

ИСПЫТАНИЯ СТАЛЬНОГО КРЕСТООБРАЗНОГО УЗЛОВОГО ЭЛЕМЕНТА ПРИ СДВИГЕ ФРАГМЕНТОВ
ДЕРЕВЯННЫХ ПЕРЕКРЕСТНОКЛЕЕННЫХ ПАНЕЛЕЙ

Научная статья

Васильев К.Ю.¹, Седалищев С.А.², Романов П.Г.^{3,*}

¹ ORCID : 0009-0009-3198-0682;

² ORCID : 0009-0002-6431-2794;

³ ORCID : 0000-0001-7744-592X;

^{1,2,3} Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (pg.romanov[at]mail.ru)

Аннотация

Строительство с применением деревянных перекрестно-склеенных панелей развивается во многих странах мира. В последние годы построены многоэтажные жилые и общественные здания. Здания из CLT (CLT – cross laminated timber, а в российских нормативных документах ДПК – древесина перекрестноклеенная), строятся и в сейсмически активных районах. Активное строительство с применением конструкций из перекрестно-склеенной древесины сопровождается разработкой новых типов и видов узлов соединений панелей и других конструкций с применением большого разнообразия соединительных элементов. Имеется солидный опыт разработки, испытаний, применения и классификации узлов соединений, обеспечивающих заданные эксплуатационные показатели прочности и надежности. В статье представлены результаты испытаний предлагаемого авторами стального крестообразного узла соединений CLT/ДПК панелей, воспринимающей в основном сдвигающие усилия.

Ключевые слова: деревянные перекрестно-склеенные панели, стальной крестообразный узел соединений CLT/ДПК панелей, результаты испытаний фрагментов деревянных панелей.

TESTS OF A STEEL CROSS-SHAPED NODAL ELEMENT DURING SHIFT OF FRAGMENTS OF WOODEN
CROSS-LAMINATED TIMBER

Research article

Vasiliev K.Y.¹, Sedalishev S.A.², Romanov P.G.^{3,*}

¹ ORCID : 0009-0009-3198-0682;

² ORCID : 0009-0002-6431-2794;

³ ORCID : 0000-0001-7744-592X;

^{1,2,3} Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov, Yakutsk, Russian Federation

* Corresponding author (pg.romanov[at]mail.ru)

Abstract

Construction with the use of wooden cross laminated timber is developing in many countries of the world. In recent years, multi-storey residential and public buildings have been constructed. Buildings made of CLT are also built in seismically active areas. Active construction with the use of cross-laminated timber structures is accompanied by the development of new types and kinds of joints of panels and other structures using a wide variety of connecting elements. There is a considerable experience in the development, testing, application and classification of connection units providing the specified operational indicators of strength and reliability. The article presents the results of tests of the authors' proposed steel cross-shaped CLT panel joint assembly, which mainly absorbs shift forces.

Keywords: wooden cross-laminated timber, steel cross-linked CLT panel joints, test results of wooden panel fragments.

Введение

Развитие конструкций из перекрестно-склеенной древесины (CLT – cross laminated timber), реализуется во множестве жилых и общественных зданий во многих странах мира.

В Европе, общий объем конструкций из перекрестно-склеенной древесины в 2022 году достиг 2,5 миллиона м³ [1]. Ожидается, что к 2032 году рынок достигнет 4,0 миллиона м³, демонстрируя темпы роста в 9,4% в течение 2024-2032 годов [2].

По последнему отчету IMARC Group под названием «Рынок кросс-ламинированной древесины: глобальные отраслевые тенденции, доля, размер, рост, возможности и прогноз на 2022-2027 годы», мировой рынок кросс-ламинированной древесины достиг объема 1 853 437 кубических метров в 2021 году. Эксперты считают, что мировой рынок к 2027 году достигнет 3 777 532 кубических метров [3].

Активное строительство с применением конструкций из перекрестно-склеенной древесины сопровождается разработкой новых типов и видов узлов соединений панелей и других конструкций с применением большого разнообразия соединительных элементов.

Методы и принципы исследования

Расширяется строительство из CLT/ДПК конструкций в Российской Федерации, разработаны новые и актуализированы действующие нормативные документы. В ряде новых ГОСТов термин «Древесина перекрестноклеенная, – ДПК» принят, и понимается как перевод и замена аббревиатуре CLT [4].

В данном направлении ведутся исследовательские работы по классификации узлов и соединений с применением ДПК-конструкций, обсуждаются проблемы подходов к стандартизации расчетов и связанные с ней вопросы.

Конструктивные формы узлов основываются на характеристиках напряженно-деформированного состояния сопротивления узла на различные внешние нагрузки. Принимаемые расчетные модели выделяют отдельные виды сопротивления, которые являются преобладающими в общей совокупности составляющих векторов силового поля. Пример базовой классификации узлов можно увидеть на рис. 1.

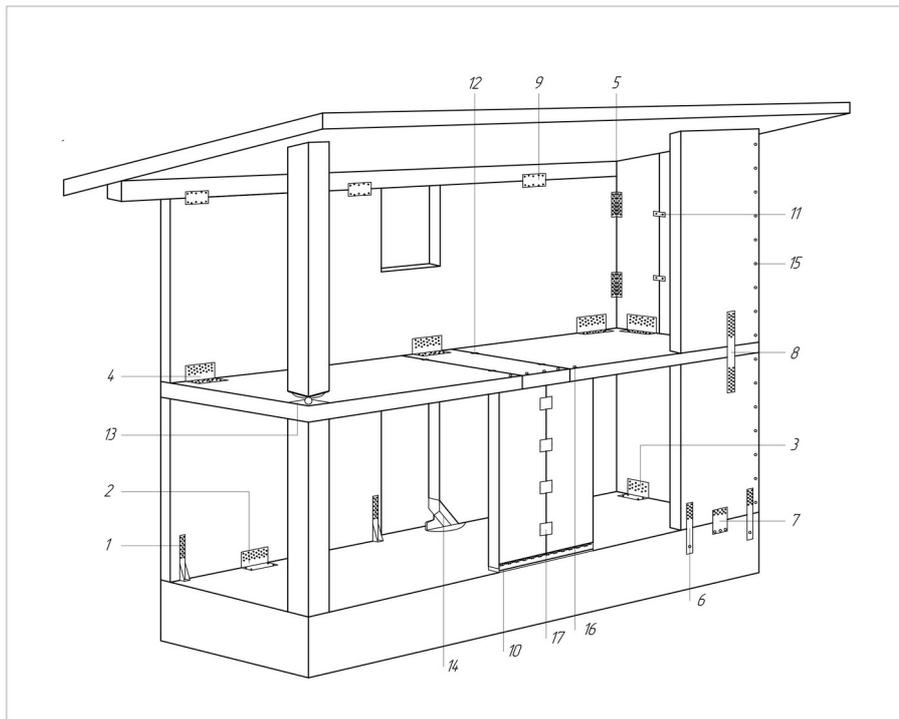


Рисунок 1 - Узловые соединения объёмно-планировочного решения здания с применением ДПК-панелей:
1 - уголок hold down WHT; 2 - угловой кронштейн TITAN N; 3 - уголок TITAN S с шайбой WASHER; 4 - угловой кронштейн TITAN V; 5 - угловой кронштейн TITAN F; 6 - пластина WHT PLATE C; 7 - пластина TITAN PLATE C; 8 - пластина WHT PLATE T; 9 - пластина TITAN PLATE T; 10 - профиль ALU START; 11, 12 - соединители для структурных панелей; 13 - система SPIDER/PILLAR; 14 - система X-RAD; 15 - винты HBS/TBS; 16 - винты VGZ; 17 - крестообразные узлы

Примечание: по ист. [5] с авторской переработкой

Анализ сопротивления узлов выявил необходимость разработки соединения панелей, воспринимающего сдвигающие усилия. Именно сдвигающие усилия являются основными при расчетной схеме работы и сопротивления соединения цельнообъемных панельных конструкций, например, в жилищном крупнопанельном строительстве.

Предложена конструкция стального крестообразного узла. Крестообразная форма сформирована из равнополочных уголков, угловая часть которых обрабатывается для достижения соосности полоч уголков при их соединении сваркой, рис. 2.

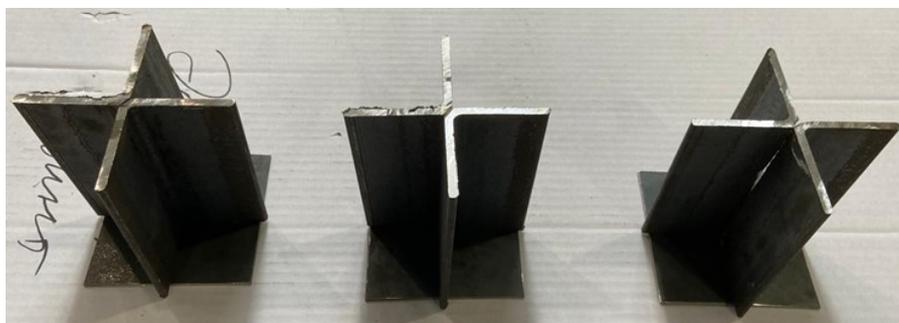


Рисунок 2 - Крестообразные узлы

Для узла использована прокатная сталь легированная, марки 09Г2С, класса прочности 345. Низколегированная сталь 09Г2С рекомендуется к применению в широком диапазоне температуры от -70°C до $+425^{\circ}\text{C}$, обладает хорошей свариваемостью.

Для испытаний выбрана модель определения зависимости «нагрузка-деформации», составленная из двух частей – фрагментов CLT/ДПК панелей с размерами 400×200×198 мм каждая, рис. 3. Всего испытано 3 узловых соединения, на прессе ИП-1250м-авто.



Рисунок 3 - Фрагменты CLT/ДПК панелей во время испытаний

Индикаторы часового типа ИЧ-50, с ходом стержня штока 50 мм, устанавливались на кронштейнах с обеих сторон испытуемых образцов. Пресс ИП-1250м-авто автоматически выводит на компьютер масштабированный график «нагрузка-деформации» в «кН-мм». Таким образом, при испытаниях имеется возможность получить три графика перемещений – два по индикаторам, и один – по показанию прессы. При начале нагружения зафиксировано наличие небольших начальных перемещений, обусловленных геометрическим несовершенством мест пропила в деревянных фрагментах панелей, в местах вставки крестообразных узлов.

Характерные графики деформирования узлов представлены на рис. 4. Образцы потеряли несущую способность при нагрузках 195, 205 и 175 кН соответственно.

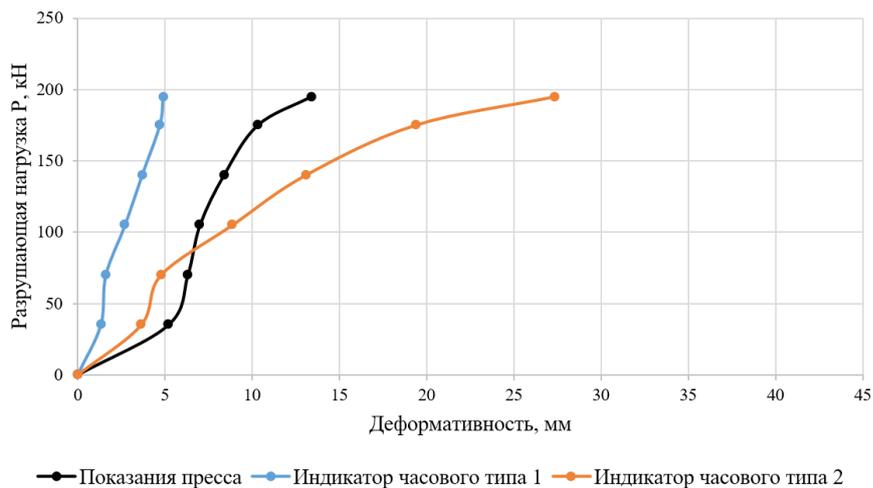


Рисунок 4 - Графики деформирования узла №1

Испытания показали, что деформация узла происходит пространственно, при приложении нагрузки из-за несимметричной формы стального узла обе части испытуемой модели поворачиваются один относительно другого. Деформация плоскостей крестообразного узла в основном происходит с их свободной стороны, сторона узла с приваренной пяткой (площадкой) сохраняет стабильность. Плоскость сдвига, под углом 30° к вертикали, устанавливает зависимость величины перемещения по плоскости, равную 0,866 от вертикального перемещения по показаниям прессы. Итоговые графики, показывающие зависимость вертикальных перемещений и перемещений по плоскости сдвига, представлены на рис. 5. В целом наличие такой зависимости определённо имеется, но для её описания требуется проведение дальнейших исследований.

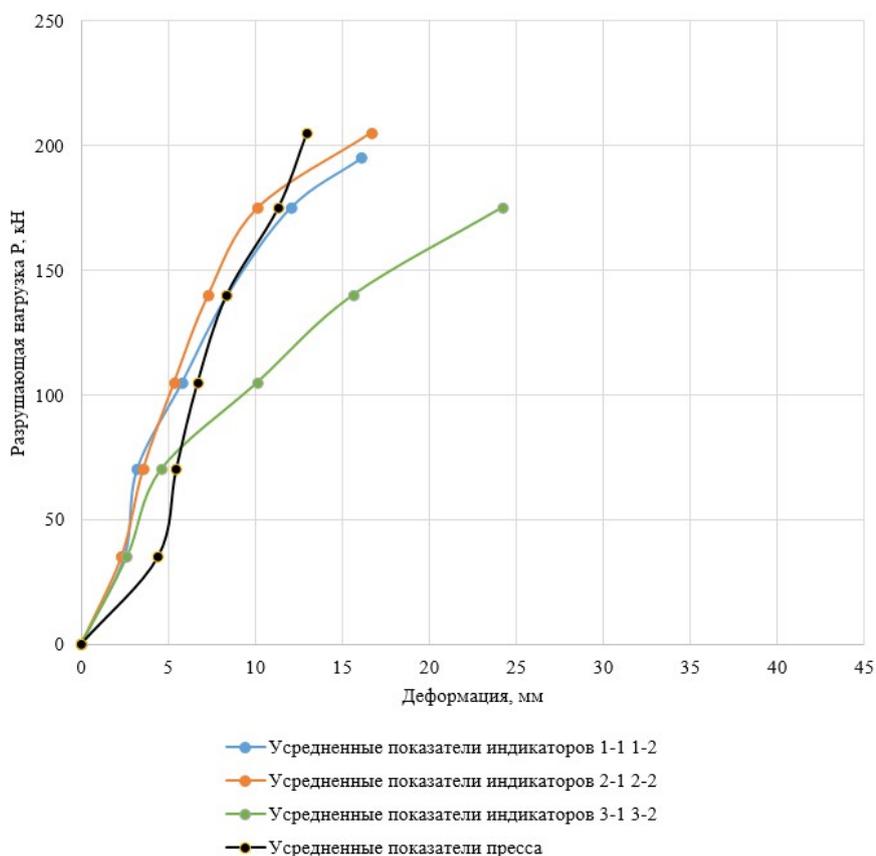


Рисунок 5 - Сопоставление вертикальных перемещений и деформаций сдвига.

Напряжения, возникающие на площадках опирания пластин стального узла, неравномерны, о чем свидетельствует эффект поворота частей испытуемой модели относительно друг друга. На фрагментах перекрестно склеенных панелей, в местах опирания пластин стального узла отсутствуют участки выраженного смятия вдоль волокон, возможно визуально зафиксировать участки местного вмятия, возникшие на последних этапах нагружения, при значительных деформациях пластин. По форме деформации пластин можно предположить, что площадка основного сопротивления перекрестно склеенной древесины имеет форму прямоугольного треугольника. Треугольная форма площадки сопротивления стального узла и перекрестно склеенной древесины обусловлена обушком стального равнополочного уголка (длинный катет) и сварного соединения к пятке узла (короткий катет). Отсюда определяем напряжение на площадке опирания от разрушающей нагрузки, допуская равномерное распределение нормальных напряжений сопротивления древесины под деформированной стальной пластиной узла, получаем 37,51 МПа, при среднем значении разрушающей нагрузки испытуемых узлов равно 191,67 кН.

Составляющая внешней нагрузки, действующая под углом 30° к вертикали, является сдвигающей силой, на действие которой испытываются узлы. Полученная средняя величина напряжения разрушения от сложного сжатия вдоль волокон согласуется со справочными данными предела прочности сосны при сжатии вдоль волокон малых чистых образцов, – 45,7 МПа, (таблица 3.1. «Показатели физико-механических свойств древесины различных регионов произрастания»), и – 46,3 МПа (таблица 4.1. Средние показатели основных физико-механических свойств древесины распространенных пород СССР...) [6]. Это обусловлено тем, что в CLT/ДПК конструкциях только часть волокон древесины образца натуральных размеров направлена вдоль направления нагружающей силы (продольно расположенные слои). Одновременно происходит сжатие древесины поперек волокон, (поперечно расположенных слоёв) прочность которой значительно меньше. Допускаем, что в этом случае нормальным напряжениям сопротивляются только продольные слои.

Пространственный поворот узла обусловлен тем, что на плоскости сдвига расположен только один узел в испытуемом фрагменте ДПК-панелей. При последовательном расположении 2-х и более узлов (см. элементы 17, рис. 1), эффект поворота будет исключен.

Из этих данных можно сделать вывод, что поперечные слои в перекрестно склеенной деревянной конструкции, состоящей всего из n нечетного количества слоев (например, 11 слоёв), оказывают значительный поддерживающий эффект, и повышают предел прочности на продольное сжатие, по сравнению с прочностью гипотетического образца, который состоял бы из $(n+1)2$ продольных (например, 6 продольно расположенных) слоёв. Данный эффект, названный «эффектом поддержки», был изучен ранее, эффект поддержки достигал 10%, (коэффициент $\theta = 0,1$) [7], [8], [9] и [10], [11], [12].

Полученные результаты могут быть использованы при разработке математической модели сопротивления стального крестообразного узла, работающего в сложном напряженно-деформированном состоянии при сдвиге ДПК-панелей.

Заключение

1. Стальной крестообразный узел показал достаточную прочность соединения на сдвиг с его применением.

2. Пространственный поворот узла обусловлен единичным расположением в испытуемом фрагменте ДПК-панелей. При последовательном расположении 2-х и более узлов эффект поворота будет исключен.

3. Требуется доработка узла, с расположением пятки (площадки) с двух сторон.

4. Математическая модель сопротивления стального крестообразного узла, работающего совместно с перекрестно склеенной древесиной, позволит визуализировать объемное сопротивление и усовершенствовать данный узел.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Wood products – production and trade // Eurostat. Statistics explained. — URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Wood_products_-_production_and_trade#Primary_wood_products (accessed: 02.05.2024).
2. The European cross-laminated timber market report // IMARC. — URL: <https://www.imarcgroup.com/european-cross-laminated-timber-market> (accessed: 02.05.2024).
3. The Cross-laminated timber market report // IMARC. — URL: <https://www.imarcgroup.com/cross-laminated-timber-manufacturing-plant> (accessed: 02.05.2024).
4. ГОСТ Р 56706-2015 «Плиты клееные из пиломатериалов с перекрестным расположением слоев. Технические условия». — Введ. 2015–11–13. — 2016. — 10 с.
5. Sandoli A. Sustainable Cross-Laminated Timber Structures in a Seismic Area: Overview and Future Trends / A. Sandoli, C. D'Ambra, C. Ceraldi [et al.]. — 2021. — № 11. — P. 2078.
6. Боровиков А.М. Справочник по древесине / А.М. Боровиков, Б.Н. Уголев. — М. : Лесн. пром-сть, 1989. — 296 с.
7. Argunov M. Comparative analysis of strength acting along fibers of the samples created from longitudinal and transverse glued pine wood / M. Argunov [et al.] // The 10th International science conference : Chip and chipless woodworking processes 2016. — Technical University in Zvolen, 2016. — P. 17–24.
8. Романов П.Г. Численное моделирование волновых проявлений сопротивления деревянного образца с идеализированной анизотропией упругих параметров / П.Г. Романов, П.В. Сивцев // Строительная механика и расчет сооружений. — 2020. — № 1. — С. 37–43.
9. Романов П.Г. Численный эксперимент по испытаниям на сдвиг перекрестно-склеенного деревянного элемента / П.Г. Романов, П.В. Сивцев // Строительная механика и расчет сооружений. — 2023. — № 1. DOI: 10.37538/0039-2383.2023.1.56.64
10. Romanov P.G. Numerical modeling of deformation of cross-glued pine wood samples / P.G. Romanov, P.V. Sivtsev // AIP Conference Proceedings 2528. — 2022. — 4 p. DOI: 10.1063/5.0106881
11. Romanov P.G. Visualization of deformation and stress waves in wooden solid and glued elements of building structures / P.G. Romanov, P.V. Sivtsev // National Research Nuclear University "MEPhI". — Scientific visualization, 2024. — Vol. 16. — № 1. — P. 95–104. DOI: 10.26583/св.16.1.08

Список литературы на английском языке / References in English

1. Wood products – production and trade // Eurostat. Statistics explained. — URL: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Wood_products_-_production_and_trade#Primary_wood_products (accessed: 02.05.2024).
2. The European cross-laminated timber market report // IMARC. — URL: <https://www.imarcgroup.com/european-cross-laminated-timber-market> (accessed: 02.05.2024).
3. The Cross-laminated timber market report // IMARC. — URL: <https://www.imarcgroup.com/cross-laminated-timber-manufacturing-plant> (accessed: 02.05.2024).
4. GOST R 56706-2015 «Plity kleenye iz pilomaterialov s perekrestnym raspolozheniem sloev. Tehnicheskie uslovija» [GOST R 56706-2015 "Glued slabs made of lumber with a cross arrangement of layers. Technical conditions"]. — Introduction. 2015–11–13. — 2016. — 10 p. [in Russian]
5. Sandoli A. Sustainable Cross-Laminated Timber Structures in a Seismic Area: Overview and Future Trends / A. Sandoli, C. D'Ambra, C. Ceraldi [et al.]. — 2021. — № 11. — P. 2078.
6. Borovikov A.M. Spravochnik po drevesine [Handbook of wood] / A.M. Borovikov, B.N. Ugolev. — M. : Forest Industry, 1989. — 296 p. [in Russian]
7. Argunov M. Comparative analysis of strength acting along fibers of the samples created from longitudinal and transverse glued pine wood / M. Argunov [et al.] // The 10th International science conference : Chip and chipless woodworking processes 2016. — Technical University in Zvolen, 2016. — P. 17–24.
8. Romanov P.G. Chislennoe modelirovanie volnovykh pojavlenij soprotivlenija derevjannogo obrazca s idealizirovannoj anizotropiej uprugih parametrov [Numerical modeling of wave manifestations of resistance of a wooden sample with idealized anisotropy of elastic parameters] / P.G. Romanov, P.V. Sivtsev // Stroitel'naja mehanika i raschet sooruzhenij [Construction mechanics and calculation of structures]. — 2020. — № 1. — P. 37–43. [in Russian]
9. Romanov P.G. Chislennyj jeksperiment po ispytaniyam na sdvig perekrestno-skleennogo derevjannogo jelementa [Numerical experiment on shear tests of a cross-glued wooden element] / P.G. Romanov, P.V. Sivtsev // Stroitel'naja mehanika i

raschet sooruzhenij [Construction mechanics and calculation of structures]. — 2023. — № 1. DOI: 10.37538/0039-2383.2023.1.56.64 [in Russian]

10. Romanov P.G. Numerical modeling of deformation of cross-glued pine wood samples / P.G. Romanov, P.V. Sivtsev // AIP Conference Proceedings 2528. — 2022. — 4 p. DOI: 10.1063/5.0106881

11. Romanov P.G. Visualization of deformation and stress waves in wooden solid and glued elements of building structures / P.G. Romanov, P.V. Sivtsev // National Research Nuclear University "MEPhI". — Scientific visualization, 2024. — Vol. 16. — № 1. — P. 95–104. DOI: 10.26583/cb.16.1.08