

УДК 624.011

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-99-109

*Е.А. ЧАЙКИН,**Сибирский федеральный университет*

ИЗУЧЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛА СТРУКТУРНОЙ КОНСТРУКЦИИ НА ВКЛЕЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИНАХ

Аннотация. В рамках формообразования строительных конструкций для успешного применения конструкции полносборного здания замкнутого типа, узлы которого выполнены на основе болтового соединения стальных клеенных в деревянные стержни пластин, необходимо провести численные исследования всех элементов, входящих в конструкцию узла, определить его деформативность, предельные усилия в элементах при действующих нагрузках, сравнить полученные результаты с экспериментом.

На основе данного анализа можно сделать выводы о надежности принятых в узле решений, скорректировать характеристики податливости узлов в модели полносборного здания, определить границы области применения данного узла в структурных много-связных конструкциях или других конструкциях узлов деревянных стержней с соединительными элементами на клеенных стальных пластинах.

Ключевые слова: клеенные пластины, структурная конструкция, шарнирный узел, деревянные конструкции, численные исследования

Для цитирования: Чайкин Е.А. Изучение напряженно-деформированного состояния узла структурной конструкции на клеенных стальных пластинах // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 4. С. 99–109.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-99-109

*Е.А. CHAYKIN**Siberian Federal University*

STRESS-STRAIN STATE OF GLUED WOOD-TO-STEEL PLATE JOINT

Abstract. In terms of shaping of building structures, numerical calculations are required for the structural unit elements, deformability, limit forces under loads for a successful application of fully-prefabricated building structures of a closed type with glued wood-to-steel plate bolt joints. As a result, theoretical calculations are compared with the experimental data.

It is shown that the proposed decisions concerning the structural units are reliable. The yielding parameters of the structural units are corrected in the model of the fully-prefabricated building. The scope of application is determined for the units of multi-connected structures or structures with glued wood-to-steel plate joints.

Keywords: glued wood-to-steel plate, structure, flexible joint, wooden structures, numerical calculations

For citation: Chaikin E.A. Izuchenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya uzla strukturnoi konstruksii na vkleennykh stal'nykh plastinakh [Stress-strain state of glued wood-to-steel plate joint]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo

arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 4. Pp. 99–109.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-99-109

Структурные конструкции находят всё больше вариантов применения при строительстве современных зданий. В последнее время структуры охотно используются архитекторами и инженерами для спортивных залов, стадионов, культурных центров, аэровокзалов, промышленных зданий, гаражей и ангаров, в высокоширотном строительстве [1]. Такую популярность можно объяснить естественными преимуществами данных пространственных конструкций, которыми не обладают традиционные рамные и каркасные системы. Благодаря изготовлению укрупненных блоков на заводе можно значительно снизить трудоемкость и время монтажа на строительной площадке; многосвязность и статическая неопределенность наделяют конструкции повышенной стойкостью к деформациям, узловым нагрузкам и выключению отдельных элементов из работы. Как правило, пространственные структуры состоят из простых готовых типовых модулей с одинаковыми размерами, формами и узлами сопряжения. Из таких блоков на площадке могут быть легко собраны не только пролётные строения зданий, но также, в некоторых случаях, имеет смысл возводить всё здание из однотипных структурных блоков. Такие разработки уже проводились Н.П. Абовским [2] и В.В. Захарютой [3] в Сибирском федеральном университете (рис. 1).

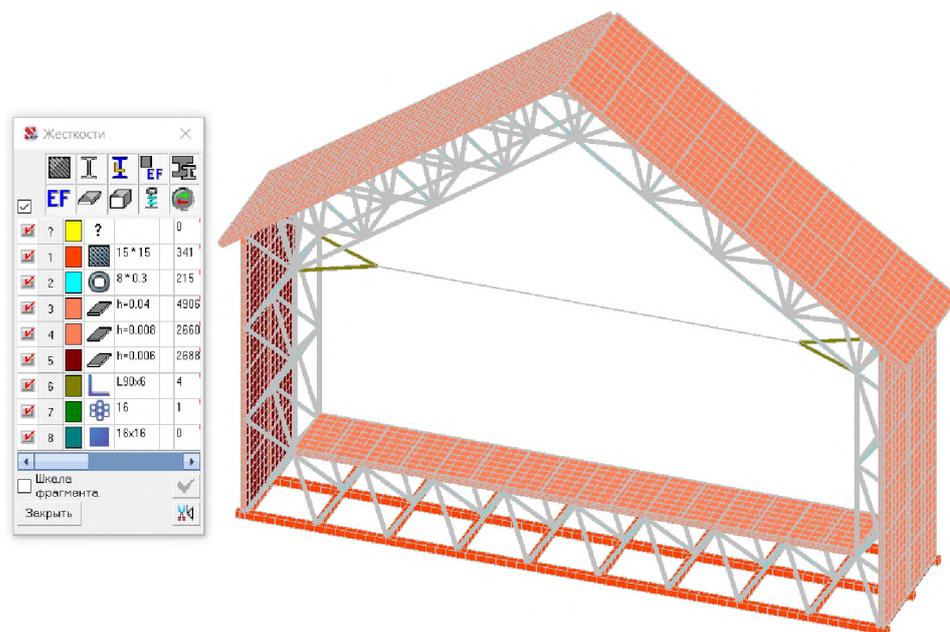


Рис. 1. Расчетная схема блока здания замкнутого типа

Выбор и конструирование узловых соединений элементов структурных конструкций является важнейшим этапом при разработке всей системы и от-

ражается не только на деформативности и надежности всей системы, но и на конечном коммерческом результате. Ошибки, допущенные при проектировании узлов, могут привести к чрезмерным тратам на их изготовление, к повышенной металлоемкости; усложнить сборку конструкции; привести к неправильной ее работе и образованию нежелательных начальных усилий и конечных деформаций; здание при эксплуатации может быть «зыбким». Поэтому столь важно рассматривать конструкцию узлового соединения комплексно, со всех позиций, в то же время детально прорабатывая каждый его элемент.

Многосвязевые структурные конструкции, и в особенности полносборные конструкции замкнутого типа, обладают способностью перераспределения усилий в элементах. В результате снижаются значения усилий в конструкции при возникновении дополнительных напряжений от таких факторов, как неточность изготовления элементов, податливость узловых соединений, неравномерность натяжения поясов, неравномерная осадка основания. Эти факторы должны быть учтены и проанализированы в процессе инженерного расчета.

В серии предварительных расчетов были проанализированы полносборные здания пролётами от 9 до 18 м с модулем от 0,5 до 1 м. При больших пролётах для обеспечения требуемой прочности и жесткости требуется увеличение модуля, что ведет к частичной потере устойчивости деревянных стержней и замене их на стальные элементы. При малых пролётах соотношение полезного объема здания к объёму конструкции получается низким, что влечет удорожание строительства и эксплуатации зданий. Среди разработанных структурных конструкций наиболее эффективна и интересна с точки зрения широкой области применения структура с пролётом 12 м и модулем 0,75 м. Примем эту конструкцию в качестве объекта изучения с помощью численных исследований ее напряженно-деформированного состояния (НДС). Структура рассчитана на восприятие нагрузок и воздействий, характерных для III снегового района (нормативная нагрузка 1,5 кПа), III ветрового района (нормативное ветровое давление 0,38 кПа) в соответствии с СП 20.13330.2016. В процессе изучения допускаются незначительные видоизменения конструкции для проведения комплексного анализа и поиска рациональных решений.

С целью изучения НДС структурной конструкции выполнены численные исследования фрагмента структуры и детально рассмотрено состояние наиболее нагруженного узла [4] сопряжения (рис. 2).

В процессе изучения напряженно-деформированного состояния узловых деталей, а именно болтов и соединительных пластин, был вырезан и смоделирован в программном комплексе SolidWorks узел, в котором при подавляющем большинстве расчетных схем, описанных выше, получались наиболее высокие значения усилий в элементах конструкции, – внутренний карнизный узел. В этом узле соединяются стержень нижнего пояса покрытия, внутренний вертикальный стеновой стержень, затяжка, два раскоса конструкции покрытия и четыре раскоса конструкции стены.

Вклеивание стальных элементов в узлах деревянных конструкций хорошо себя зарекомендовало и было описано в трудах многих авторов [5–8]. От глубины вклейки пластин в древесину и толщины пластины напрямую зависит несущая способность рассматриваемого узла. На основании опыта по

вклеиванию пластин [9–12] все стальные соединительные пластины заданы вклеенными на 7 см в стержневой деревянный элемент диаметром 10 см («карандаш»). Пластины заданы из стали марки Ст3пс толщиной 3 мм с диаметром отверстий 13 мм под болты М12 согласно [13]. Данные параметры позволяют достичь условия равнопрочности всех соединяемых элементов. Податливость в узле учитывается автоматически в процессе расчета за счет задания диаметра отверстий под болты больше номинального диаметра болта.

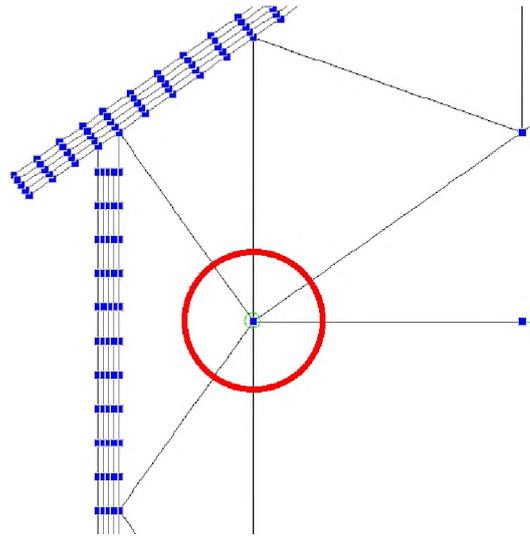


Рис. 2. Рассматриваемый узел конструкции

На все стержневые элементы приложены нагрузки, равные по значению усилиям, взятым с недеформированной расчетной схемы с плитами ограждения, включенными в работу конструкции, и затяжкой на отм. +3.790 (рис. 3), а именно:

1 – на элемент нижнего пояса покрытия	15,68 кН
2 – на элемент вертикальной стойки	–11,46 кН
3 – на раскос покрытия	–8,09 кН
4 – на верхний раскос стены	3,23 кН
5 – на нижний раскос стены	–5,9 кН
6 – на болт от затяжки	10,43 кН

Численный расчет, выполненный по методу конечных элементов на базе программного комплекса SolidWorks, предполагает проверку работы узловых элементов в недеформированной схеме, поэтому граничные условия были заданы типа «ползун» по цилиндрическим поверхностям деревянных стержней, сопряжение на контакте металл-клей-древесина жесткое, трение между пластинами в узле отсутствует. При этом были проанализированы основные факторы: суммарные напряжения в «карандашах» (рис. 4), суммарные напряжения в стальных пластинах (рис. 5, 6), перемещения узла под действием заданных нагрузок (рис. 7), запас прочности элементов узла (рис. 8).

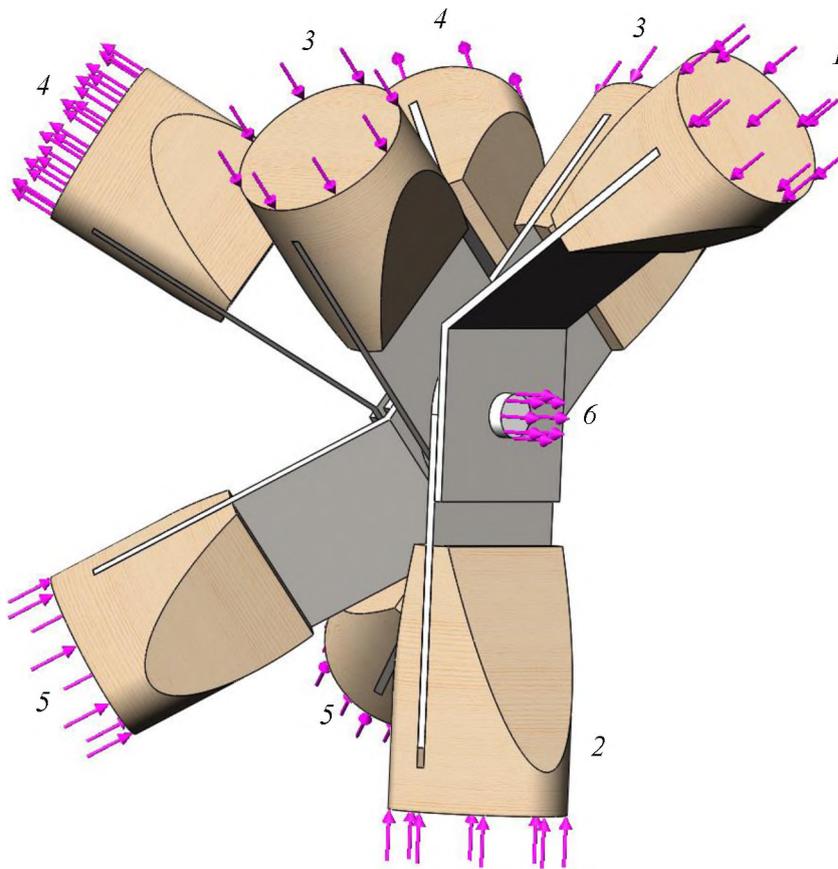


Рис. 3. Расчетная схема наиболее нагруженного узла конструкции:
 1 – на элемент нижнего пояса покрытия; 2 – на элемент вертикальной стойки; 3 – на раскос покрытия; 4 – на верхний раскос стены; 5 – на нижний раскос стены; 6 – на болт от затяжки

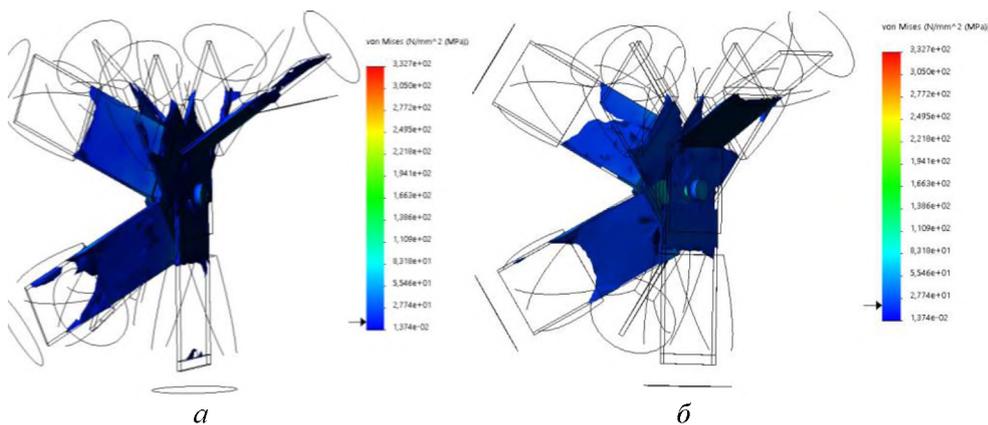


Рис. 4. Напряжения по Мизесу:
 а – $s < 10,5$ МПа; б – $s < 19,5$ МПа

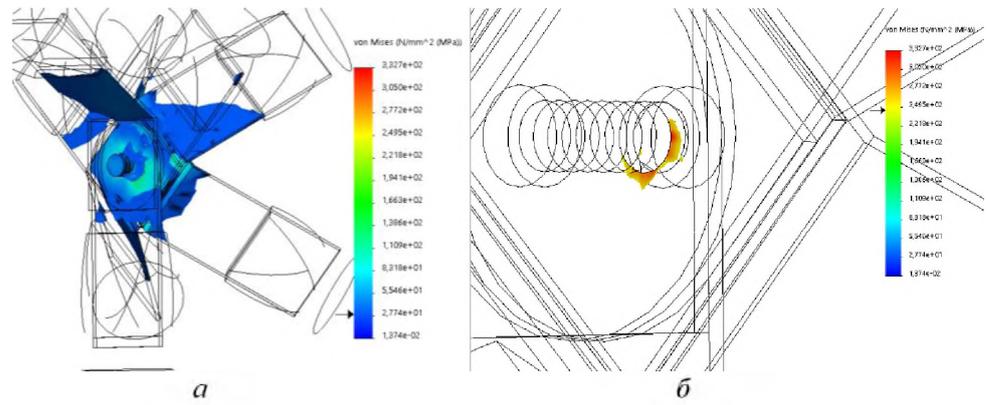


Рис. 5. Напряжения по Мизесу:
 $a - s \geq 30$ МПа; $b - s \geq 245$ МПа

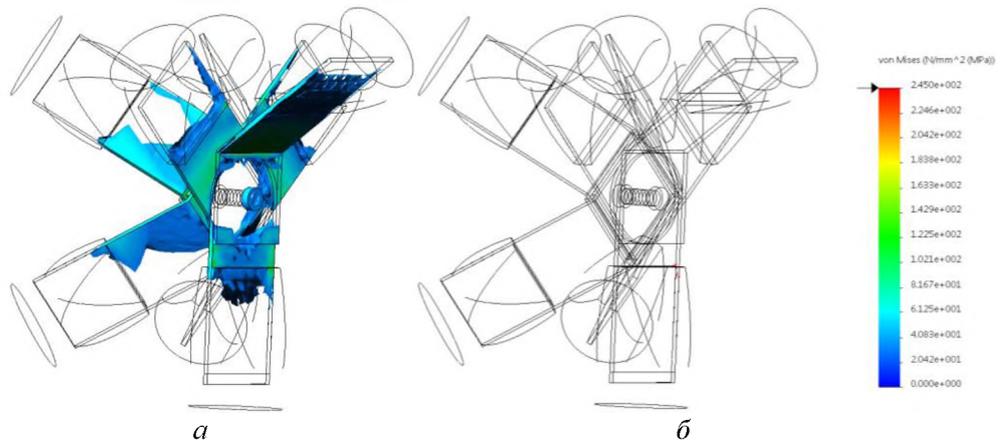


Рис. 6. Напряжения по Мизесу:
 $a - s \geq 30$ МПа; $b - s \geq 245$ МПа

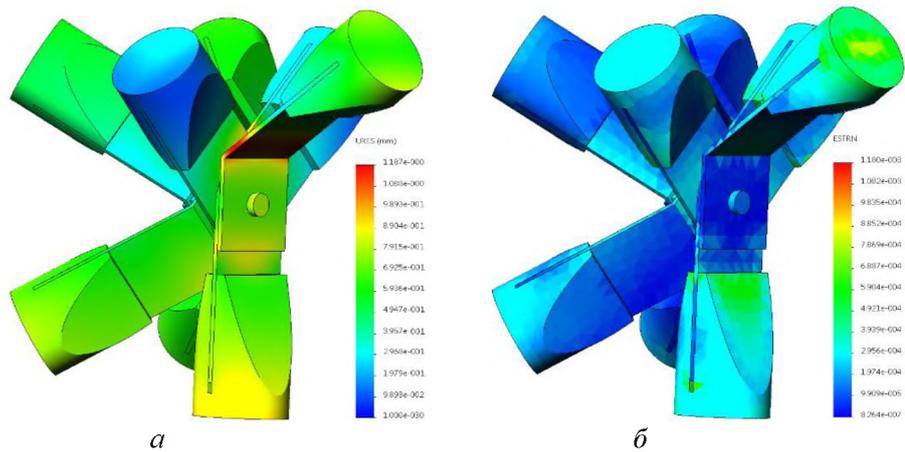


Рис. 7. Деформации в узле:
 $a -$ абсолютные, мм; $b -$ относительные

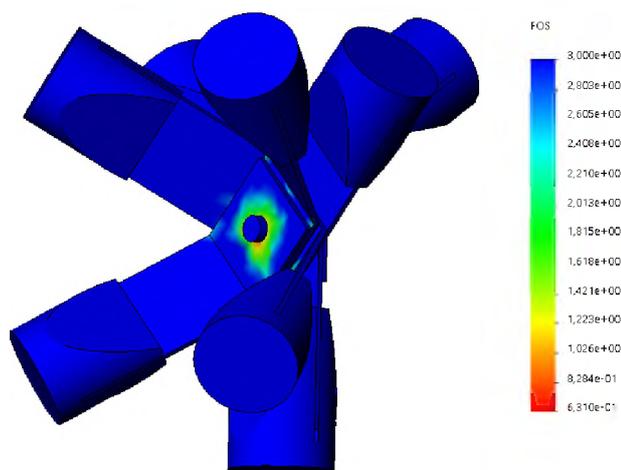


Рис. 8. Коэффициент запаса прочности

Наступление предельного состояния узла возможно либо при появлении пластических деформаций, либо при разрушении. При одноосном напряженном состоянии оценить момент появления деформаций текучести или момент разрушения можно, сопоставляя максимальное напряжение с пределом текучести или временным сопротивлением стали. В случае объемного напряженного состояния задача значительно усложняется. Необходимо установить уровень главных напряжений в элементе, при достижении которых произойдет переход от упругого состояния к предельному. Такой уровень напряжений может быть установлен с помощью критериев пластичности (текучести) или прочности (разрушения). Множество критериев объясняется тем, что процесс наступления предельного состояния в металле еще недостаточно изучен, а процесс разрушения на контакте металл-клей-древесина изучен в ещё меньшей степени. Критерии текучести или прочности должны дать возможность сравнения степени опасности различных напряженных состояний материала. Сравнение удобно выполнять, если одно из напряженных состояний считать основным – эквивалентным.

Одним из критериев пластичности является критерий удельной энергии изменения формы. При появлении пластических деформаций предельного значения достигает та часть удельной потенциальной энергии, которая обусловлена изменением формы. Критерий удельной потенциальной энергии изменения формы называют энергетической теорией прочности, или критерием максимального напряжения по Мизесу [2], основанным на теории Мизеса – Генки (Mises–Hencky), также известной как теория энергии формоизменения. Этот критерий считается наиболее точным для пластичных материалов с одинаковыми свойствами при растяжении-сжатии, т. е. вполне подходит для строительных сталей, из которых изготовлены основные элементы рассматриваемого узла.

В вычислениях главных напряжений s_1 , s_2 и s_3 напряжение по Мизесу выражено как

$$s_{vonMises} = \sqrt{\left[(s_1 - s_2)^2 + (s_2 - s_3)^2 + (s_1 - s_3)^2 \right] / 2}.$$

Согласно данному подходу, пластичный материал начинает повреждаться в местах, где напряжение по Мизесу становится равным предельному напряжению. В данном эксперименте предел текучести используется в качестве предельного напряжения для элементов узла

$$s_{vonMises} > s_{\text{предел}}.$$

Коэффициент запаса прочности

$$FOS = \frac{s_{\text{предел}}}{s_{vonMises}}.$$

При этом критичным для анализа узла было недостижение в материалах напряжений больших, чем расчетные сопротивления этих материалов, которые в случае работы стержней на сжатие будут равны 10,5 МПа; растяжение – 19,5 МПа; для стальных пластин – 245 МПа; для болтов класса прочности – 8,8–320 МПа. Поэтому изометрические объемные поля напряжений показаны на рис. 4–6 в двух вариантах – медианные напряжения для заданного материала и напряжения, равные расчетному сопротивлению материала.

Полученные в результате численного эксперимента значения деформаций, эквивалентных напряжений по Мизесу и коэффициентов запаса для элементов узла приведены на рис. 4–8. Эквивалентные напряжения в контактных зонах дерево-клей-стальная пластина не превышают значения предела прочности древесины «карандаша» $\sigma = 10,5/19,5$ МПа, а эквивалентные напряжения в стальных пластинах не превышают предела текучести $\sigma_T = 245$ МПа, кроме небольшой области на контакте с болтом, где может происходить смятие, что подтверждается экспериментом. Проведенные численные исследования показали, что в узлах структурной конструкции полносборного здания возникают пластические деформации на контакте в зонах дерево-клей-стальная пластина, особенно в торце стальных пластин. В последующих разработках данный узел можно усовершенствовать, включив в конструкцию подобие анкерного устройства на торце пластин или дополнительно усилив клеевой узел стягивающими болтами, перпендикулярными пластине, для создания эффекта обоймы и более надежной работы клеевого соединения.

Анализ результатов конечно-элементного моделирования узла структурной конструкции позволяет сделать вывод о его надежности. Такая конструкция узла может быть использована для здания с пролётом 12 м и модулем 0,75 м.

Выводы

На основании проведенного анализа НДС узла структурной конструкции замкнутого типа можно сделать следующие выводы:

1. В основном напряжения в «карандашах» в смежной с узлом зоне составляют 3–6 МПа при пределе прочности на сжатие и растяжение вдоль волокон 10 МПа. Незначительное количество (< 1 %) материала карандашей превысило напряжение в 10 МПа, однако в результатах расчета такое напря-

жение получено только на границе дерево-клей-металл, где присутствует эпоксидный клей с пределом прочности > 16 МПа. Также данные значения могли быть получены в результате неравномерностей, связанных с созданием объемной сетки конечных элементов.

2. Напряжения в стальных пластинах, соединенных в узле на болте, не превышают предела текучести стали и в основном достигают значений 30–100 МПа.

3. Деформации стальных элементов узла не превышают предельных и хорошо согласуются с данными, полученными при расчете в программном комплексе SCAD Office.

4. Эпюра запаса прочности не показала элементов с запасом меньше 1, наружные области «карандашей» имеют запас в 4–5 раз, внутренние – в 2–3 раза, контактирующие с металлом – около 1; в стальных пластинах углы, контактирующие с другими пластинами, обладают запасом прочности 2–3, центр пластин – от 3, локальные области сопряжения с болтом и склейки с деревом обладают запасом прочности 1,5–2.

5. Принятые для карнизного узла структурной конструкции полносборного здания замкнутого типа сечения элементов, классы материалов и способы соединения элементов в узле друг с другом позволяют говорить о надежности данного решения в пределах его зоны применения, а именно в конструкции с пролетом 12 м и модулем 0,75 м.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Inzhutov I., Zhadanov V., Semenov M., Amelchugov S., Klimov A., Melnikov P., Klinduh N.* A comparative analysis of foundation design solutions on permafrost soils // E3S Web of Conferences: SPbWOSCE-2018. 2019. V. 110. P. 01019.
2. *Абовский Н.П., Енджиевский Л.В., Инжутов И.С., Деордиев С.В., Палагушкин В.И.* Формообразование строительных конструкций. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2013. 184 с.
3. *Инжутов И.С., Дмитриев П.А., Жаданов В.И., Деордиев С.В., Захарюта В.В.* Полно-сборное здание замкнутого типа с каркасом из отходов фанерного производства // Вестник МГСУ. 2013. № 7. С. 40–50.
4. *Патент № RU 2705118 С1* Российская Федерация. Узловое соединение деревянных стержней / Лисицкий И.И., Жаданов В.И., Руднев И.В., Чайкин Е.А. 2019. 7 с.
5. *Rudnev I., Zhadanov V., Garipov V.* Validation of the calculation of a wooden column with a support unit on glued steel plates // E3S Web of Conferences: 24, Moscow. Moscow, 2021. DOI: 10.1051/e3sconf/202126302054
6. *Лисицкий И.И., Руднев И.В.* Проблемы увеличения несущей способности клееного соединения стальных пластин с древесиной // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : материалы Всероссийской научно-методической конференции. Оренбург : Оренбургский гос. ун-т, 2018. С. 283–286.
7. *Турковский С.Б., Погорельцев А.А., Преображенская И.П.* Клееные деревянные конструкции с узлами на клеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК). Москва : РИФ «Стройматериалы», 2013. 308 с.
8. *Пересыткина В.А., Жаданов В.И.* Стальные клеенные пластины в узловых соединениях деревянных конструкций // Шаг в науку. 2021. № 1. С. 94–97.
9. *Руднев И.В.* Узловые соединения деревянных элементов на клеенных стальных пластинах : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.23.01. Пенза, 2015. 176 с.
10. *Руднев И.В., Жаданов В.И.* Выдергивание стальных пластин, клеенных в древесину. Аналитический расчет и эксперимент // Вестник Чувашского государственного педаго-

- гического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2015. № 3. С. 9–18.
11. Лисицкий И.И., Жаданов В.И., Руднев И.В., Украинченко Д.А. Способы повышения несущей способности соединений деревянных конструкций на стальных вклеенных пластинах // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 5. С. 31–43.
 12. Жаданов В.И., Лисицкий И.И., Пересыпкина В.А. Вклеенные плоские пластины в узлах сквозных деревянных конструкций // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры : материалы Всероссийской научно-методической конференции (с международным участием). Оренбург : Оренбургский гос. ун-т, 2021. С. 135–140.
 13. Рекомендации по проектированию структурных конструкций / Центр. НИИ строит. конструкций им. В.А. Кучеренко Госстроя СССР. Москва : Стройиздат, 1984. 303 с.

REFERENCES

1. Inzhutov I., Zhadanov V., Semenov M., Amelchugov S., Klimov A., Melnikov P., Klinduh N. A comparative analysis of foundation design solutions on permafrost soils. *E3S Web of Conferences*. 2019. V. 110. 01019.
2. Abovskiy N.P., Yendzhiyevskiy L.V., Inzhutov I.S., Deordiyev S.V., Palagushkin V.I. Formoobrazovaniye stroitel'nykh konstruktсий [Formation of building structures]. Krasnoyarsk: SFU, 2013. 184 p. (rus)
3. Inzhutov I.S., Dmitriyev P.A., Zhadanov V.I., Deordiyev S.V., Zakharyuta V.V. Polnosbornoye zdaniye zamknutogo tipa s karkasom iz otkhodov fanernogo proizvodstva [Fully-prefabricated building of closed type with veneer waste frame]. *Vestnik MGSU*. 2013. V. 7. Pp. 40–50. (rus)
4. Lisitskiy I.I., Zhadanov V.I., Rudnev I.V., Chaykin E.A. Uzlovoye soyedineniye derevyannykh sterzhney [Joint connection of wooden rods]. Patent Rus. Fed. N 2705118 C1. 2019. 7 p. (rus)
5. Rudnev I., Zhadanov V., Garipov V. Validation of the calculation of a wooden column with a support unit on glued steel plates. *E3S Web of Conferences*. 2021. DOI:10.1051/e3sconf/202126302054
6. Lisitskiy I.I., Rudnev I.V. Problemy uvelicheniya nesushchey sposobnosti kleyevogo soyedineniya stal'nykh plastin s drevesinoy [Bearing capacity improvement of glued wood-to-steel plate joints]. In: Universitetskiy kompleks kak regional'nyy tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury: materialy Vserossiyskoy nauchno-metodicheskoy konferentsii (*Proc. All-Russ. Sci. Conf. 'University as a Regional Center of Education, Science and Culture'*). Orenburg, 2018. Pp. 283–286. (rus)
7. Turkovskiy S.B., Pogorel'tsev A.A., Preobrazhenskaya I.P. Kleyenyye derevyannyye konstruktсий s uzlami na vkleyennykh sterzhnyakh v sovremennom stroitel'stve (sistema TSNIISK) [Laminated wood structures with glued wood-to-steel rods in modern construction]. Moscow: Stroimaterialy, 2013. 308 p. (rus)
8. Peresyapkina V.A., Zhadanov V.I. Stal'nyye vkleyennyye plastiny v uzlovykh soyedineniyakh derevyannykh konstruktсий [Glued wood-to-steel plate joints]. *Shag v nauku*. 2021. V. 1. Pp. 94–97. (rus)
9. Rudnev I.V. Uzlovyye soyedineniya derevyannykh elementov na vkleyennykh stal'nykh plastinakh: dis. ... kand. tekhnich. nauk [Glued wood-to-steel plate joints. PhD Thesis]. Penza, 2015. 176 p. (rus)
10. Rudnev I.V., Zhadanov V.I. Vydergivaniye stal'nykh plastin, vkleyennykh v drevesinu. Analiticheskiy raschet i eksperiment [Pulling out steel plates glued into wood. Theoretical calculation and experiment]. *Vestnik Chuvashskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. I.Ya. Yakovleva. Ser.: Mekhanika predel'nogo sostoyaniya*. 2015. V. 3. Pp. 9–18. (rus)
11. Lisitskiy I.I., Zhadanov V.I., Rudnev I.V., Ukrainchenko D.A. Spособы povysheniya nesushchey sposobnosti soyedineniy derevyannykh konstruktсий na stal'nykh vkleyennykh plastinakh [Bearing capacity improvement of glued wood-to-steel plate joints]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2018. V. 5. Pp. 31–43. (rus)
12. Zhadanov V.I., Lisitskiy I.I., Peresyapkina V.A. Vkleyennyye ploskiye plastiny v uzlakh skvoznykh derevyannykh konstruktсий [Glued plate joints of open-web structures]. In: Universitetskiy kompleks kak regional'nyy tsentr obrazovaniya, nauki i kul'tury: materialy Vse-

rossiyskoy nauchno-metodicheskoy konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiyem) (*Proc. All-Russ. Sci. Conf. 'University as a Regional Center of Education, Science and Culture'*). Orenburg, 2021. Pp. 135–140. (rus)

13. Rekomendatsii po proyektirovaniyu strukturnykh konstruksiy [Recommendations for structural design]. Moscow: Stroyizdat, 1984. 303 p. (rus)

Сведения об авторе

Чайкин Евгений Александрович, ст. преподаватель, Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, utatso@gmail.com

Author Details

Evgenii A. Chaikin, Senior Lecturer, Siberian Federal University, 79, Svobodnyi Ave., 660041, Krasnoyarsk, Russia, utatso@gmail.com