

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ / CONSTRUCTION STRUCTURES,
BUILDINGS AND STRUCTURES

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.56.3>

ОСОБЕННОСТИ СОПРОТИВЛЕНИЯ СТАЛЬНОГО КРЕСТООБРАЗНОГО УЗЛА ПРИ СДВИГЕ
ЦЕЛЬНОДЕРЕВЯННЫХ ФРАГМЕНТОВ БРУСЬЕВ

Научная статья

Романов П.Г.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0001-7744-592X;

¹ Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, Якутск, Российская Федерация

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

Аннотация

Сдвигающие усилия возникают при нагружении деревянных составных балок из брусьев в работе панельных конструкций с деревянным брусевым каркасом. Данная статья является дальнейшим развитием исследований сопротивления на сдвиг стального крестообразного узла новой формы, ранее исследованного при сдвиге фрагментов деревянных перекрёстноклееных панелей. Выявлены особенности сопротивления узлов новой формы, проанализирована деформативность соединений. Сопоставлены участки упругой и упруго-пластической работы испытанных соединений. Разработаны предложения по усовершенствованию стального крестообразного узла, исходя из предела прочности цельной древесины на продольное и поперечное сжатие. Численное моделирование сопротивления сдвигу соединения фрагментов деревянных брусьев со стальным крестообразным узлом дало возможность рассмотреть в широких пределах нагрузок и перемещений точек элементов. Подтверждено, что конструкция стального крестообразного узла должна иметь соотношение площадей сторон крестовины из уголков в пропорциях сопротивления древесины на сжатие вдоль волокон и сжатия поперек волокон.

Ключевые слова: стальной крестообразный узел, деревянные брусья, испытания на сдвиг.

FEATURES OF RESISTANCE OF STEEL CROSS JOINTS IN SHIFT OF ALL-WOOD BAR BEAMS

Research article

Romanov P.G.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0001-7744-592X;

¹ Northeastern Federal University named after M.K. Ammosov, Yakutsk, Russian Federation

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

Abstract

Shear forces occur during loading of timber composite joist beams in the performance of timber beam-framed panel structures. This article is a further development of the research on the shear resistance of a new shape steel cross beam joint, which was previously studied during shear loading of wooden cross-glued panel fragments. The resistance features of the new shape joints are identified, and the deformability of the joints is analysed. The areas of elastic and elastic-plastic performance of the tested joints have been compared. Suggestions for the improvement of the steel cross joint based on the strength of solid wood in longitudinal and transverse compression have been developed. Numerical modelling of the shear resistance of the connection of wooden beam fragments with a steel cross joint has made it possible to look at a wide range of loads and displacements of element points. It was confirmed that the design of the steel cross joint should have a ratio of the areas of the sides of the cross joint made of angles in the proportions of the resistance of wood to compression along the fibres and compression across them.

Keywords: steel cross joint, wooden beams, shear tests.

Введение

Сдвиг цельнодеревянных элементов является распространенной формой напряженно-деформированного состояния. Сдвигающие усилия характерны в сопротивлении деревянных составных балок из деревянных брусьев в работе панельных конструкций с деревянным брусевым каркасом. Для обеспечения пространственной устойчивости каркасных зданий также возникает необходимость восприятия сдвига с различным сочетанием других воздействий.

Сдвиг в элементах строительных конструкций как напряженно-деформированное состояние характеризуется следующими особенностями:

- сдвиг в чистом виде возникает и проявляется только в редких, частных случаях сопротивления. В большинстве случаев нагружения сдвиг действует одновременно с изгибом, отрывом, сжатием.

- сдвиг в значительной степени подвержен масштабному эффекту – при удалении от точки приложения сдвигающего усилия происходит перераспределение характера внутренних усилий, сдвигающие усилия постепенно переходят в сжатие, градиент касательных напряжений уменьшается. В некоторых частях объема нагружаемого тела могут преобладать внутренние силы, обусловленные крутящими моментами и векторами усилий, составляющих действующий в рассматриваемом элементарном единичном объеме тела крутящий момент.

Методы и принципы исследования

Проведены испытания на сдвиг цельнодеревянных фрагментов брусьев сечением 150×150 мм (Рис. 1а). Силовым конструктивным элементом, воспринимающим сдвиг, принят стальной (низколегированная сталь 09Г2С) крестообразный узел, имеющий с двух сторон стальные пластины толщиной 3 мм, – так называемые «пятки» (Рис. 1б.).

Цель испытаний – выявление особенностей сопротивления стального крестообразного узла при сдвиге цельнодеревянных фрагментов брусьев.

Задачи при изучении процесса сдвига цельнодеревянных фрагментов брусьев натуральных размеров заключаются:

- в выявлении объёмного напряженно-деформированного состояния при статическом приложении сдвигающего усилия;
- в описании процесса изменения объёмного напряженно-деформированного состояния при объёмном деформировании стального крестообразного узла при возрастании сдвигающего усилия;
- в визуализации процесса распространения волн деформаций на поверхности и в объёме деревянных брусьев;
- в выявлении объёмных зон с максимальными градиентами напряжений и деформаций в испытываемой численной модели;
- описать проявление анизотропии в объёме цельнодеревянных элементов, и/или в рассматриваемом элементарном единичном объёме тела;
- в формировании гипотезы по разработке конструктивной формы (расчетной схемы работы, формы, размеров и вида материалов) узлов соединений деревянных брусьев между собой и элементами каркаса здания;
- в описании разницы работы характера сдвига цельнодеревянных брусьев и фрагментов деревянных перекрёстноклееных панелей.

Разработаны испытываемые узлы, состоящие из двух фрагментов цельнодеревянных брусьев, соединенных в свою очередь стальным крестообразным узлом из приваренных друг к другу прокатных уголков с шириной полок 75 мм. Исходя из ширины брусьев, длина стального крестообразного узла принята равной 150 мм, уголки приварены сварным швом высотой по 4 мм, со сдвигом относительно друг друга, чтобы поверхности уголков располагались на одной плоскости сдвига.

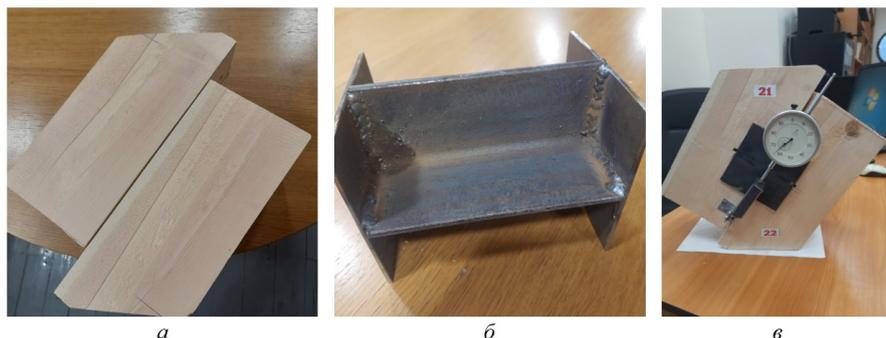


Рисунок 1 - Испытуемое на сдвиг соединение фрагментов цельнодеревянных брусьев:

а – фрагменты брусьев; б – стальной крестообразный узел с пятками с двух сторон; в – соединение перед испытанием
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.56.3.1>

Ранее были проведены испытания на сдвиг фрагментов деревянных перекрёстноклееных панелей [1]. Испытания на сдвиг цельнодеревянных фрагментов брусьев проведены по аналогичной расчетной схеме. Работа древесины цельной и перекрёстноклееной (ДПК), с выявлением изменений объёмного напряженно-деформированного состояния изложены в [2], [4], [5], [6]. Существенным отличием примененного стального крестообразного узла является то, что в данном случае стальной узел имеет пластины с обеих сторон. Наличие пластин (пяток) исключает поворот узла в плоскости сдвига, обеспечивает более стабильное сопротивление, более равномерное деформирование соединения в целом. Конструктивная форма пластинчатого крестообразного стального узла позволяет сопоставить его пространственное сопротивление с работой узлов с клеевинченными и винченными стержневыми элементами [9], [10].

Испытания проведены на прессе ИП-1250м-авто. Использовались индикаторы часового типа ИЧ-50 с ходом штока 50 мм, установленные с двух сторон. Характерный график «нагрузки-деформации» представлен на Рис 2.

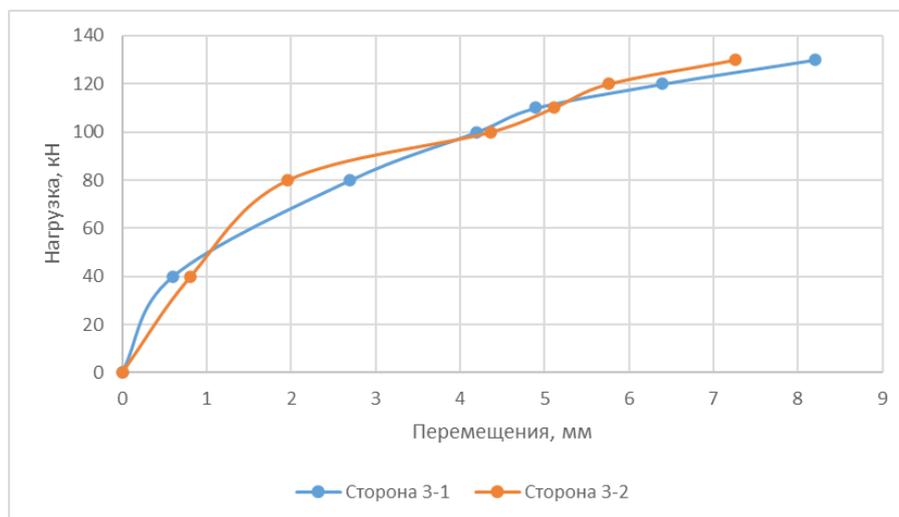


Рисунок 2 - Деформирование узловое соединения при сдвиге, образец 3
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.56.3.2>

При нагружении образцов, после определенного этапа начальной стадии восприятия нагрузки, начинается сопротивление сдвигу, определяемое совместной работой стального крестообразного узла и деревянных брусьев.

График на Рис. 3. показывает, что пятки стального узла обеспечивают стабильное равномерное деформирование, исключают поворот узла в плоскости сдвига. При этом происходит вращение узла вокруг его продольной оси, за счет двух факторов:

1. За счет деформирования древесины, вмятия уголков в цельную древесину. Процесс вмятия происходит поперек волокон, в направлении, в котором деформативность древесины высока. Вдоль волокон древесины, в направлении с низкой деформативностью древесины, перемещения точек на границе контакта «сталь-древесина» существенно меньше, чем в направлении поперек волокон.

2. За счет деформирования уголков. Плоскости крестообразного узла ограничены с двух сторон пятками, и сварным соединением с другим уголком. Свободные края плоскости узла, представляющие собой края уголка, претерпевают значительные деформации. Плоскость уголков, лежащая в плоскости сдвига, деформируется, образуя форму, ограниченную с трех сторон. Свободный край деформированного уголка представляет собой кривую (Рис. 3).

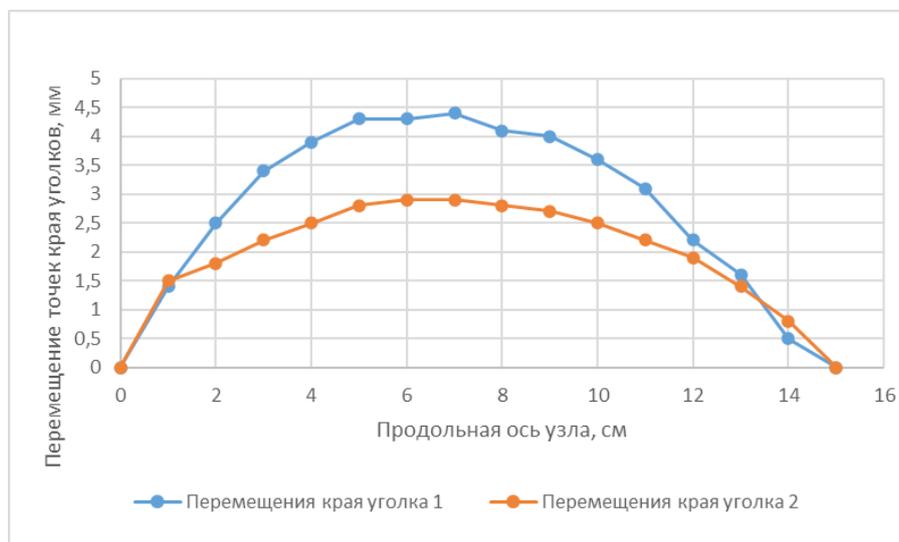


Рисунок 3 - Деформирование края линии уголков, образец 2
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.56.3.3>

Сопротивление стального крестообразного узла характеризуется неравномерностью деформаций взаимно перпендикулярных плоскостей, составленных из уголков. Данное обстоятельство вызвано тем, что предел прочности на сжатие древесины вдоль и поперек волокон значительно, до 10 раз, отличаются [7, С. 165], что подтверждается результатами деформирования краев уголков в плоскости сдвига и перпендикулярно плоскости сдвига (Рис. 4).

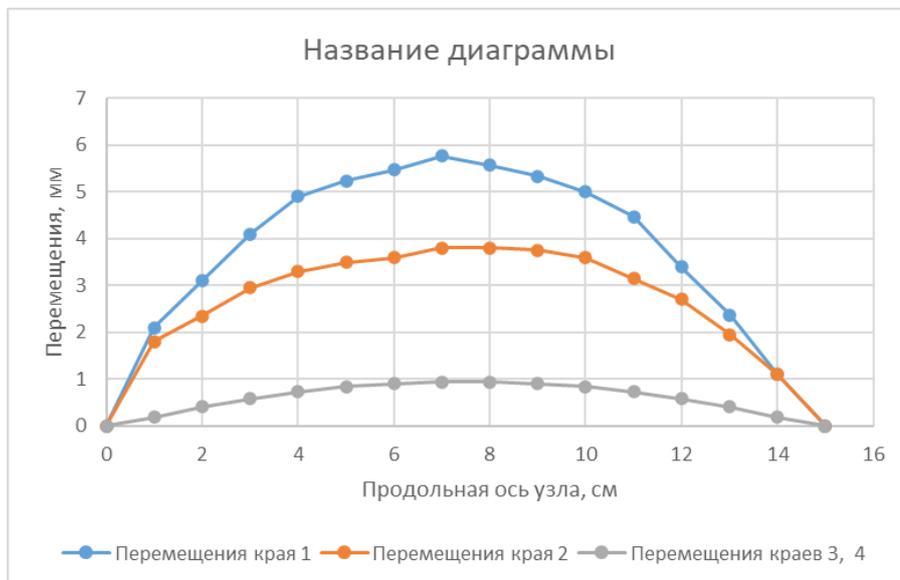


Рисунок 4 - Сопоставление усредненных перемещений краев в плоскости сдвига – 1, 2 и перпендикулярно плоскости сдвига – 3, 4

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.56.3.4>

Особенностью сопротивления сдвигу исследуемого типа соединений является то, что в направлении поперек волокон в сдвигаемых один относительно другого фрагментах брусьев вмятие стальных уголков в древесину происходит с неравной величиной. Максимальное значение продольного вмятия в древесину в зоне контакта «металл-древесина» у краев брусьев равно 0,9 мм, тогда как вмятие поперек волокон древесины достигает 5,7 мм. Соотношение можно принять 1:6.

Разрушение испытанных трех соединений произошло при нагрузках 80, 120 и 130 кН соответственно. Сдвиг реализован в форме скалывания вдоль волокон, в большей степени происходит по ранней древесине годичных слоёв, обладающих наименьшим сопротивлением продольному скалыванию (Рис. 5). При нагружении соединения в его начальном этапе наблюдается упругое сопротивление, затем наступает сравнительно длительное упруго-пластическое деформирование (Рис. 2). Разрушение происходит за весьма короткое время, поверхность сдвига формируется в сложную форму из множества площадок скалывания с выраженным присутствием локальных площадок сдвига по форме годичных слоёв (Рис.6).

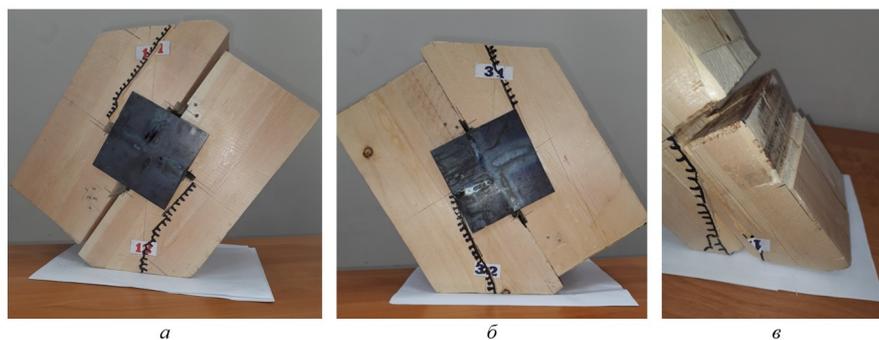


Рисунок 5 - Разрушение соединений:

а, б – проявление сдвига на фрагментах деревянных брусьев; в – вмятие уголка в деревянный брус поперек волокон

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.56.3.5>

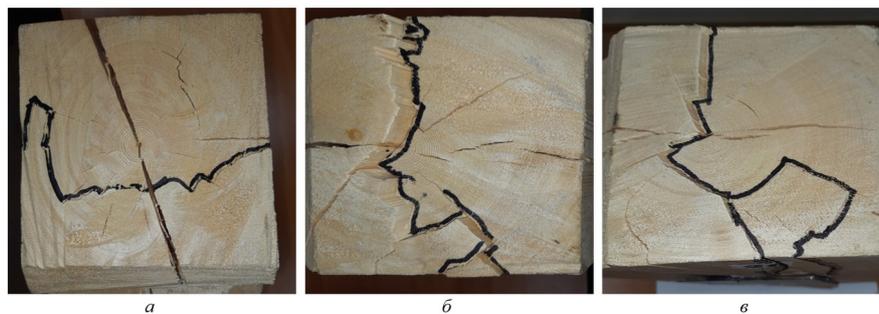


Рисунок 6 - Проявление сдвига на площадках нагружения фрагментов деревянных брусьев с выраженным влиянием годовичных слоев

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.56.3.6>

Из характера разрушения видно, что для достижения максимально возможного показателя сопротивления данного типа соединения соотношение площадей контактов «металл-древесина» должно быть таким же, как соотношение сопротивления древесины сжатию вдоль волокон и сжатию поперек волокон. В этом случае площадь поверхности уголков в плоскости сдвига будет до 10 раз больше, чем в плоскости, перпендикулярном сдвигу.

Численное моделирование сопротивления сдвигу соединения фрагментов деревянных брусьев со стальным крестообразным узлом дало возможность рассмотреть в широких пределах нагрузок и перемещений точек элементов. Для этих целей использован программный комплекс «Лира САПР 2016». Численная модель состоит из 112808 объёмных изотропных элементов, с 120998 узлами. Получены и рассмотрены т.н. графические «мозаики» нормальных напряжений по осям N_x , N_y , N_z , касательных напряжений T_{xz} , T_{yz} , T_{xy} , перемещений по осям X , Y и Z (Рис. 7).

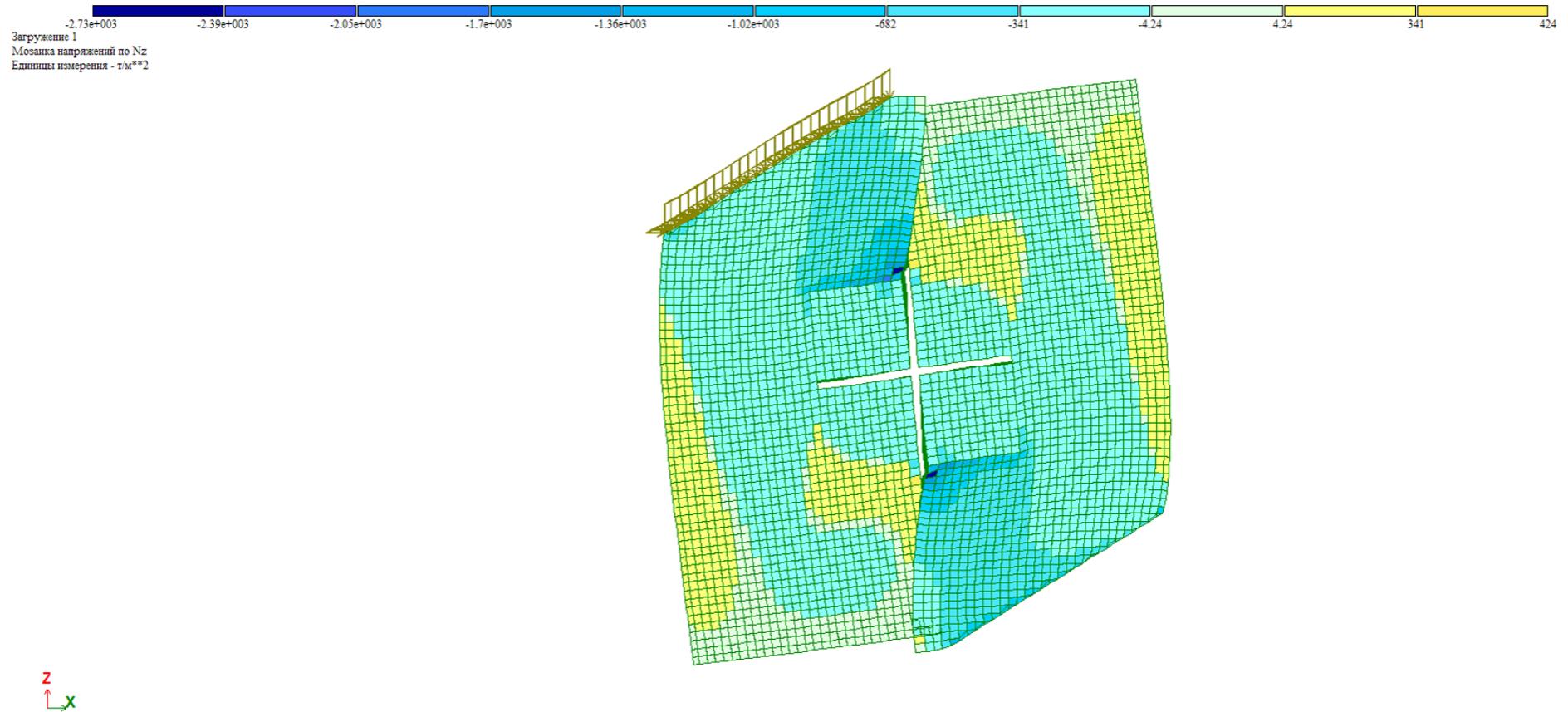


Рисунок 7 - Загружение 1. Мозаика напряжений по Nz. Ось Z – вертикальная
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2025.56.3.7>

Объёмное напряженно-деформированное состояние соединения в целом, и перемещения в зоне контакта «металл-древесина» подтверждают, что конструкция стального крестообразного узла должна иметь соотношение площадей сторон крестовины из уголков в пропорциях сопротивления древесины на сжатие вдоль волокон и сжатия поперек волокон.

Заключение

1. Наибольшие деформации (изгиб) стального крестообразного узла возникают в срединных зонах пластин уголков. Наибольшие деформации (поперечное сжатие) деревянных брусьев возникают в зонах ребер, прилегающих к пяткам. Продольное сжатие возникает в зоне, перпендикулярной к плоскости сдвига.

2. При испытаниях соединения в начальном этапе нагружения наблюдается упругое сопротивление, затем наступает сравнительно длительное упруго-пластическое деформирование. Поверхность разрушения от сдвига имеет в сложную форму, состоит из множества площадок скалывания с выраженным присутствием локальных площадок сдвига по форме годичных слоёв.

3. Получены визуальные картины распределения напряжений и деформаций стального крестообразного узла и деревянных брусьев и их изменения в процессе нагружения.

4. Объёмные зоны с максимальными градиентами напряжений и деформаций располагаются вдоль краев уголка, в глубине врезки в древесину, где и начинается разрушение от сдвига.

5. Анизотропия древесины явно проявляется формированием сложной формы поверхности сдвига (поверхности разрушения) из множества площадок скалывания с выраженным присутствием локальных площадок сдвига по форме годичных слоёв. Сдвиг по форме годичных слоёв происходит в толще ранней древесины годичных слоёв.

6. Для достижения максимально возможного показателя сопротивления данного типа соединения соотношение площадей контактов «металл-древесина» в плоскости сдвига, и перпендикулярно плоскости сдвига, должно быть таким же, как соотношение сопротивления древесины сжатию вдоль волокон и сжатию поперек волокон. В этом случае площадь поверхности уголков в плоскости сдвига будет до 10 раз больше, чем в плоскости, перпендикулярном сдвигу. В результате проведенных испытаний это соотношение можно принять равным 6.

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. Романов П.Г. Испытания стального крестообразного узлового элемента при сдвиге фрагментов деревянных перекрестноклееных панелей / П.Г. Романов, К.Ю. Васильев, С.А. Седалищев // Международный научно-исследовательский журнал. — 2024. — № 10 (148). — С. 1–6. — DOI: 10.60797/IRJ.2024.148.8.
2. Argunov M. Comparative analysis of strength acting along fibers of the samples created from longitudinal and transverse glued pine wood / M. Argunov [et al.]. — Zvolen: Technical University in Zvolen, 2016. — P. 17–24.
3. 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.
4. 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. — С. 56–64. — DOI: 10.37538/0039-2383.2023.1.56.64.
5. Romanov P.G. Numerical modeling of deformation of cross-glued pine wood samples / P.G. Romanov, P.V. Sivtsev. — Yekaterinburg: AIP Conference Proceedings, 2022. — Iss. 2528. — P. 4. — DOI: 10.1063/5.0106881.
6. Romanov P.G. Visualization of deformation and stress waves in wooden solid and glued elements of building structures / P.G. Romanov, P.V. Sivtsev // Scientific visualization. National Research Nuclear University "MEPhI". — 2024. — Vol. 16. — № 1. — P. 95–105. — DOI: 10.26583/св.16.1.08.
7. Боровиков А.М. Справочник по древесине / А.М. Боровиков, Б.Н. Уголев. — Москва: Лесн. пром-сть, 1989. — 296 с.
8. Рекомендации по испытанию соединений деревянных конструкций / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. — М.: Стройиздат, 1980. — 40 с.
9. Смирнов П.Н. Методика расчета и экспериментальные исследования стыка деревянных конструкций на клеевинтовых стержнях / П.Н. Смирнов // Строительная механика и расчет сооружений. — 2022. — № 2. — С. 71–78.
10. Салимуллин А.Р. Разработка и исследование узловых соединений древесины перекрестноклееной на винтах, в том числе для многоэтажных зданий / А.Р. Салимуллин, П.Н. Смирнов // Вестник НИЦ «Строительство». — 2022. — № 32 (1). — С. 53–64. — DOI: 10.37538/2224-9494-2022-1(32)-53-64.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Romanov P.G. Ispytaniya stal'nogo krestoobraznogo uzlovogo elementa pri sdvige fragmentov derevjannyh perekrestnokleennyh panelej [Tests Of A Steel Cross-Shaped Nodal Element During Shift Of Fragments Of Wooden Cross-Laminated Timber] / P.G. Romanov, K.Ju. Vasil'ev, S.A. Sedalischev // International Research Journal. — 2024. — № 10 (148). — P. 1–6. — DOI: 10.60797/IRJ.2024.148.8. [in Russian]
2. Argunov M. Comparative analysis of strength acting along fibers of the samples created from longitudinal and transverse glued pine wood / M. Argunov [et al.]. — Zvolen: Technical University in Zvolen, 2016. — P. 17–24.
3. Romanov P.G. Chislennoe modelirovanie volnovyh pojavlenij soprotivlenija derevjannogo obraztsa s idealizirovannoj anizotropiej uprugih parametrov [Numerical modelling of wave manifestations of resistance of a wooden specimen with idealized anisotropy of elastic parameters] / P.G. Romanov, P.V. Sivtsev // Structural Mechanics and Analysis of Constructions. — 2020. — № 1. — P. 37–43. [in Russian]
4. Romanov P.G. Chislennyj eksperiment po ispytaniyam na sdvig perekrestno-skleenogo derevjannogo elementa [Numerical experiment on shear testing of a cross-glued wooden element] / P.G. Romanov, P.V. Sivtsev // Structural Mechanics and Analysis of Constructions. — 2023. — № 1. — P. 56–64. — DOI: 10.37538/0039-2383.2023.1.56.64. [in Russian]
5. Romanov P.G. Numerical modeling of deformation of cross-glued pine wood samples / P.G. Romanov, P.V. Sivtsev. — Yekaterinburg: AIP Conference Proceedings, 2022. — Iss. 2528. — P. 4. — DOI: 10.1063/5.0106881.
6. Romanov P.G. Visualization of deformation and stress waves in wooden solid and glued elements of building structures / P.G. Romanov, P.V. Sivtsev // Scientific visualization. National Research Nuclear University "MEPhI". — 2024. — Vol. 16. — № 1. — P. 95–105. — DOI: 10.26583/cb.16.1.08.
7. Borovikov A.M. Spravochnik po drevesine [Handbook on wood] / A.M. Borovikov, B.N. Ugolev. — Moskva: Lesn. prom-st', 1989. — 296 p. [in Russian]
8. Rekomendacii po ispytaniyu soedinenij derevyannyh konstrukcij [Recommendations for testing joints of wooden structures] / CNIISK named after V.A. Kucherenko. — M.: Strojizdat, 1980. — 40 p. [in Russian]
9. Smirnov P.N. Metodika rascheta i eksperimental'nye issledovaniya styka derevjannyh konstruktsij na kleevintovyh sterzhnjah [Calculation methodology and experimental studies of the joint of wooden structures on glue-coated rods] / P.N. Smirnov // Structural Mechanics and Analysis of Constructions. — 2022. — № 2. — P. 71–78. [in Russian]
10. Salimullin A.R. Razrabotka i issledovanie uzlovyh soedinenij drevesiny perekrestnokleenoj na vintah, v tom chisle dlja mnogoetazhnyh zdanij [Development and research of knot joints of wood cross-glued on screws, including for multi-storey buildings] / A.R. Salimullin, P.N. Smirnov // Bulletin of the Scientific Research Center Construction. — 2022. — № 32 (1). — P. 53–64. — DOI: 10.37538/2224-9494-2022-1(32)-53-64. [in Russian]