

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТЫКОВОГО СОЕДИНЕНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ НАГЕЛЯХ

М.А. Водяников

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, РОССИЯ

Аннотация: Проведена серия вычислительных экспериментов в программном комплексе ANSYS по определению несущей способности и оптимальной схемы расположения углепластиковых нагелей в соединениях деревянных конструкций на углепластиковых накладках. В качестве варьируемых параметров принято количество нагелей в соединении и углы вклейки нагелей в древесину. Сделаны обобщенные выводы по различным вариантам конфигурации с подбором оптимальных параметров работы конструкции при одинаковой нагрузке. Показаны изополя распределения напряжении, построены графики зависимостей контролируемых параметров для каждого рассмотренного случая. Выполнен сравнительный анализ напряженно-деформированного состояния соединения с результатами расчетов по методике, предусмотренной действующими нормами и правилами сопромата. Даны рекомендации по расстановке нагелей, а также по усовершенствованию стыковых соединений с применением композитных материалов.

Ключевые слова: деревянные конструкции, углепластик, численный эксперимент, модель, ANSYS, механические свойства, наблюдение, строительные материалы, испытание, конечный элемент

RESULTS OF NUMERICAL MODELING OF THE STRESSED-DEFORMED STATE OF THE JOINT CONNECTION OF WOOD CONSTRUCTIONS WITH CFRP DOWEL PINS

Mikhail A. Vodiannikov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, RUSSIA

Abstract: A comparative analysis based on a series of numerical simulation experiments in the ANSYS software for determining the bearing capacity and the optimal arrangement of CFRP dowel pins in the joints of wooden structures. As variable parameters, the number of pins in the joint and the angles of pasting dowels into the wood are taken. Generalized conclusions are drawn on various configuration options with the selection of optimal design performance parameters for the same load. The voltage distribution iso-poles are shown, the dependence curves of the controlled parameters are plotted for each case considered. A comparative analysis of the stress-strain state of the compound with the results of calculations is carried out according to the procedure stipulated by the current norms and rules of the strength. Recommendations are given on the arrangement of dowels, as well as on the improvement of joints with the use of composite materials.

Keywords: ANSYS, carbon fiber, computer modeling, composite material, layer, contact, wood, computer model, finite element analysis

1. ВВЕДЕНИЕ

Стыки конструкций из цельной и клееной древесины являются наиболее ответствен-

ным и чрезвычайно трудоемким разделом проектирования при возведении большепролетных архитектурных форм. Сложность компоновочных решений стыков и узлов со-

единения деревянных конструкций обусловлена совокупностью факторов, таких как анизотропия древесины, наличие естественных пороков, невозможность применения сварки и других температурных воздействий при устройстве закладных деталей, требованиями к огнестойкости конструкции, и другим.

По совокупности характеристик наиболее широкое распространение получили стыки на клеенных стержнях (система ЦНИИСК) с применением стальных нагелей и накладок. Однако в ряде случаев (химически агрессивная среда, высокая влажность в помещении, и т.д.) такое решение не является надежным, поскольку существует риск преждевременного выхода конструкции из строя в связи с процессами коррозии стальных деталей. В работах [1, 2] показана принципиальная возможность применения композитных материалов для создания равнопрочных узлов стыка деревянных конструкций [3].

На сегодняшний день отсутствует нормативная база [4] для расчета композитов, поэтому рациональным путем решения этой задачи может являться построение математической модели и вычислительные эксперименты с помощью метода конечных элементов [5]. Применение современных программных комплексов и мощностей ЭВМ позволяет с высокой точностью моделировать поведение конструкции в тех или иных условиях [6].

В статье приведены данные численного моделирования напряженно-деформированного состояния стыкового соединения деревянных конструкций на клеенных стержнях при различных конфигурациях расстановки нагелей.

2. РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ ЧИСЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

В качестве испытуемого образца принят деревянный брус сечением $100 \times 225 \times 3000$ мм, разрезанный в середине пролета. Выполнена компьютерная модель испытания по методике четырехточечного изгиба, расчетная схема приведена на рис. 1. Нагрузка передавалась в виде двух сосредоточенных сил $F=1,25$ кН. Величина нагрузки принята в соответствии с критической силой, определенной по методике СП «Деревянные конструкции» [4] для неразрезной балки аналогичного сечения. При $F=1,25$ кН неразрезной образец достигает предельно допустимого расчетного значения прогиба 10 мм (п. 4.3.3 [4]), запас прочности при действии изгибающего момента от данной величины нагрузки (п. 4.9 [4]) составляет 11,2 %. Модель деревянной балки и узла стыка запроектирована и построена при помощи программного комплекса AUTODESK AutoCAD®. Далее модель экспортирована в программный комплекс ANSYS с помощью макросов, написанных на языке параметрического программирования APDL.

На рис. 2 показана полная конечно-элементная модель образца. Балка разрезана в середине пролета и жестко соединена накладками толщиной 5 мм, расположенными по верхней и нижней грани образца. Накладки заанкерованы к телу древесины при помощи клеенных нагелей диаметром 5 мм (рис. 3).

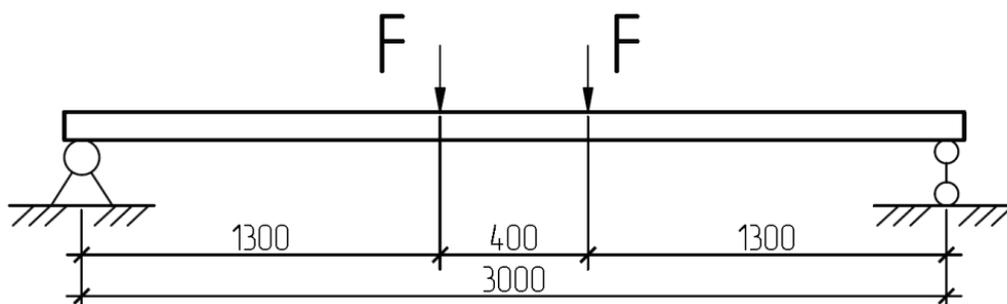


Рисунок 1. Расчетная схема.

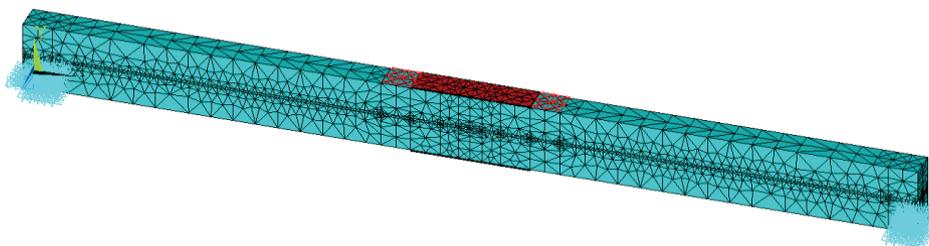


Рисунок 2. Конечно-элементная модель образца.

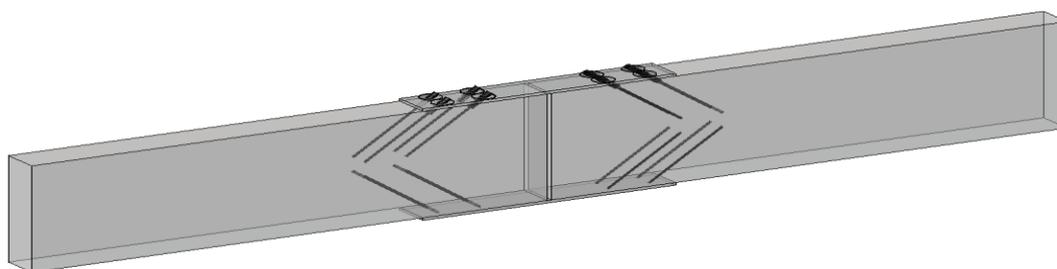


Рисунок 3. Схема нагельного соединения.

Расчетные модели дискретизированы при помощи конечных элементов [5]. Древесина задана как трансверсально-изотропный материал [7, 8] со следующими характеристиками: модуль упругости по оси x , $E_x=1,1 \times 10^{10}$ (Па), модуль упругости $E_y=E_z=4,5 \times 10^8$ (Па), коэффициенты Пуассона $\nu_{xy}=0,45$, $\nu_{yz}=\nu_{xz}=0,018$; модуль сдвига $G_x=G_y=G_z=6 \times 10^8$ (Па). Тело балки смоделировано 8-узловым конечным элементом SOLID187.

Вклеиваемые нагели – углепластиковые стержни на полимерной матрице [9] с пределом прочности при разрыве $\sigma_b=2248 \times 10^6$ (Па); модуль упругости $E=117 \times 10^9$ (Па); коэффициент Пуассона $\nu_{xy}=\nu_{yx}=0,31$. Для стержней применен 3-узловой элемент BEAM189. Накладки заданы как трансверсально-изотропный двунаправленный углепластик с направлением армирующих слоев ± 45 градусов со следующими характеристиками [10, 11]: предел прочности при разрыве $\sigma_b=765 \times 10^6$ (Па); модули упругости $E_x=E_y=87,2 \times 10^9$, $E_z=65,4 \times 10^9$ (Па); коэффициенты Пуассона $\nu_{xy}=\nu_{yx}=0,268$, $\nu_{xz}=\nu_{zx}=0,018$. Накладки определены 8-узловым конечным элементом SHELL281.

При моделировании клеевого соединения учитывалась нелинейность, связанная с наличием сил трения по поверхностям кон-

такта (плоскости соприкосновения древесины-углепластик). В модель введены специальные контактные конечные элементы. Одна из поверхностей условно называется «контактной» поверхностью, а вторая – «целевой» поверхностью [5]. Такие поверхности моделируются соответственно при помощи конечных элементов CONTA174 и TARGE170. Контактные и целевые конечные элементы, составляющие контактную пару, связаны между собой посредством общего набора характеристик.

Существующая методика расчета соединений «системы ЦНИИСК» сводится к сравнению минимальной несущей способности нагеля из условия смятия древесины гнезда или изгиба наиболее нагруженного нагеля. Однако методики определения усилий в нагелях и определения наиболее нагруженного в нормативных документах не приводятся [12].

С целью анализа влияния различных параметров на усилия был выполнен многофакторный численный эксперимент. В качестве контролируемых были приняты два параметра, влияющих на несущую способность стыка:

- количество нагелей в соединении ($N=4$, 8 либо 12 шт., рис. 4);
- положение (угол вклеивания) нагеля ($\varphi=15, 30, 45, 60^\circ$, рис. 5).

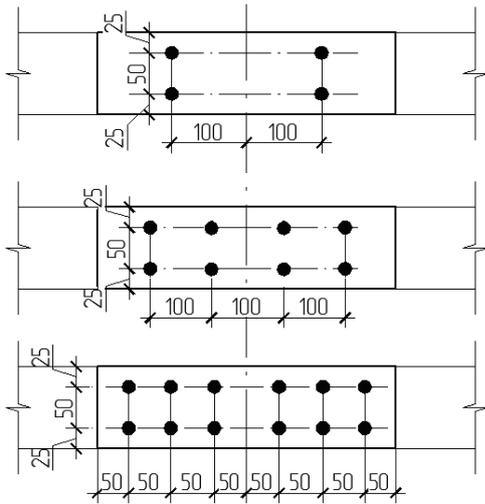


Рисунок 4. Схема расположения нагелей.

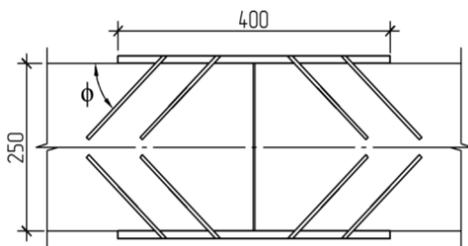


Рисунок 5. Угол вклеивания нагеля.

Нагели устанавливаются в два продольных ряда, расположение нагелей принято в соответствии с требованиями п.7.18, 7.19 [4].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА

Расчет производился в нелинейной постановке приложением нагрузки F для каждого случая. По окончании расчета в качестве контрольных приняты следующие параметры:

- усилие в древесине (рис. 6);
- усилие в стержнях (рис. 7);
- усилие в накладках (рис. 8);
- прогиб образца в вертикальной плоскости (рис. 9).

Для каждой измеряемой величины и конфигурации расположения нагелей в соединении построены графики зависимости усилий и прогибов от угла наклона вклейки нагеля. Анализируя полученные данные распределения усилий и прогибов исследуемого образца можно сделать следующие выводы.

По мере увеличения количества нагелей в соединении усилия в древесине, стержнях и накладках распределяются более равномерно. При этом для вариантов с 8 и 12 нагелями, по мере увеличения угла наклона нагеля, резко снижается общая деформативность соединения. Усилие в накладках и стержнях наименьшее при установке 8 нагелей, при этом усилие в древесине наименьшее при их установке под углом близким к 45° .

Исходя из этого оптимальным вариантом конфигурации нагельного соединения образца при четырехточечном изгибе под действием критической силы F следует принимать вариант с расстановкой восьми нагелей по каждой стороне под углом 45° к линии, проходящей вдоль длинного края балки.

На рис. 10 и 11 показаны изополя распределения напряжений в древесине и соединительных деталях (накладках и стержнях) для наиболее оптимальной конфигурации.

ВЫВОДЫ

Численное моделирование позволяет с большой точностью оценивать несущую способность строительных конструкций и их соединений. Экспериментальные данные [1, 2] показывают высокую степень достоверности расчетных величин. Современное проектирование жестких стыков деревянных конструкций с использованием мощностей ЭВМ позволяет рассматривать задачи с большим количеством контролируемых параметров при этом экономия времени и материальные средства на проведение многочисленных дорогостоящих экспериментов. В рассматриваемой задаче оптимальный результат получен путем вариантного моделирования конструкции с оценкой полученных графиков. Предельные прогибы конструкции с жестким стыком получаются несколько меньше, чем для неразрезной балки [13], что говорит об армирующем эффекте углепластиковых деталей. Аналогичные результаты показаны в работе [12] по усилению древесины углепластиковыми накладками.

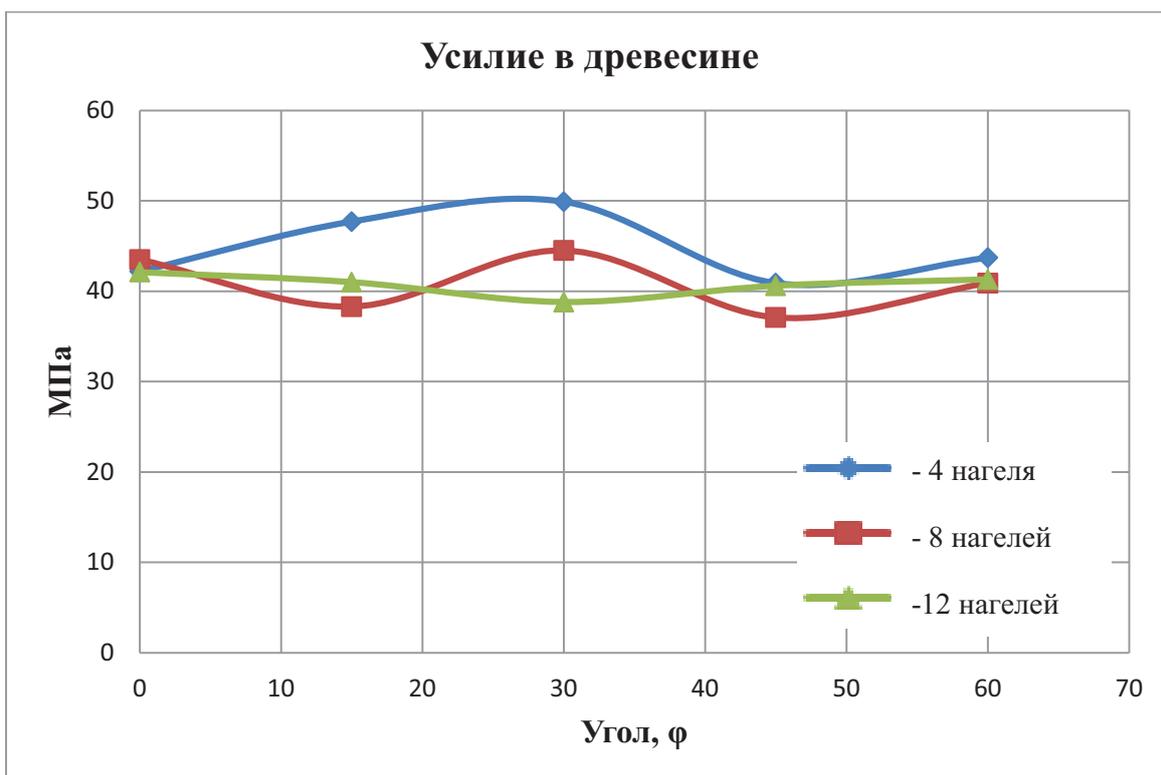


Рисунок 6. График зависимости максимальных усилий в древесине от угла вклейки и количества нагелей.

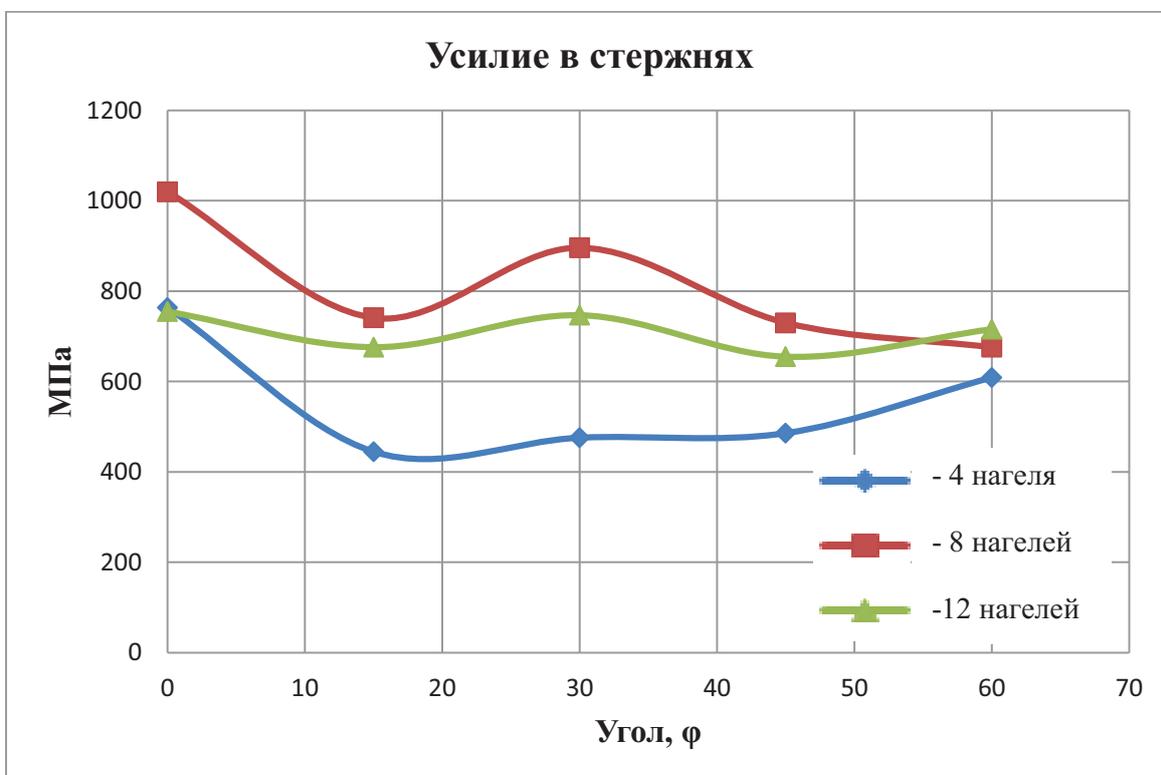


Рисунок 7. График зависимости максимальных усилий в стержнях от их количества и угла вклейки.

Результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния стыкового соединения деревянных конструкций на углепластиковых нагелях

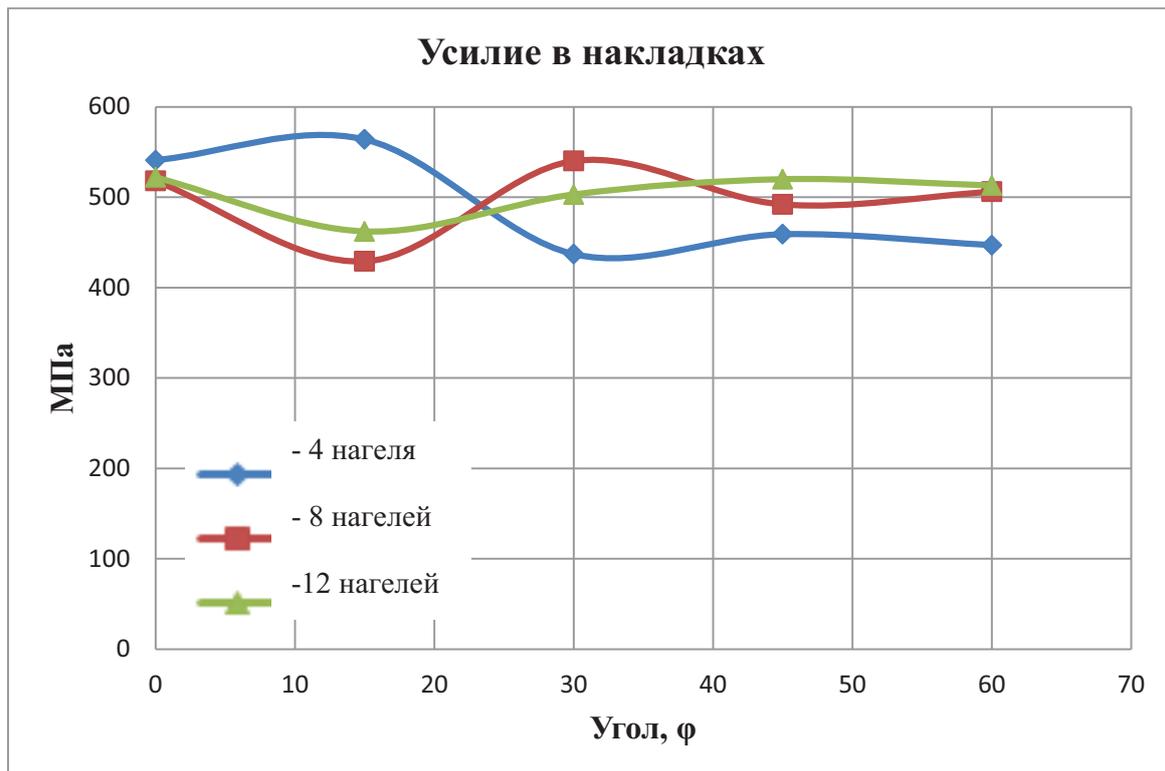


Рисунок 8. График зависимости максимальных усилий в накладках от угла вклейки и количества нагелей.

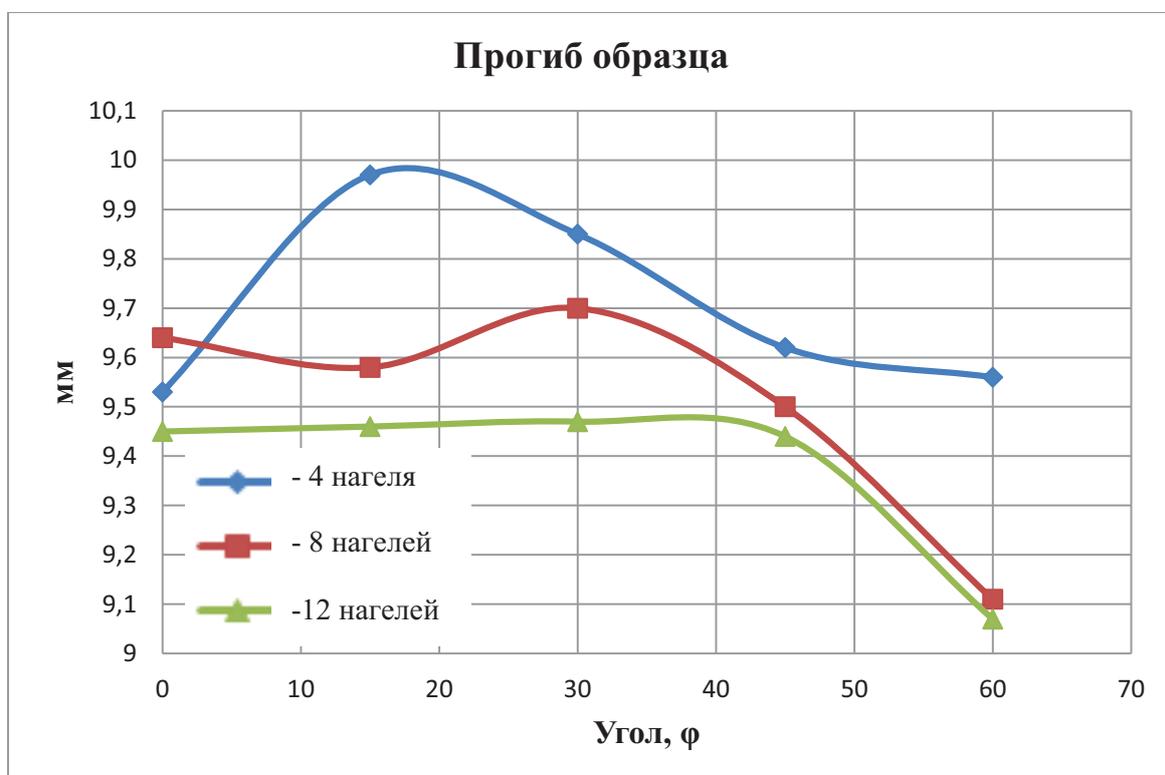


Рисунок 9. Предельные вертикальные перемещения (прогибы) образца в зависимости от угла вклейки и количества нагелей.

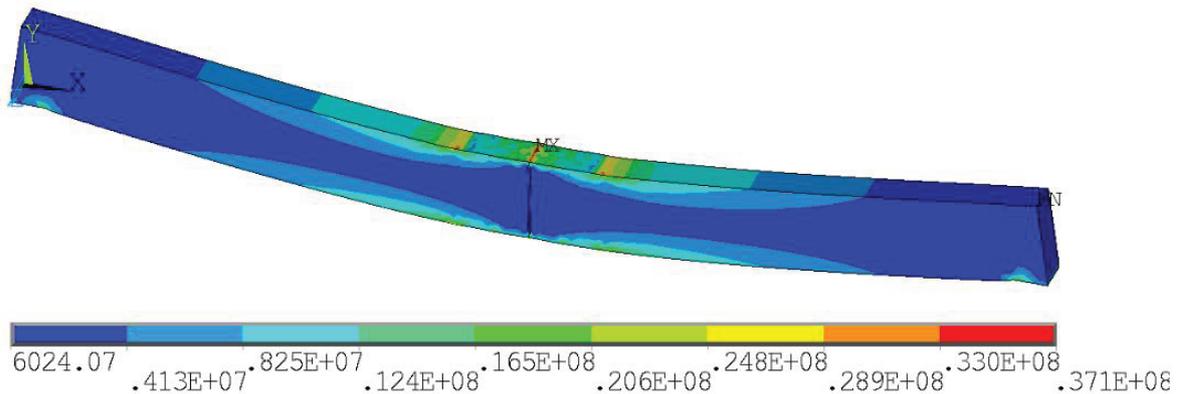


Рисунок 10. Изополя распределения напряжений в теле древесины.

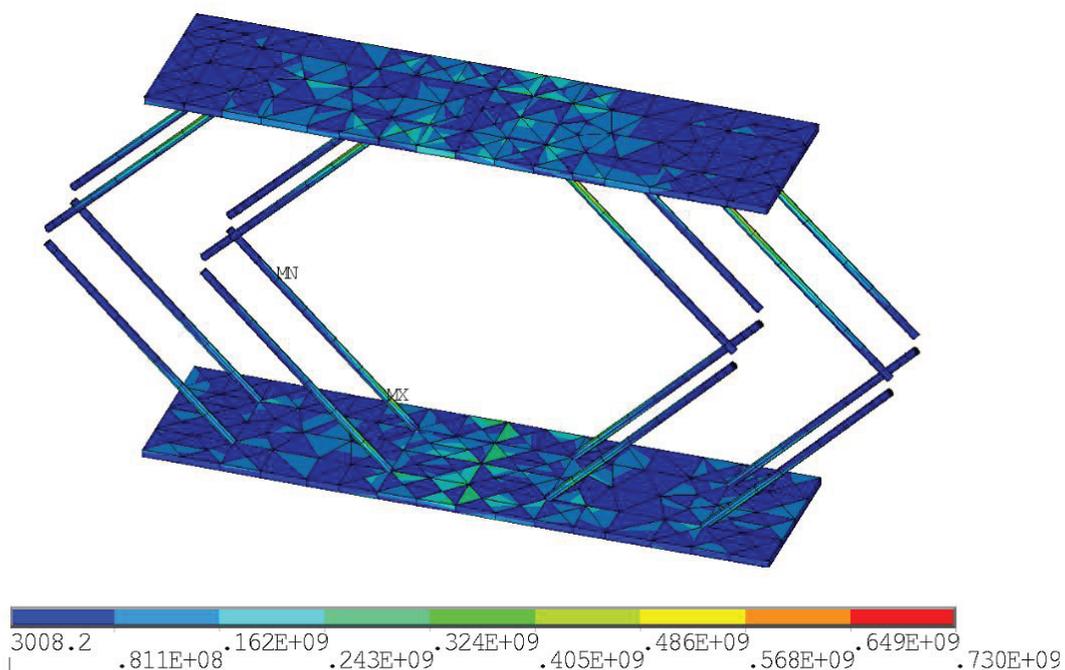


Рисунок 11. Изополя распределения напряжений соединительных деталей.

Наиболее ответственным является стык сопряжения нагель-накладка в растянутой (нижней) зоне конструкции.

Экспериментальные и теоретические данные показывают, что применение композитных материалов, инертных к коррозионным процессам, в ряде случаев является наиболее целесообразным [14, 15, 16].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кашеварова Г.Г., Водяников М.А.** Численное и экспериментальное моделирование жесткого стыка слоистых деревянных конструкций. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2017, Volume 13, Issue 2, 2017, pp. 84-92.
2. **Vodiannikov M., Kashevarova G.** Analysis of Wood Structure Connections Using Cylindrical Steel and Carbon Fiber Dowel Pins. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, Vol. 205.
3. **Калугин А.В.** Деревянные конструкции. – М.: АСВ, 2008. – 286 с.
4. СП 64.13330.2011. Актуализированная редакция СНиП II-25-80 «Деревянные конструкции». – М: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2011.

5. **Басов К.А.** ANSYS в примерах и задачах. – М: Компьютер Пресс, 2002. – 224 с.
6. **Lennartz M., Jacob-Freitag S.** New Architecture in Wood: Forms and Structures. Birkhauser, 2016.
7. **Арленинов Д.К.** Конструкции из дерева и пластмасс. – М.: АСВ, 2002.
8. **Хрулев В.М.** Деревянные конструкции и детали. – М.: Стройиздат, 1983. – 288 с.
9. **Перепелкин К.Е.** Химические волокна: развитие производства, методы получения, свойства, перспективы – СПб.: Издание СПГУТД, 2008. – 354 с.
10. **Мэттьюз Ф., Ролингс Р.** Композитные материалы. Механика и технология. – М.: Техносфера, 2004. – 408 с.
11. **Симамура С.** Углеродные волокна. – М.: Мир, 1987.
12. **Gugutsidze G., Draskovic F.** Reinforcement of Timber Beams With Carbon Fibers Reinforced Plastics. // Slovak Journal of Civil Engineering, 2010, No. 2, pp. 1-6.
13. **Гаппоев М.М.** Конструкции из дерева и пластмасс. – М.: АСВ, 2004. – 440 с.
14. High Performance Carbon Fibers. American Chemical Society National Historic Chemical Landmarks. Ohio: GrafTech International, 2003.
15. Дорожная карта «Использование нанотехнологии в производстве углеродных волокон и продуктов на их основе». – М.: ГК «РОСНАНОТЕХ», 2010.
16. **Параничева Н.В., Назмеева Т.В.** Усиление строительных конструкций с помощью углеродных композиционных материалов. // Инженерно-строительный журнал, 2010, №2, с. 19-22.
1. **Kashevarova G.G., Vodiannikov M.A.** Chislennoe i Eksperimental'noe Modelirovanie Zhestkogo Styka Sloistyx Dereviannykh Konstruktsii. // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering, 2017, Volume 13, Issue 2, pp. 84-92.
2. **Vodiannikov M., Kashevarova G.** Analysis of Wood Structure Connections Using Cylindrical Steel and Carbon Fiber Dowel Pins. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, Vol. 205.
3. **Kalugin A.V.** Dereviannye Konstruktsii [Wood Structure]. Moscow, ASV Publishing House, 2008, 286 pages.
4. SP 64.13330.2011. Aktualizirovannaia redaktsiia SNIIP II-25-80 «Dereviannye konstruktsii» [Updated version of SNIIP II-25-80 “Wooden structures”]. Moscow, TsNIISK im. V.A. Kucherenko, 2011.
5. **Basov K.A.** ANSYS v Primerakh i Zadachakh [ANSYS in examples and tasks]. Moscow, Computer Press, 2002, 224 pages.
6. **Lennartz M., Jacob-Freitag S.** New Architecture in Wood: Forms and Structures. Birkhauser, 2016.
7. **Arleninov D.K.** Konstruktsii iz Dereva i Plastmass [Structures from Wood and Plastics]. Moscow, ASV Publishing House, 2002.
8. **Khrulev V.M.** Dereviannye Konstruktsii i Detali [Wooden Structures and Devices]. Moscow, Stroizdat, 1983, 288 pages.
9. **Perepelkin K.E.** Khimicheskie Volokna: Razvitie Proizvodstva, Metody Polucheniia, Svoistva, Perspektivy [Chemical Fibers: Development of Production, Methods of production, Properties, Prospects]. Saint-Petersburg, SPGUTD, 2008, 354 pages.
10. **Mett'iuз F., Rolings R.** Kompozitnye Materialy. Mekhanika i Tekhnologiia [Composite Materials. Mechanics and Technology]. Moscow, Tekhnosfera, 2004, 408 pages.
11. **Simamura S.** Uglerodnye volokna [Carbon fibers]. Moscow, Mir, 1987.
12. **Gugutsidze G., Draskovic F.** Reinforcement of Timber Beams With Carbon Fibers Reinforced Plastics. // Slovak Journal of Civil Engineering, 2010, No. 2, pp. 1-6.
13. **Gappoev M.M.** Konstruktsii iz Dereva i Plastmass [Structures from Wood and Plas-

REFERENCES

- tics]. Moscow, ASV Publishing House, 2004, 440 pages.
14. High Performance Carbon Fibers. American Chemical Society National Historic Chemical Landmarks. Ohio: GrafTech international, 2003.
 15. Dorozhnaia Karta "Ispol'zovanie Nanotekhnologii v Proizvodstve Uglerodnykh Volokon i Produktov na Ikh Osnove" [Road Map "Use of Nano-Technology in the Production of Carbon Fibers and Products Based on Them"]. Moscow, GK "ROSNANOTEKh", 2010
 16. **Paranicheva N.V., Nazmeeva T.V.** Usilenie Stroitel'nykh Konstruktsii s Pomoshch'iu Uglerodnykh Kompozitsionnykh Materialov [Strengthening of Building Structures with the Use of Carbon Composite Materials]. // Magazine of Civil Engineering, 2010, No. 2, pp. 19-22.

Водяников Михаил Алексеевич, аспирант кафедры «Строительные конструкции и вычислительная механика» Пермского национального исследовательского политехнического университета; 614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29; тел./факс: +7 (342) 2-198-361; E-mail: vodyannikov@mail.ru.

Mikhail A. Vodiannikov, Ph.D. Student of the Department of Building constructions and Computational Mechanics, Perm National Research Polytechnic University; 29, Komsomolsky prospect, Perm, 614990, Russian Federation; phone/fax: +7 (342) 2-198-361; E-mail: vodyannikov@mail.ru.