree Species // Advances in Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 2019. Pp. 1–8. DOI: 10.1155/2019/1728258

7. Opazo-Vega A., Benedetti F., Nuñez-Decap M., Maureira-Carsalade N., Oyarzo-Vera C. Non-Destructive Assessment of the Elastic Properties of Low-Grade CLT Panels // Forests. 2021. Vol. 12. P. 1734. DOI: 10.3390/f12121734

8. Gagnon S., Popovski M. Structural Design of Cross-Laminated Timber Elements. Chapter 3, CLT Handbook. FPInnovations. Québec, Canada, 2011.

9. Abejón R., Moya L. Cross-laminated timber: Perspectives from a bibliometric analysis (2006–2018) // Wood Material Science & Engin-

ering. 2021. Vol. 17. Issue 6. Pp. 429–450. DOI: 10.1080/17480272.2021.1955295

10. Юминова М.О., Крестьянникова А.Ю. Материалы и конструкции для строительства деревянных домов // Наука через призму времени. 2017. № 9. С. 42–51.

11. Смирнов П.Н., Филимонов М.А., Погорельцев А.А. Определение прочностных и упругих характеристик древесины перекрестно-клееной (ДПК/CLT) и классификация по классам прочности. М. : Научно-исследовательский центр «Строительство», 2020. 175 с. EDN NRPYJP.

12. Филимонов М.А., Смирнов П.Н., Погорельцев А.А. Проведение исследований по определению несущей способности стеновых панелей и плит перекрытия из древесины перекрестно-клееной (ДПК/CLT) и разработка методики расчета. М. : Научно-исследовательский центр «Строительство», 2020. 268 с. EDN NVQDYW.

13. Рогожина А.В. Расчет деформативности CLT-панели перекрытия // Инженерный вестник Дона. 2022. № 6. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_89_5_Rogozhina.pdf_10c4252bae.pdf

14. Филимонов М. А., Смирнов П.Н. Исследования прочностных и упругих характеристик плит из древесины перекрестно-клееной (ДПК/CLT) российского производства // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. № 2. С. 81–97. DOI: 10.37153/2618-9283-2022-2-81-97. EDN JEVVCF.

15. Мамедов Ш.М., Шабикина Е.Г., Нижегородцев Д.В., Казакевич Т.Н. Методика расчета панелей из перекрестно-клееной древесины // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 5 (82). С. 66–71. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-66-71. EDN BNFNZY.

16. Бубис А.А., Гизятуллин И.Р., Хворова А.Н., Петров И.Ю. Особенности поведения древесины перекрестно-клееной (ДПК/CLT) при статических и динамических нагрузках, моделирующих сейсмические воздействия // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2022. № 2. С. 62–80. DOI: 10.37153/2618-9283-2022-2-62-80. EDN QYZGKG.

17. Чебыкин А.А., Фрицлер Ю.А., Кудрявцев С.В. Определение расчетных характеристик сечений дре-

весных клееных плит из перекрестных досок // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2017. № 2. С. 83–85.

18. Змеев М.В. Определение толщины перекрытия из перекрестно-клееных досок на примере CLT-плит Binderholz (Austria) из условия жесткости // Инженерный вестник Дона. 2020. № 11. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_35_10_Zmeev.pdf_91b8606af3.pdf

19. Щелокова Т.Н. Современные тенденции улучшения свойств древесины и деревянных строительных конструкций // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 6. С. 39–45. DOI: 10.12737/article_5b115a65781d87.13857188. EDN XTRGIP.

20. Мавлюбердинов А.Р., Хоцянн Д.Н. Технологические особенности возведения многоэтажных жилых зданий из CLT-панелей // Известия КГАСУ. 2018. № 1 (43) С. 219–225. EDN UOVVCG.

Поступила в редакцию 23 июня 2023 г.

Принята в доработанном виде 26 июня 2023 г.

Одобрена для публикации 29 июля 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Михаил Юрьевич Трошин — аспирант; Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева (ОГУ им. И.С. Тургенева); 302030, Орловская область, г. Орел, Комсомольская ул., д. 95; mtr997@mail.ru;

Андрей Викторович Турков — доктор технических наук, доцент, профессор кафедры строительных конструкций и материалов; Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева (ОГУ им. И.С. Тургенева); 302030, Орловская область, г. Орел, Комсомольская ул., д. 95; РИНЦ ID: 543490, Scopus: 57193456012, ORCID: 0000-0003-1944-8529; aturkov@bk.ru.

Вклад авторов:

Трошин М.Ю. — сбор, анализ и обработка материала, написание статьи и оформление текста.

Турков А.В. — концепция, научное руководство.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Troshin M.Yu., Turkov A.V. The effect of thickness of transverse and longitudinal layers on deformability and stress distribution in three-layer panels made of cross-laminated timber. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2023; 18(3):391-400. DOI: 10.22227/1997-0935.2023.3.391-400 (rus.).

2. Shen Y., Schneider J., Stierner S.F., Ren X. Failure Modes and Mechanical Properties of Bracket Anchor Connections for Cross-Laminated-Timber. *MATEC Web of Conferences*. 2019; 275:01011. DOI: 10.1051/mateconf/201927501011

3. Sebera V., Muszyński L., Tippner J., Noyel M., Pisaneschi T., Sundberg B. FE analysis of CLT panel subjected to torsion and verified by DIC. *Materials and Structures*. 2013; 48:451-459. DOI: 10.1617/s11527-013-0195-1

4. Huang Z., Huang D., Chui Y.-H., Shen Y., Daneshvar H., Sheng B. et al. Modeling of Cross-Laminated Timber (CLT) panels loaded with combined out-of-plane bending and compression. *Engineering Structures*. 2022; 250:113335. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113335

5. Christovasilis I.P., Brunetti M., Follesa M., Nocetti M., Vassallo D. Evaluation of the Mechanical Properties of Cross Laminated Timber with Elementary Beam Theories. *Construction and Building Materials*. 2016; 122:202-213. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.082

6. Lu W., Gu J., Wang B. Study on Flexural Behavior of Cross-Laminated Timber Based on Different Tree Species. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2019; 2019:1-8. DOI: 10.1155/2019/1728258

7. Opazo-Vega A., Benedetti F., Nuñez-Decap M., Maureira-Carsalade N., Oyarzo-Vera C. Non-Destructive Assessment of the Elastic Properties of Low-Grade CLT Panels. *Forests*. 2021; 12:1734. DOI: 10.3390/f12121734

8. Gagnon S., Popovski M. *Structural Design of Cross-Laminated Timber Elements. Chapter 3, CLT Handbook. FPInnovations*. Québec, Canada, 2011.

9. Abejón R., Moya L. Cross-laminated timber: Perspectives from a bibliometric analysis (2006–2018). *Wood Material Science & Engineering*. 2021; 17(6):429-450. DOI: 10.1080/17480272.2021.1955295

10. Krestyanikova A.Yu., Yuminova M.O. Materials and structures for the construction of wooden houses. *Science through the prism of time*. 2017; 9:42-51. (rus.).

11. Smirnov P.N., Filimonov M.A., Pogoreltsev A.A. *Determination of the strength and elastic characteristics of cross-laminated wood (WPC/CLT) and classification by strength classes*. Moscow, Scientific Research Center “Construction”, 2020; 175. EDN NRPYJP. (rus.).

12. Filimonov M.A., Smirnov P.N., Pogoreltsev A.A. *Conducting research to determine the load-bearing capacity of wall panels and floor slabs made of cross-laminated wood (WPC/CLT) and developing a calculation meth-*

odology. Moscow, Scientific Research Center “Construction”, 2020; 268. EDN NVQDYW. (rus.).

13. Rogozhina A.V. Calculation of the deformability of the CLT overlap panel. *Engineering Journal of Don*. 2022; 6. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_89__5_Rogozhina.pdf_10c4252bae.pdf (rus.).

14. Filimonov M.A., Smirnov P.N. Research of strength and elastic characteristics of Russian-made cross laminated timber slabs. *Earthquake engineering. Construction safety*. 2022; 2:81-97. DOI: 10.37153/2618-9283-2022-2-81-97. EDN JEVVCF. (rus.).

15. Mamedov Sh.M., Shabikova E.G., Nizhegorodtsev D.V., Kazakevich T.N. Method for calculating cross laminated timber panels. *Bulletin of Civil Engineers*. 2020; 5(82):66-71. DOI: 10.23968/1999-5571-2020-17-5-66-71. EDN BNFNZY. (rus.).

16. Bubis A.A., Giziatullin I.R., Petrov I.Yu., Khvorova A.N. Peculiarities of behavior of cross-laminated timber (CLT) under static and dynamic loads simulating seismic impacts. *Earthquake engineering. Construction*

safety. 2022; 2:62-80 DOI: 10.37153/2618-9283-2022-2-62-80. EDN QYZGKG. (rus.).

17. Chebykin A.A., Fricler Yu.A., Kudryavcev S.V. Evaluation of cross section design properties for plates from cross laminated timber. *Academic Bulletin of Ural-NIIproekt RAASN*. 2017; 2:83-85. (rus.).

18. Zmeev M.V. Determination of the floor thickness of cross-glued boards on example of CLT-plates Binderholz (Austria). *Engineering Journal of Don*. 2020; 11. URL: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_35__10_Zmeev.pdf_91b8606af3.pdf (rus.).

19. Shchelokova T.N. Modern trends of improvement of wood properties and wood constructions. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018; 6:39-45. DOI: 10.12737/article_5b115a65781d87.13857188. EDN XTRGIP. (rus.).

20. Mavlyuberdinov A.R., Khotsanian D.N. Technological features of erecting multi-storey residential buildings from CLT-panels. *News of the KSUAE*. 2018; 1(43):219-225. EDN UOVVCG. (rus.).

Received June 23, 2023.

Adopted in revised form on June 26, 2023.

Approved for publication on July 29, 2023.

BIONOTES: **Mikhail Yu. Troshin** — postgraduate student; **Orel State University named after I.S. Turgenev (Orel State University)**; 95 Komsomolskaya st., Orel, 302030, Russian Federation; mtr997@mail.ru;

Andrej V. Turkov — Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Building Structures and Materials; **Orel State University named after I.S. Turgenev (Orel State University)**; 95 Komsomolskaya st., Orel, 302030, Russian Federation; ID RSCI: 543490, Scopus: 57193456012, ORCID: 0000-0003-1944-8529; aturkov@bk.ru.

Contribution of the authors:

Mikhail Yu. Troshin — collection, analysis and processing of material, writing an article and text design.

Andrej V. Turkov — concept, scientific guidance.

The authors declare that there is no conflict of interest.