

УДК: 694.12  
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.12  
EDN: MWZFQK



## Численное моделирование отдельных видов стандартных испытаний соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах

Б.Э. Шарынин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Поволжский государственный технологический университет,  
г. Йошкар-Ола, Российская Федерация

**Аннотация.** *Постановка задачи.* Металлические зубчатые пластины широко применяются в строительстве как соединительные элементы для деревянных конструкций. Конструкция пластин с начала 1980-х годов претерпела существенные изменения в части конфигурации зубьев и их размеров, однако производители из Российской Федерации не раскрывают результаты испытаний по новым стандартам. Так как изучение характера работы соединений и конструкций сопряжено с использованием данных о несущей способности металлических зубчатых пластин, одним из способов сокращения дефицита информации в данной области является численное моделирование. Цель данного исследования – проведение верификации моделей материалов стали и древесины в составе конечно-элементной модели соединения деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах путем сопоставления результатов численного моделирования с результатами натурных испытаний металлических зубчатых пластин, выполненных производителями и сторонними исследователями, необходимой для последующего использования в расчётах несущей способности соединений. В рамках исследования решены задачи по разработке расчетных моделей соединений, определению расчетных физико-механических характеристик для модели древесины в качестве ортотропного материала и стали в качестве нелинейного упруго-пластичного материала, также сопоставления результатов численного моделирования с результатами имеющихся данных о несущей способности.

*Результаты.* В результате численного моделирования выявлен удовлетворительный уровень корреляции результатов с данными о натурных испытаниях подобных соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах.

*Выводы.* Сформулированные в исследовании модели материалов стали 08КП и древесины сосны обыкновенной можно рекомендовать для использования для расчётов несущей способности металлических зубчатых пластин с использованием метода конечных элементов.

**Ключевые слова:** численное моделирование, метод конечных элементов, соединения деревянных конструкций, металлические зубчатые пластины, ортотропная модель древесины, стандартные испытания, билинейное упрочнение

**Для цитирования:** Шарынин Б.Э. Численное моделирование отдельных видов стандартных испытаний соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 136-146, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.12, EDN: MWZFQK

# Numerical modeling of some types of standard tests for joints of wooden structures on nail plates

B.E. Sharynin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Volga State University of Technology,  
Yoshkar-Ola, Russian Federation

**Abstract.** *Problem statement.* Nail plates are widely used in construction as connecting elements for wooden structures. The design of the plates from the 1980s has undergone significant changes in terms of the configuration of the teeth and their dimensions. The test results according to the new standards are not published. Since the study of the nature of the work of joints and structures involves the use of data on the bearing capacity of nail plates, one of the ways to obtain information in this area is numerical modeling. The purpose of this study is to verify models of steel and wood materials as part of a finite element model of wooden structures connected by nail plates through comparing the results of numerical modeling with the results of field tests of metal toothed plates performed by manufacturers and third-party researchers, necessary for subsequent use in calculations of the bearing capacity of joints. As part of the study the following tasks were solved: developing computational models of connections, determining the calculated physical and mechanical characteristics for the model of wood as an orthotropic material and steel as a nonlinear elastic-plastic material, as well as comparing the results of numerical modeling with the results of available data on load-bearing capacity.

*Results.* As a result of numerical modeling, a satisfactory level of correlation of the results with data on field tests of such joints was revealed.

*Conclusions.* The models of materials of 08KP steel and pine wood formulated in the study can be recommended for use in calculations of the bearing capacity of the nail plates using the finite element method.

**Keywords:** numerical modeling; finite element method; connections of wooden structures; nail plates; orthotropic wood model; standard tests; bilinear hardening

**For citation:** Sharynin B.E. Numerical modeling of some types of standard tests for joints of wooden structures on nail plates // News KSUAE, 2024, № 2(68), p. 136-146, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.12, EDN: MWZFKQ

## 1. Введение

Увеличение объемов малоэтажного строительства в Российской Федерации ведет к росту спроса на деревянные конструкции, так как конструкции из дерева обладают необходимой долговечностью, отличаются легкостью обработки при изготовлении, а соотношение прочности и объемного веса древесины позволяет обеспечить необходимую несущую способность при типичных для таких объектов нагрузках. Помимо отделочных материалов и ограждающих конструкций, наиболее широко древесина используется в качестве материала несущих конструкций кровель и перекрытий [1]. Для поддержания высокого уровня качества, соблюдения сжатых сроков строительства объектов и удешевления производства конструкций, всё больше элементов несущих и ограждающих конструкций изготавливается в заводских, а не построечных условиях. При значительных нагрузках, воздействие которых превышает допускаемые напряжения в сечениях из цельной древесины, наиболее целесообразно использовать сквозные решетчатые конструкции – фермы, которые состоят из отдельных элементов, соединенных в узлах. Такой вид конструкций обладает высокой экономической эффективностью [2]. Фермы с соединениями на металлических зубчатых пластинах (МЗП) используются и в качестве несущих конструкций перекрытий [3].

Одним из способов соединения элементов ферм в узлах является запрессовка МЗП. Согласно ГОСТ Р 70069 — 2022 «Металлические зубчатые пластины для соединений элементов деревянных конструкций», МЗП – это соединительный элемент в виде

стальной пластины, который получается методом холодной штамповки и имеет с рабочей стороны систему острых металлических зубьев разной формы и длины, составляющих с ней одно целое и отогнутых под прямым углом относительно поверхности пластины.

Инженер из США Джон К. Джурейт 17 марта 1959 года получил патент [4] на МЗП и организовал производство. Начало производства деревянных конструкций с соединениями на МЗП в СССР в 1970-е гг. обострило вопрос разработки собственной методики расчета таких конструкций, а также конструирования МЗП в СССР. Результатом коллективного труда учёных и инженеров того времени, объединенных «ЦНИИСК им. Кучеренко», стали «Рекомендации по проектированию и изготовлению дощатых конструкций с соединениями на металлических зубчатых пластинах», утвержденные 23 ноября 1982 года. Документ описывал конструкции двух видов МЗП (МЗП-1,2; МЗП-2), методику расчета конструкций с использованием описанных пластин, указания по изготовлению МЗП и конструкций, защите и эксплуатации. Методика получила своё развитие в «Пособии по проектированию деревянных конструкций (к СНиП II-25-80)», которое уточнило требования к максимальной величине деформаций соединений на металлических пластинах всех типов в 1 мм, а для соединений на нагелях всех типов – в 2 мм. СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции» ограничивает деформации соединений на МЗП при полном использовании несущей способности величиной в 1,5 мм.

Основной объем выпускаемых в настоящее время МЗП на территории РФ имеет значительные отличия в конструкции по отношению к МЗП-1,2 и МЗП-2. Действующие в РФ стандарт на МЗП и испытания соединений с их применением ГОСТ Р 57157 — 2016 «Конструкции деревянные. Методы испытаний соединения на металлических зубчатых пластинах.» не содержат сведений о несущей способности. Потребность в этих данных, на фоне отсутствия стандартизированных отчетов в открытых источниках, вынуждает конструкторов и исследователей использовать сведения из отчетов об испытаниях по устаревшим методикам, либо прибегать к источникам и программному обеспечению из США, Канады, Швеции и др., методики расчета несущей способности которых имеют весомые отличия от действующих в РФ. Так. В работах [5, 6] рассмотрены натурные испытания стропильных ферм с соединениями на МЗП производства компании «МІТЕК». В исследовании [7] проведены испытания узлов фермы, выполненных с использованием МЗП «Техком», однако, сведения об использовании методики испытаний из государственного стандарта отсутствуют.

Использование численного моделирования работы древесины и соединений деревянных конструкций позволяет получать результаты расчета несущей способности конструкций с удовлетворительной точностью. Так, в статье [8] рассмотрена работа опорного узла фермы в рамках численного моделирования и аналитического решения. В результате максимальное расхождение составило около 25%. Коллектив авторов [9] выполнил верификацию упрощенной модели расчета несущей способности деревянно-монолитного перекрытия с несущими балками на МЗП и получил максимальные расхождения до 32,28% между значениями по результатам испытаний и численного моделирования. При исследовании работы CLT-панелей [10] удалось добиться точности моделирования в 6,2% по отношению к данным испытаний. При моделировании плоского прямого изгиба в рамках работы [11], погрешность составила 1%. Исходя из приведенных выше данных, можно сделать вывод о возможности численного моделирования работы соединений деревянных конструкций на МЗП с высоким уровнем достоверности в среде САЕ-пакета Ansys.

Цель и задачи исследования.

Цель данного исследования – проведение верификации моделей материалов стали и древесины в составе конечно-элементной модели соединения деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах путем сопоставления результатов численного моделирования с результатами натурных испытаний металлических зубчатых пластин, выполненных производителями и сторонними исследователями, необходимой для последующего использования в расчётах несущей способности соединений.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать расчетные модели соединений на МЗП;

2. Определить расчетные физико-механические характеристики для модели древесины в качестве ортотропного материала и стали в качестве нелинейного упруго-пластичного материала;

3. Сопоставить результаты численного моделирования с результатами имеющихся данных о несущей способности.

Объектом исследований является соединение деревянных элементов с строительных конструкций, выполненное посредством запрессовки МЗП. Предмет исследования – особенности численного моделирования НДС соединений на МЗП на примере образцов для стандартных испытаний.

## 2. Материалы и методы

Для численного моделирования испытаний используется метод конечных элементов, реализованный в САЕ-пакете «ANSYS 2023R1» [12]. Суть метода сводится к пространственной дискретизации твердых тел объемными элементами вида гексаэдров либо тетраэдров, для узлов каждого из которых в трехмерной системе координат XYZ формулируется соотношение (1), из которого следует, что вектор напряжений равен произведению вектора деформаций на матрицу податливости (2). Из полученного соотношения очевидно, что деформации равны частному от деления вектора напряжений на матрицу податливости (2).

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^{el}\} \quad (1)$$

$$\{\sigma\} = [\sigma_x \sigma_y \sigma_z \sigma_{xy} \sigma_{yz} \sigma_{xz}]^T$$

$$\{\varepsilon\} = [\varepsilon_x \varepsilon_y \varepsilon_z \varepsilon_{xy} \varepsilon_{yz} \varepsilon_{xz}]^T \quad (2)$$

$$\{\varepsilon^{el}\} = \{\sigma\}[D]^{-1} \quad (3)$$

$$[D]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\nu_{xy} & -\nu_{xz} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{yx}}{E_x} & \frac{1}{E_x} & \frac{\nu_{yz}}{E_x} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{yx}}{E_y} & \frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_y} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\nu_{zx}}{E_z} & \frac{\nu_{zy}}{E_z} & \frac{\nu_{yz}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} \end{bmatrix}$$

Где  $\{\sigma\}$  – вектор напряжений при температуре  $T$ , Па;  $\{\varepsilon\}$  – вектор относительных деформаций при температуре  $T$ ;  $T$  – температура, °С;  $[D]$  – матрица податливости;  $\nu$  – коэффициент Пуассона для соответствующего направления;  $E$  – модуль Юнга для соответствующего направления, Па;  $G$  – модуль сдвига для соответствующего направления, Па.

Для формирования конечно-элементных расчетных моделей соединений, исходя из требований стандарта на испытания и имеющихся сведений о несущей способности МЗП были выбраны три вида испытаний и одна конструкция МЗП.

- характеристика «нагрузка-скольжение» для определения прочности заделки соединения на МЗП при растяжении при расположении продольной оси МЗП вдоль волокон древесины и направлении усилия параллельно оси пластины;

- характеристика «нагрузка-скольжение» для определения прочности МЗП при растяжении при расположении продольной оси МЗП вдоль волокон древесины и направлении усилия параллельно оси пластины;

- характеристика «нагрузка-скольжение» для определения прочности МЗП при срезе при расположении продольной оси МЗП вдоль волокон древесины и направлении усилия параллельно оси пластины.

В отличие от более ранних исследований [13, 14], где стояла задача исследования влияния температуры и влажности, а конструкция МЗП была упрощена, для моделирования древесины в качестве ортотропного материала были применены данные о модуле Юнга и коэффициенте Пуассона для продольного (вдоль волокон) и поперечного (поперёк волокон) направлений древесины сосны класса прочности С14, отраженные в таблице В.3 приложения В СП64 «Деревянные конструкции». Сырьем для изготовления МЗП служит прокат стали (08Ю, 08КП, 08 ПС), смотанный в рулоны, ширина которых соответствует, либо кратна ширине изделия. Требования к механическим характеристикам данных марок стали варьируются в широких пределах. В рамках исследования [15], при испытании стали марки 08КП установлено, что предел текучести материала составляет 170 МПа, предел прочности 295 МПа, относительное удлинение 35%.

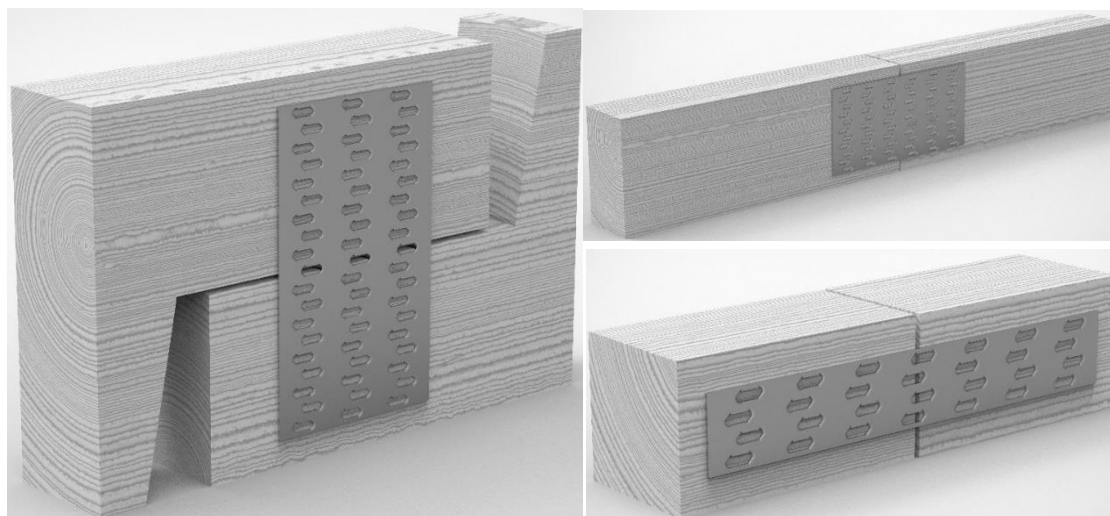


Рис. 1 Моделируемые образцы соединений (слева – срез, справа сверху – растяжение соединения, справа снизу – растяжение МЗП) (иллюстрация автора)

Fig. 1 Simulated samples of joints (on the left – a slice, at the right top – stretching of the joint, at the right bottom – stretching of the plate) (illustration by the author)

Характеристики испытанного материала соответствуют требованиям стандарта на МЗП. Чтобы при численном моделировании обеспечить упруго-пластическое поведение материала, будет использована модель билинейного изотропного упрочнения. С помощью уравнения Рамберга-Осгуда (4) выполним аппроксимацию [16] графика напряжения-деформации из двух прямых.

$$E_t = \frac{E\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.2} + 0.002nE\left(\frac{\sigma_t}{\sigma_{0.2}}\right)^{n-1}} = 1948 \text{ МПа} \quad (4)$$

$$n = \frac{\ln 20}{\ln(\sigma_{0.2}/\sigma_{0.01})} = 1,41$$

где  $E_t$  – модуль тангенса угла наклона аппроксимирующей кривой в области за пределом текучести, Па;  $\sigma_{0.2}$  – предел текучести материала, Па;  $\sigma_t$  – предел прочности материала, Па;  $\sigma_{0.01}$  – напряжения при относительной деформации, равной 0,01%, Па;  $n$  – параметр Рамберга-Осгуда.

Используемая модель упруго-пластического материала обладает достаточной точностью при величине относительных деформаций до 10%, это обусловлено постоянным углом наклона кривой напряжения-деформации выше предела текучести.

В соответствии с [3], предельными деформациями соединения при исчерпани несущей способности будем считать величину 1,5 мм. Усилия, при которых возникает данная деформация будем использовать в качестве расчетного для определения несущей способности.

При обработке данных численного моделирования для определения характеристик несущей способности МЗП будем использовать формулы, указанные в ГОСТ Р 57157 — 2016 для соответствующих видов испытаний. Так как согласно ГОСТ 19904 — 90 «Прокат листовой холоднокатаный.» предельные отклонения по толщине для сырья при изготовлении МЗП составляют  $\pm 0,11$  мм, а рекомендуемая толщина защитного цинкового покрытия 17 мкм, принимаем расчетную толщину МЗП 0,873 мм. Безразмерный параметр принимаем равным 0, ввиду того, что модель древесины является однородной и обладает постоянной плотностью, отношение плотности элемента в котором произошло разрушение к нормативной плотности древесины, по указанной причине принимаем равным 1, размеры МЗП приведены в таблице 1. Прямое моделирование испытаний соединений на МЗП, а не элементов конструкций, позволит повысить точность сопоставления и более качественно верифицировать модели материалов. Точки для определения деформаций при моделировании определим исходя из рекомендаций стандарта на испытания

Таблица 1

Размеры МЗП, мм	Вид испытания		
	Растяжение МЗП: $\alpha=0^\circ; \beta=0^\circ$	Срез МЗП: $\alpha=0^\circ; \beta=0^\circ$	Растяжение соединения: $\alpha=0^\circ; \beta=0^\circ$
Длина	172.25	76.25	148.25
Ширина	27	128.25	74.25
Толщина	1	1	1
Зазор	2	2	2

### 3. Результаты и обсуждение

Данные о полученных значениях несущей способности моделируемых соединений приведены в таблице 2, в которой также приведены значения несущей способности аналогичных по конструкции и близких по размерным параметрам МЗП (GNA-20S, MT-20, GP-01) полученные при сертификационных испытаниях в Швеции (Дании) [17], Канаде [18], по данным испытаний в РФ. С индексом 1 приведены данные расчёта для стали с характеристиками, аналогичными сертификационным образцам.

Графики «нагрузка-скольжение», полученные в результате обработки результатов численного моделирования приведены на рисунке 2.

Для определения длительной несущей способности при растяжении соединения, в Европейских странах используются коэффициенты безопасности  $K=1.43$  для несущей способности непосредственно МЗП,  $K=1.64$  для несущей способности соединений деревянных конструкций на МЗП. В РФ используются подходы, изложенные в рекомендациях по испытанию соединений деревянных конструкций ЦНИИСК им. Кучеренко, которые предусматривают соединений на МЗП величины  $K=1.3$  и более, которые вычисляются по формуле (5) в зависимости от продолжительности испытаний  $t$  в секундах. Так, для испытаний [19]  $K=2,52$ .

(5)

$$K_n = 1.38(1.94 - 0.11 \log_{10} t)$$

При моделировании растяжения МЗП наиболее нагруженной зоной, в которой достигаются напряжения предела текучести стали, является сечение над зазором между деревянными элементами, которое является наиболее ослабленным. Такая модель поведения образца полностью соответствует требованиям стандарта на испытания. Полученная величина несущей способности, с учетом характеристик моделируемой стали (приведена в таблице в скобках), примерно, на 14% ниже по отношению к результатам испытаний в Швеции и Канаде и на 25% выше значений испытаний, поведенных в РФ.

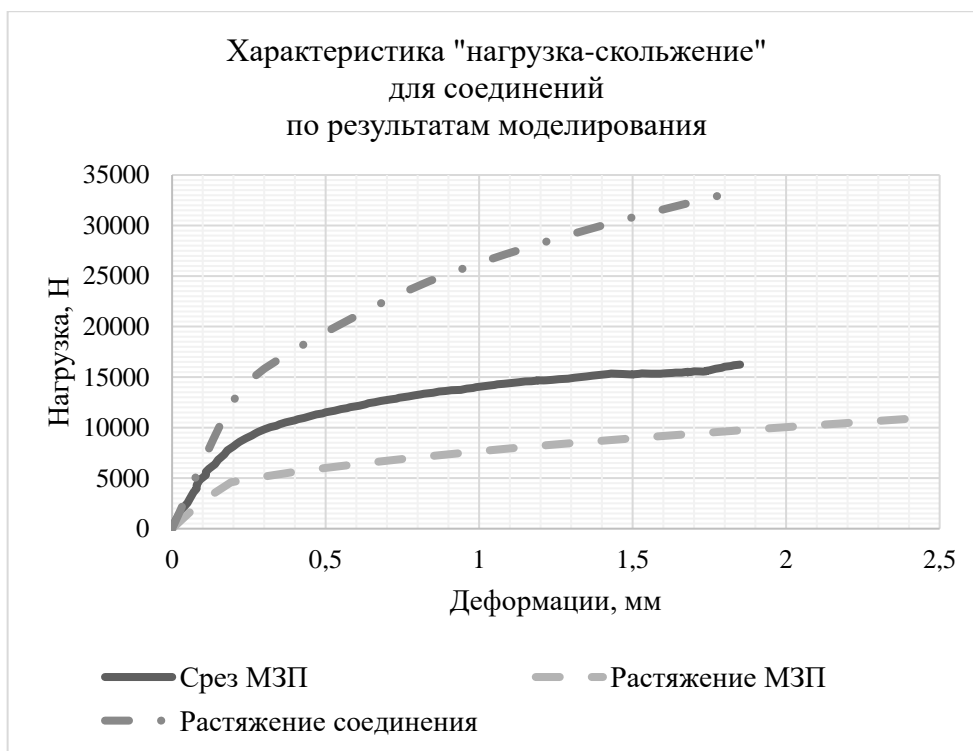


Рис. 2 Диаграмма «нагрузка-скольжение» по результатам моделирования (иллюстрация автора)

Fig. 2 "Load-slip" diagram based on the simulation results (illustration by the author)

Численная модель испытаний по определению несущей способности МЗП (Рис. 3) на срез отлично согласуется с данными сертификационных испытаний в Швеции и Канаде, при этом относительно [19] несущая способность в 2,5 раза выше. Что, возможно, свидетельствует о применении ранее указанного коэффициента безопасности  $K=2,52$  при обработке результатов испытаний, однако в источнике механизмы расчета полностью не описаны.

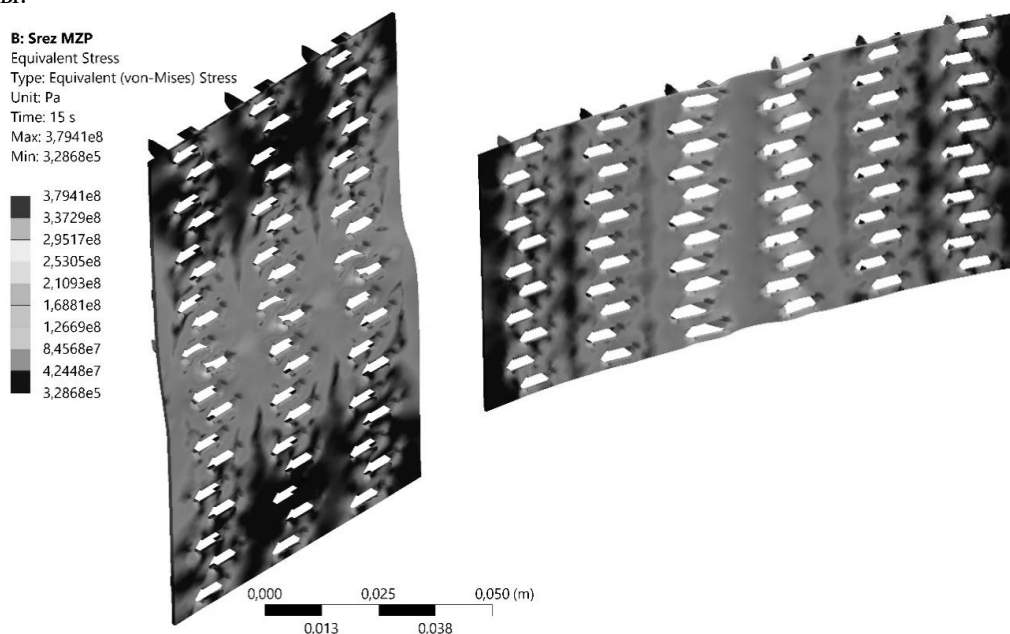


Рис. 3 Напряженно-деформированное состояние МЗП по результатам моделирования (слева - срез, справа – растяжение соединения) (иллюстрация автора)

Fig. 3 The stress-strain state of the nail plate according to the results of modeling (on the left - a slice, on the right – tension of connection) (illustration by the author)

Также отклонения могут быть вызваны особенностями образца для испытаний (использована отличная от моделируемой схема), а также разброс параметров стали и древесины. Основные напряжения сосредоточены на линии среза, от которой они с постепенным снижением величины распространяются в диагональном направлении.

Отличие несущей способности численной модели соединения для испытаний соединения на растяжение в большую сторону от результатов сертификационных испытаний Канады на 22% обусловлено большей толщиной моделируемой МЗП (1 мм против 0,914), а также особенностью подсчета эффективной площади. С применением коэффициента безопасности из испытаний [19], отличие от результатов испытаний составляет 4%. Напряжения присутствуют, практически, по всей площади МЗП с убыванием от места стыка деревянных элементов, как и рекомендует стандарт испытаний. Полученные результаты численного моделирования отличаются высокой точностью и могут быть использованы при конструировании, а также при изучении характера работы соединений на МЗП.

Таблица 2

Данные о несущей способности МЗП

Вид несущей способности	По результатам моделирования	По данным серт. испытаний (Швеция)	По результатам исследования	По данным серт. испытаний (Канада)	По данным испытаний (РФ)
Толщина МЗП	1	н/д	1	0.914	1
Растяжение МЗП (Н/мм): $\alpha=0^\circ; \beta=0^\circ$	144.564 (243.15) <sup>1</sup>	268	283	174	115
Срез МЗП (Н/мм): $\alpha=0^\circ; \beta=0^\circ$	87.346	89	120	83	35
Растяжение соединения (Н/мм <sup>2</sup> ): $\alpha=0^\circ; \beta=0^\circ$	2.897	1.1872	1.371	2.37	1.2

Следует отметить, что при испытаниях в разной местности используются различные породы древесины, прочностные характеристики которых изменяются в широком диапазоне [20]. Характер деформаций соответствует соединениям деревянных конструкций, выполненных с использованием стальных цилиндрических нагелей [21], кривые деформаций не имеют ярко выраженных скачков. Наличие методики расчета соединений на МЗП позволяет избежать при испытаниях и моделировании незапланированного исчерпания несущей способности, примером которого может служить хрупкое разрушение образца 2 из [22].

#### 4. Заключение

1. Полученные в результате численного моделирования данные коррелируют с результатами экспериментальных исследований.

2. Модель билинейного упрочнения стали в области допустимых деформаций соединений элементов деревянных конструкций на МЗП адекватно описывает поведение материала.

В дальнейшем, для моделирования циклических нагрузений рассматриваемых соединений целесообразно рассмотреть для материала древесины модель с накоплением повреждений, что позволит добиться более точного моделирования деформаций древесины в пластической стадии работы.



**Список литературы / References**

1. Котлов В. Г. Металлические зубчатые пластины в пространственных деревянных конструкциях: преимущества и перспективы использования // Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2020. – 190 с. [Kotlov V. G. Nail plates in spatial wooden structures: advantages and prospects of use: monograph / Kotlov V.G. // Yoshkar-Ola: Volga State Technological University, 2020. – 190 p.]
2. Котлов В.Г., Кузнецова Ю.А. Расчет эффективности использования металлических зубчатых пластин для соединения дощатых ферм // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2019. – № 3. – С. 69-80. – EDN NBIFVF. [Kotlov V. G., Kuznetsova Yu. A. Calculation of the efficiency of using nail plates for connecting plank farms // Bulletin of Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies. – 2019. – No. 3. – P. 69-80. – EDN NBIFVF.]
3. Сахаров А.А., Чмаркова С.В. Применение комбинированных балок перекрытия в малоэтажном строительстве // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство и строительные технологии: Сборник статей 79-ой всероссийской научно-технической конференции, Самара, 18–22 апреля 2022 года / Под редакцией М.В. Шувалова, А.А. Пищулева, А.К. Стрелкова. – Самара: Самарский государственный технический университет, 2022. – С. 105-109. – EDN AKQDIA. [Sakharov A.A., Chmarkova S.V. The use of combined floor beams in low-rise construction // Traditions and innovations in construction and architecture. Construction and Construction Technologies: Collection of articles of the 79<sup>th</sup> All-Russian Scientific and Technical Conference, Samara, April 18-22, 2022 / Edited by M.V. Shuvalov, A.A. Pishchulev, A.K. Strelkov. – Samara: Samara State Technical University, 2022. – P. 105-109. – EDN AKQDIA.]
4. Connector: patent US2877520A decl. 1956-09-12; publ. 1959-03-17
5. Жидков К.Е., Зверев В.В., Капырин Н.В. Экспериментальные натурные исследования деревянных ферм на металлических зубчатых пластинах // Строительная механика и конструкции. – 2021. – № 4(31). – С. 90-98. – DOI 10.36622/VSTU.2021.31.4.008. – EDN RLGOFG. [Zhidkov K.E., Zverev V.V., Kapurin N.V. Experimental field studies of wooden trusses on nail plates // Construction mechanics and structures. – 2021. – № 4(31). – P. 90-98. – DOI 10.36622/VSTU.2021.31.4.008. – EDN RLGOFG.]
6. Габриелян Г.Е. и др. Конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния несущей системы деревянного здания // Строительная механика и конструкции. – 2018. – № 1(16). – С. 116-124. – EDN YSLUJO. [Gabrielyan G.E. Finite element modeling of the stress-strain state of the bearing system of a wooden building // Construction mechanics and structures. – 2018. – № 1(16). – P. 116-124. – EDN YSLUJO.]
7. Селютина Л.Ф., Емельянова Н.В. Экспериментально-теоретические исследования дощатых ферм с узловыми соединениями на металлических зубчатых пластинах // Региональная архитектура и строительство. – 2019. – № 3(40). – С. 120-129. – EDN LNYEXU. [Selyutina L.F., Yemelyanova N.V. Experimental and theoretical studies of plank trusses with nodular joints on metal toothed plates // Regional architecture and construction. – 2019. – № 3(40). – P. 120-129. – EDN LNYEXU.]
8. Paiva Lucas, Braz César Manuel, Paula, António. (2020). Numerical Analysis of Load Distribution in Joint Lines with Punched Metal Plate Fasteners. KnE Engineering. 10.18502/keg.v5i6.7023.
9. Rogainis Agris, Serdjuks Dmitrijs, Buka-Vaivade Karina, Akishin Pavel, Sahmenko Genadijs, Briuka Elza, Lapkovskis, Vjaceslavs (2024). Verification of a Simplified Design Method for Timber–Concrete Composite Structures with Metal Web Timber Joists. Applied Sciences. 14. 1457. 10.3390/app14041457.
10. Dobeš Pavel, Lokaj Antonín, Vavrušová, Kristýna. (2023). Stiffness and Deformation Analysis of Cross-Laminated Timber (CLT) Panels Made of Nordic Spruce Based on

- Experimental Testing, Analytical Calculation and Numerical Modeling. Buildings. 13. 200. 10.3390/buildings13010200.
11. Amaruddin, Haslin & Hassan, R.. (2022). 3d finite element analysis of a wood dowel in bending perpendicular to the grain. Vol 5, No 1. P. 69-76.
  12. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference Release 2021 R1 /ANSYS, Inc // 2021 – 962 p.
  13. Котлов В.Г., Шарынин Б.Э. Разработка модели материала древесины для конечно-элементного анализа строительных конструкций (Часть 1) // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2018. – № 2. – С. 58-63. – EDN YQNYDB. [Kotlov V.G., Sharynin B.E. Development of a model of wood material for finite element analysis of building structures (Part 1) // Bulletin of Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies. - 2018. – No. 2. – P. 58-63. – EDN YQNYDB]
  14. Котлов В.Г., Шарынин Б.Э. Разработка модели материала древесины для конечно-элементного анализа строительных конструкций (часть 2) // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2019. – № 4. – С. 19-24. – DOI 10.25686/2542-114X.2019.4.19. – EDN FSYHLK. [Kotlov V.G., Sharynin B.E. Development of a model of wood material for finite element analysis of building structures (part 2) / V. G. Kotlov, B. E. Sharynin // Bulletin of Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies. – 2019. – No. 4. – P. 19-24. – DOI 10.25686/2542-114X.2019.4.19. – EDN FSYHLK]
  15. Шинкарев А.С. и др. Опыт прокатки многослойных листов на основе композиции сталей 08КП и У8 // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2016. – № 9. – С. 1-10. – DOI 10.7463/0916.0846195. – EDN XBGBWL [Shinkarev A.S. et al. The experience of rolling multilayer sheets based on the composition of 08KP and U8 steels // Science and Education: scientific edition of Bauman Moscow State Technical University. – 2016. – No. 9. – P. 1-10. – DOI 10.7463/0916.0846195. – EDN XBGBWL]
  16. Sergio Schneidera , Sandra Giacomini Schneidera, Helena Marques da Silvab, Carlos de Moura Netob Study of the Non-Linear Stress-Strain Behavior in Ti-Nb-Zr Alloys // Faculdade de Engenharia Química de Lorena b ITA, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2005. – 4 p.
  17. / Ellegaard, P. Analysis of Timber Joints With Punched Metal Plate Fasteners: With Focus on Knee Joints. // Ph.D. thesis, Aalborg University (Denmark), 2002. – 255 p.
  18. Evaluation Listing CCMC 11996-L MT20 /National Research Council of Canada// 2018-03-12
  19. Isupov, S.A., Chaganov A.B. Strength and stiffness of wood structures for compounds of gang nail plate «Steelcap» // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering: International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety, Chelyabinsk, September 25–27, 2019. Vol. 687, 3. – Chelyabinsk: Institute of Physics Publishing, 2019. – P. 033015. – DOI 10.1088/1757-899X/687/3/033015. – EDN ZPCVQE.
  20. Peter Niemz, Alfred Teischinger, Dick Sandberg Springer Handbook of Wood Science and Technology // Springer Nature Switzerland AG, 2023 – 2063 p. – DOI 10.1007/978-3-030-81315-4
  21. Зиннуров Т.А., Новицкий Е.В. Определение прогиба составных деревянных изгибаемых элементов, армированных цилиндрическими полимеркомпозитными нагелями // Вестник МГСУ. – 2023. – Т. 18, № 5. – С. 697-708. – DOI 10.22227/1997-0935.2023.5.697-708. – EDN RTOQXE. [Zinnurov T.A., Novitsky E.V. Determination of deflection of composite wooden bent elements reinforced with cylindrical polymer composite dowels // Bulletin of MGSU. – 2023. – Vol. 18, No. 5. – P. 697-708. – DOI 10.22227/1997-0935.2023.5.697-708. – EDN RTOQXE]
  22. Кузнецов И.Л., Гимранов Л.Р. Новый узел соединения деревянных элементов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия:

Материалы. Конструкции. Технологии. – 2020. – № 2. – С. 62-69. – DOI 10.25686/2542-114X.2020.2.62. – EDN AIDA AV. [Kuznetsov I.L., Gimranov L.R. A new junction of wooden elements // Bulletin of Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies. - 2020. – No. 2. – P. 62-69. – DOI 10.25686/2542-114X.2020.2.62. – EDN AIDA AV.]

#### Информация об авторах

**Шарынин Богдан Эдуардович**, аспирант, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола, Российская Федерация  
*E-mail: bogdan.sharynin@yandex.ru, ORCID: 0009-0001-7600-3668*

#### Information about the authors

**Bogdan E. Sharynin**, post-graduate student, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, Russian Federation  
*E-mail: bogdan.sharynin@yandex.ru, ORCID: 0009-0001-7600-3668*