

Сюй Юнь

**ПОВЫШЕНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ
ЭЛЕМЕНТОВ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ
НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАКЛАДКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ЗУБЧАТОЙ ПЛАСТИНЫ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2015

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Глухих Владимир Николаевич

Официальные оппоненты: **Лабудин Борис Васильевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Архангельский государственный
технический университет», кафедра инженерных
конструкций и архитектуры, профессор;

Бойтемиров Фарид Азисович,
кандидат технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Московский государственный
строительный университет», кафедра конструкций
из дерева и пластмасс, профессор

Ведущая организация: **АО НИЦ «Строительство», г. Москва**

Защита диссертации состоится 2 июля 2015 г. в 16⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.03** при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте www.spbgasu.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
профессор



Кондратьева Лидия Никитовна

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. В современных экономических условиях значительный прирост объемов жилищного и промышленного строительства в мире обеспечивается за счет малоэтажного и многоэтажного деревянного домостроения. Использование современных строительных технологий, строительных материалов на основе древесины позволяет сократить сроки строительства, энергозатраты, снизить себестоимость сборки объекта.

В мире широко используются различные виды крепежа элементов деревянных конструкций, позволяющие сократить время сборки и обеспечивающие надежность конструкций. Наиболее широкое развитие и применение в деревянном домостроении получили нагельные соединения. В мировой практике появились безнагельные соединения на металлических накладках типа *SHERPA*, одним из положительных качеств которых является оснащение деталями крепежа элементов деревянных конструкций при их изготовлении на заводе-изготовителе. Отпадает необходимость монтажа элементов крепежа на строительной площадке.

Крепеж на металлических накладках типа *SHERPA* состоит из двух алюминиевых деталей, которые образуют жесткое соединение по принципу классического «ласточкина хвоста» и крепятся к деревянным конструктивным элементам с помощью шурупов. Такое соединение может быть применено для монтажа балконов, лестниц, элементов дизайна интерьера, мебели, деревянных конструкций, коммерческого строительства, жилых и не жилых зданий, мостов, перекрытий и т. д. Эта очень удобная и эффективная система соединения, позволяющая значительно сократить срок сборки.

Опыт использования подобных соединений за рубежом показывает, что их несущая способность не всегда удовлетворяет требованиям практики строительства. Невысокая несущая способность определяется невысокой прочностью древесины на смятие по сравнению с прочностью металлических накладок. В современной литературе не имеется сведений об использовании крепежа с металлическими накладками в деревянных конструкциях стеновой панели из поперечно-клеёной древесины (*CLT*) и балок, выполненных из поперечно-клеёной древесины и бруса из клееного шпона (*LVL*). Не исследовано применение и определение несущей способности такого соединения в деревянных конструкциях стеновой панели и балки, не разработан алгоритм для аналитического расчёта несущей способности. Несущая способность соединения определяется совокупностью сопротивлений металлических накладок растяжению-сжатию, смятию древесины, выдергиванию и срезу шурупов. Напряжение смятия можно уменьшить за счёт увеличения поверхности смятия. Это может быть достигнуто за счёт введения в конструкцию крепежа дополнительной металлической зубчатой пластины (МЗП), благодаря которой происходит перераспределение усилий, воспринимаемых каждым элементом соединения. За счет уменьшения напряжений смятия можно значительно повысить несущую способность соединения. Выполненные исследования позволили обосновать основное направление совершенство-

вания конструкции соединения с разработкой методики определения его несущей способности. Учитывая потребности строительства, одним из перспективных направлений научных исследований является разработка высокоэффективного соединения с высокой несущей способностью.

В связи с этим повышение несущей способности безнагельных высокоэффективных соединений деревянных элементов на металлических накладках является одной из **актуальных** задач строительной отрасли.

Степень разработанности проблемы. Наиболее широкое развитие и применение в деревянных домостроениях получили нагельные соединения благодаря значительному вкладу в их разработку, исследование известных российских учёных Б. Л. Николаи, В. Ф. Иванова, А. Я. Найчука, В. В. Большакова, А. В. Павлика, Г. Г. Никитина, В. А. Кононова, Ю. В. Пискунова, А. Г. Черных и других. Теория расчёта нагельных соединений основывалась на модели балки на упругом основании, в разработку теории расчёта которой внесли крупный вклад отечественные учёные А. Н. Крылов, Н. Л. Снитко, А. Н. Динник, А. А. Уманский, Н. П. Пузыревский и другие. Вопросами разработки метода расчёта прочности и деформации соединений элементов с использованием металлической зубчатой пластины занимались учёные Г. П. Албаут, М. В. Табанюхова, А. М. Дурновский, В. Г. Котлов, А. В. Крицин, Д. В. Лоскутова, А. К. Наумов. В работах П. А. Дмитриева, В. В. Пуртова и Г. Г. Карлесена проведено исследование прочности соединений деревянных элементов на смятие в дюбелях или нагельных соединениях. В научной монографии российских учёных В. Н. Глухих, А. Г. Черных подобно рассмотрены вопросы анизотропии усушки, упругих характеристик древесины, сопротивляемости предотвращению поперечного коробления пиломатериалов в процессе сушки. Проф. Б. В. Лабудин исследовал соединения деревянных конструкций композиционным материалом на основе эпоксидной матрицы и стеклоткани. Совместную работу вклеенных стальных стержней в деревянных конструкциях исследовал российский учёный Ф. А. Бойтемиров. В ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко А. А. Погорельцевым был выполнен расчёт растянутых стыков КДК на вклеенных стержнях. Расчётом большепролетных клееных деревянных конструкций, их надёжностью и безопасностью занимался известный российский учёный проф. Е. Н. Серов.

Известны зарубежные исследования соединений элементов деревянных конструкций на металлических накладках типа *SHERPA: T. Bogensperger, F. Hude, Manfred. Augustin, Georg. Flatscher, DI. Hanns. Schinner* и др. Методике использования металлической зубчатой пластины для повышения несущей способности нагельных соединений посвящены работы известных учёных *KevarinmdkiBlaЯ. H. J. Schmid. M., Werner. Johansen* и др. В последние годы многоэтажные деревянные здания из стеновых панелей из поперечно-клееной древесины с использованием соединений на металлических накладках были построены в Германии, Австрии и др. Аналитические и экспериментальные исследования безнагельных соединений элементов деревянных конструкций из поперечно-клееной древесины проведены в работах зарубежных учёных:

Schickhofer., Plieschounig St., Brandner R., BlaЯ H.J., Uibel T., Strassmann B., Pirnbacher G., Frese M., Fellmoser P., BlaЯ H.J., Hьbner U. В соответствии с такими нормами как, СП 64-13330-2011, *ЦNORM EN 1995-1-1:2009, DIN 1052:2008, SIA 265:2003* предложены методики и формулы расчёта несущей способности шурупа на срез в соединениях деревянных элементов из древесины и бруса из клееного шпона. При этом до настоящего времени методика расчёта безнагельных соединений с повышенной несущей способностью с применением металлической зубчатой пластины не разработана.

Цель исследования: Повышение несущей способности соединений элементов деревянных конструкций на металлических накладках с использованием металлической зубчатой пластины.

Задачи исследования:

1. Анализ и сопоставление экспериментальных и аналитических результатов расчёта несущей способности шурупа на выдергивание и срез по различным методикам.

2. Теоретические и экспериментальные исследования несущей способности соединения по критериям сопротивления шурупа при изгибе и прочности древесины при смятии в гнезде под шурупы.

3. Теоретические и экспериментальные исследования несущей способности соединения на металлических накладках в деревянных конструкциях стеновой панели из поперечно-клееной древесины и балок, выполненных из поперечно-клеёной древесины и бруса из клееного шпона без укрепления и с металлической зубчатой пластиной по критериям сопротивления шурупов на выдергивание и срез.

4. Обоснование эффективности использования металлической зубчатой пластины для повышения несущей способности соединения на металлических накладках.

5. Теоретическое исследование коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки на несущую способность соединения без укрепления и с металлической зубчатой пластиной.

6. Анализ численного исследования по МКЭ с использованием программы *Ansys 15.0* для проверки достоверности экспериментальных данных по определению напряженно-деформированного состояния соединения элементов деревянных конструкций с помощью тензодатчиков.

Объект исследования: Соединения элементов деревянных конструкций на металлических накладках без укрепления и с металлической зубчатой пластиной.

Предмет исследования: Несущая способность соединений на металлических накладках без укрепления и с металлической зубчатой пластиной с учётом сопротивления шурупов на выдергивание и срез, коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Впервые разработана оригинальная конструкция соединения деревянных элементов на основе металлических накладок с использованием металлической зубчатой пластины;

2. Разработана математическая модель аналитического расчёта несущей способности соединения на металлических накладках без укрепления и с металлической зубчатой пластиной в деревянных конструкциях стеновой панели из поперечно-клееной древесины и балок, выполненных из поперечно-клеёной древесины и бруса из клееного шпона по критериям сопротивления шурупов на выдергивание и срез;

3. Усовершенствован метод аналитического расчёта несущей способности соединения на металлических накладках при поперечных смещениях металлических накладок;

4. Предложена математическая модель аналитического расчёта коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки;

5. Результаты новых экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния и прочности соединения деревянных элементов на металлических накладках;

6. Результаты численных исследований по МКЭ с использованием программы *Ansys 15.0* по определению напряженно-деформированного состояния соединения на металлических накладках;

Методологической основой диссертационного исследования явилось использование математического моделирования, методов сопротивления материалов и строительной механики, методики конечных элементов и разработанной экспериментальной методики.

Личный вклад соискателя. Постановка задачи и новые результаты диссертационной работы принадлежат лично автору. Все работы были опубликованы в научной печати без соавторов.

Область исследования соответствует паспорту специальности 05.23.01–Строительные конструкции, здания и сооружения, п. 3 «Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований вновь возводимых, восстанавливаемых и усиливаемых строительных конструкций наиболее полно учитывающих специфику воздействий на них, свойства материалов, специфику конструктивных решений и другие особенности».

Достоверность результатов исследований обеспечивается корректным использованием основных положений теории строительных конструкций и гипотез, основанных на статистической обработке полученных экспериментальных данных и установленных аналитических зависимостей. Применением сертифицированных лабораторных приборов и установок в механической лаборатории СПбГАСУ, с использованием современных средств регистрации исследуемых параметров. Правильность расчетов подтверждена результатами испытаний соединений на металлических накладках по критериям сопротивления шурупов на выдергивание и срез. Для расчётов и обработки данных использовались программы *Microsoft Excel, Origin pro, IBM SPASS Statistics, Mathcad u Ansys 15.0*.

Практическое значение диссертационной работы заключается в том, что результатом являются предложение новой более эффективной конструкции соединения деревянных элементов на основе металлических накладок с использо-

ванием металлической зубчатой пластины, обоснованные методики испытаний и расчёта соединений элементов деревянных конструкций стеновой панели и балок в соответствии с СНиП 64.13330.2011 и отечественных материалов, которые расширяют область применения и повышают надёжность и безопасность конструирования большепролетных конструкций с использованием металлической зубчатой пластины и предложенной математической модели.

Апробация. Основные результаты диссертационной работы представлены и доложены на:

1. *V* Международный съезд по деревянному строительству СПбГАСУ (Санкт-Петербург, декабрь 2011 г.);

2. *I* Международный конгресс студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов, посвященный 180-летию СПбГАСУ «Актуальные проблемы современного строительства» СПбГАСУ (Санкт-Петербург, 2011 г.);

3. Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов «Актуальные проблемы строительства и архитектуры» СПбГАСУ (Санкт-Петербург, 2012 г.);

4. *VI* Международный съезд по деревянному строительству МГСУ (Москва, декабрь 2012 г.);

5. Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы современного строительства и пути эффективного решения» СПбГАСУ (Санкт-Петербург, октябрь 2012 г.);

6. *II* Международный конгресс студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов «Актуальные проблемы современного строительства» СПбГАСУ (Санкт-Петербург, 2013 г.);

Публикации. По теме диссертации опубликованы 6 работ, в том числе 6 работ в журналах, входящих в перечень ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем работы 198 страниц машинописного текста, 107 рисунков и 55 таблиц. Список литературы состоит из 111 наименований, в том числе 45 – на иностранных языках.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются задачи исследований, приводятся основные положения диссертации, которые выносятся на защиту, обосновывается их научная новизна. Сформулированы цели и задачи исследований.

В первой главе приведены общие сведения из истории развития соединения на металлических накладках типа *SHERPA*, сравнение с различными соединениями, традиционный и зарубежный опыт применения такого соединения в деревянных домостроениях.

Во второй главе рассмотрены физико-механические и геометрические характеристики соединения на металлических накладках при растяжении, сжатии и срезе по трем взаимно перпендикулярным осям. Представлено исследование по разработанной математической модели расчёта по критериям сопротивления шурупа на выдергивание и срез без укрепления и с металлической зубчатой пла-

стиной в клееных деревянных элементах; несущей способности соединения по критериям сопротивления шурупов на выдергивание и срез без укрепления и с металлической зубчатой пластиной; коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки; напряженно-деформированного состояния соединения деревянных элементов на металлических накладках.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям определения несущей способности шурупов на выдергивание и срез без укрепления и с металлической зубчатой пластиной; соединения по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез без укрепления и с металлической зубчатой пластиной; напряженно-деформированного состояния деревянных элементов с металлическими накладками. Представлена методика проведения экспериментов, спроектированы и изготовлены испытательные стенды для проведения экспериментов и режимы нагружения.

Четвертая глава содержит сравнительный анализ теоретических и экспериментальных результатов. Автором предложена математическая модель для аналитического расчёта несущей способности соединения на металлических накладках без укрепления и с металлической зубчатой пластиной. Усовершенствован метод для аналитического расчёта несущей способности соединения при поперечных смещениях металлических накладок, а также коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки. Обоснована возможность проектирования и расчёта несущей способности соединения на металлических накладках по МКЭ с использованием программы *Ansys 15.0*.

В заключении сформулированы основные результаты, выводы и рекомендации по применению в строительных конструкциях.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Впервые разработана оригинальная конструкция соединения деревянных элементов на основе металлических накладок с использованием металлической зубчатой пластины

Классическое соединение типа «ласточкина хвоста» Австрийской фермы *SHERPA* состоит из двух алюминиевых деталей, которые образуют жесткое соединение и крепятся к деревянным конструктивным элементам из поперечно-клеёной древесины (CLT) и бруса из клееного шпона (LVL) с помощью шурупов. С учётом комбинации шурупов с металлическими накладками соединительная система содержит в себе достоинства: удобство и быстрота сборки; высокий уровень предварительной сборки на заводе; более высокая прочность соединения, воспринимающая нагрузку до 280 кН; безопасность и надежность, обеспечиваемая общестроительным сертификатом; многофункциональность. С учётом недостатка такого соединения (относительная нижняя несущая способность и дорогая затрата изготовления), мы предложили новую конструкцию соединения на основе металлических накладок с укреплением металлической зубчатой пластиной

(МЗП). Достоинства новой конструкции – повышение несущей способности на 31,15 % и снижение затраты на изготовление соединений на 4000 руб. на 1 шт.

2. Разработана математическая модель аналитического расчёта несущей способности соединения на металлических накладках без укрепления и с металлической зубчатой пластиной в деревянных конструкциях стеновой панели из поперечно-клееной древесины и балок, выполненных из поперечно-клеёной древесины и бруса из клееного шпона по критериям сопротивления шурупов на выдергивание и срез

Несущая способность соединения с металлическими накладками на растяжение, сжатие и срез по трем взаимно перпендикулярным осям обусловлена сопротивлением шурупов на выдергивание и срез, которыми крепятся металлические накладки деревянным элементам (стеновая панель и балка). Результаты аналитических исследований в соответствии с различными нормами и научными исследованиями (рис. 1 и 2) позволяют создать новую математическую модель определения несущей способности соединения.

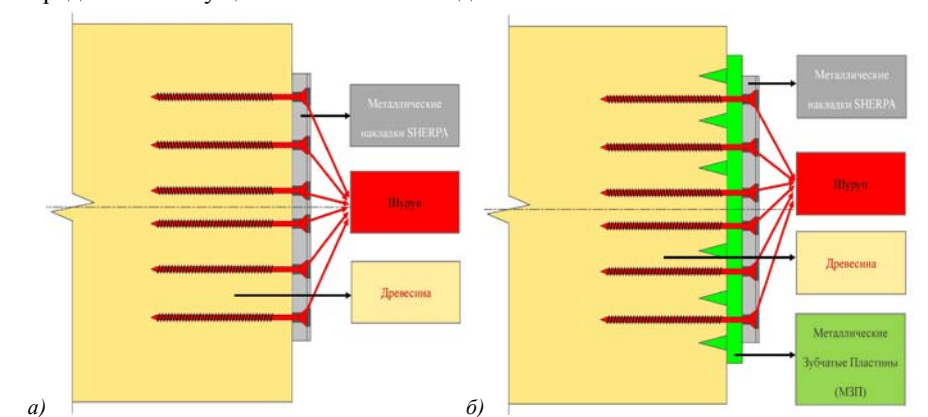


Рис. 1. Конструктивная схема соединения деревянных элементов на металлической накладке и шурупов: а – без укрепления МЗП; б – с укреплением МЗП

С учётом сопротивления шурупа при изгибе и прочности древесины при смятии в гнезде под шурупы могут быть обусловлены виды разрушения в боковом соединении. Модели разрушения с использованием МЗП (см. рис. 1) на основе теории *Johansen* за пределами упругой области показаны, как:

- модель разрушения *I* – разрушение деревянного элемента за счёт смятия при прочности шурупа при изгибе выше, чем прочность древесины при смятии в гнезде под шурупы;
- модель разрушения *II* – разрушение локализованного отверстия древесины за счёт смятия при повороте шурупа в плоскости среза;
- модель разрушения *III* – пластическая деформация шурупа при изгибе с образованием одного пластического шарнира в плоскости среза и смятие деревянного элемента;

- модель разрушения *IV* – пластическая деформация шурупа при изгибе с образованием двух пластических шарниров в плоскости среза и смятие деревянного элемента.

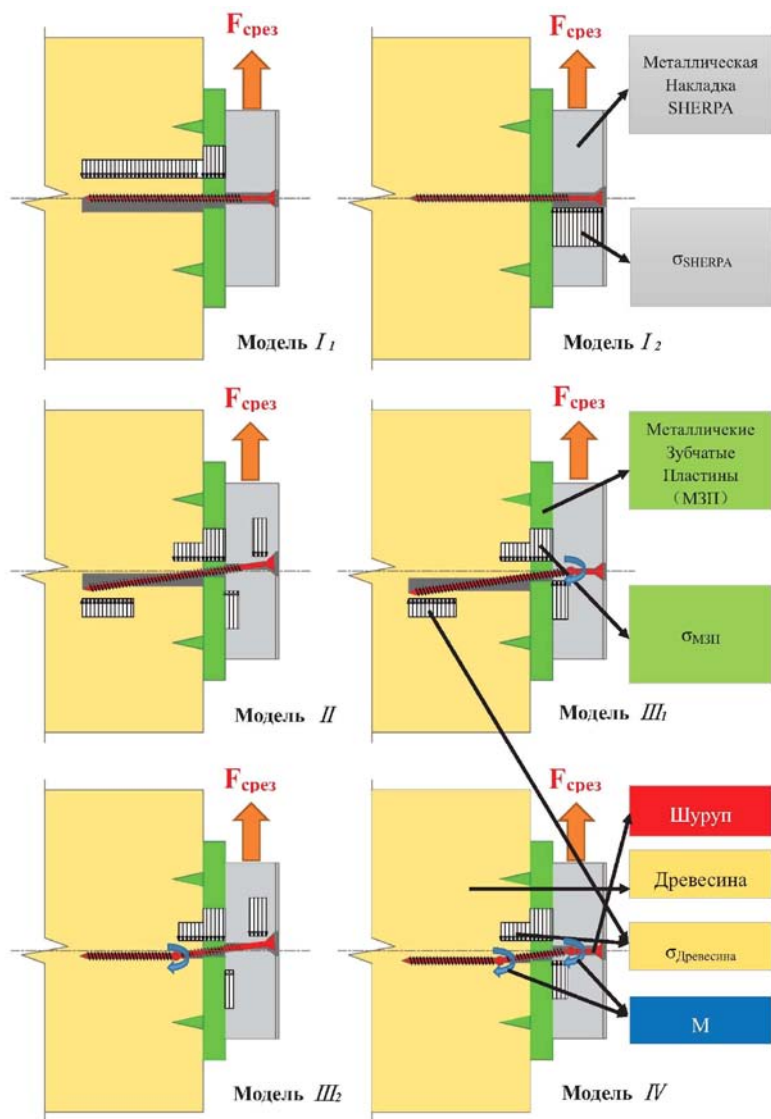


Рис. 2. Распределение напряжений при смятии в гнезде под шурупы деревянных элементов, МЗП и металлической накладки

В соответствии с моделями разрушения (см. рис. 1) распределение напряжений деревянных элементов, МЗП и металлической накладки при смятии в гнездах под шурупы дано на рис. 3.

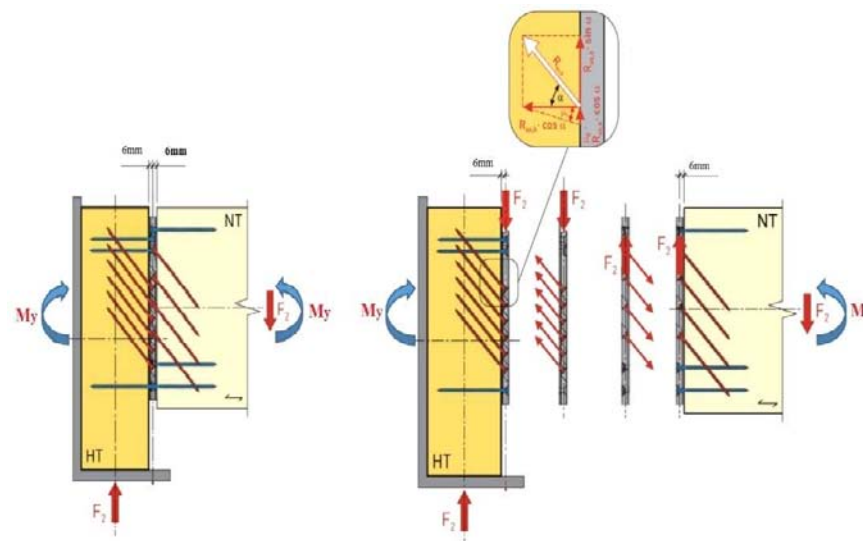


Рис. 3. Расчётная схема по определению несущей способности соединения элементов деревянных конструкций на металлических накладках: красная часть– наклонные шурупы; жёлтая часть– стеновая панели; белая часть– балка; серая часть– металлические накладки

Расчётная схема по определению несущей способности соединения на металлических накладках представлена на рис. 2, из которого видно, что их несущая способность зависит от следующих факторов:

- прочности шурупа на срез на металлической накладке под углом к волокнам деревянных элементов;
- вертикальной компоненты от сопротивления шурупа на выдергивание под углом к волокнам деревянных элементов;
- силы трения между алюминиевыми накладками и деревянными элементами в зависимости от горизонтальной компоненты из-за сопротивления шурупов на выдергивание под углом к волокнам.

На основе вышеприведенных работ автором предложена математическая модель, представленная в следующих уравнениях:

- несущая способность шурупа на срез в деревянных элементах из *CLT* и *LVL* без укрепления и с МЗП, Н:

$$F_{v,\alpha,k} = \min \begin{cases} b_1^{M_1} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{V_{ax,\alpha,k}}{4} + 0,01f_3 \cdot d \cdot t_2 \\ b_1^{C_1} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{V_{ax,\alpha,k}}{4} + 0,01f_3 \cdot d \cdot t_2 \\ b_1^{M_2} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{V_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d + 0,01f_3 \cdot d \cdot t_2 \\ b_1^{M_3} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{V_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d + 0,01f_3 \cdot d \cdot t_2 \\ b_1^{C_3} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{V_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d + 0,01f_3 \cdot d \cdot t_2 \\ b_1^4 \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{V_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d + 0,01f_3 \cdot d \cdot t_2 \end{cases} \quad (2.1)$$

• длина распределения напряжения древесины при смятии в гнезде под шурупы без укрепления МЗП, мм:

$$b_1^{M_2} = \frac{-(t_1 + \beta \cdot t_2) + \sqrt{(t_1 + \beta \cdot t_2)^2 + (\beta \cdot t_2^2 + t_1^2) \cdot (1 + \beta)}}{1 + \beta} \quad (2.2)$$

$$b_1^{M_3} = \frac{-t_1 + \sqrt{t_1^2 + \left(\frac{4M_y}{f_1 \cdot d} + t_1^2\right) \cdot (1 + 2\beta)}}{1 + 2\beta} \quad (2.3)$$

$$b_1^{C_3} = \frac{-\beta \cdot t_2 + \sqrt{(\beta \cdot t_2)^2 + \left(\frac{4M_y}{f_1 \cdot d} + \beta \cdot t_2^2\right) \cdot (2 + \beta)}}{2 + \beta} \quad (2.4)$$

$$b_1^4 = \sqrt{\frac{4M_y}{f_1 \cdot d}} \quad (2.5)$$

• длина распределения напряжения древесины при смятии в гнезде под шурупы с укреплением МЗП, мм:

$$b_1^{M_2} = \frac{-(t_1 + \beta \cdot t_2) + \sqrt{(t_1 + \beta \cdot t_2)^2 + (\beta \cdot t_2^2 + t_1^2) \cdot (1 + 4m + 2y \cdot m^2 + \beta)}}{1 + 4m + 2y \cdot m^2 + \beta} \quad (2.6)$$

$$b_1^{M_3} = \frac{-t_1 + \sqrt{t_1^2 + \left(\frac{4M_y}{f_1 \cdot d} + t_1^2\right) \cdot (1 + 4m + 2y \cdot m^2 + 2\beta)}}{1 + 4m + 2y \cdot m^2 + 2\beta} \quad (2.7)$$

$$b_1^{C_3} = \frac{-\beta \cdot t_2 + \sqrt{(\beta \cdot t_2)^2 + \left(\frac{4M_y}{f_1 \cdot d} + \beta \cdot t_2^2\right) \cdot (2 + 4m + 2y \cdot m^2 + \beta)}}{2 + 4m + 2y \cdot m^2 + \beta} \quad (2.8)$$

$$b_1^4 = \sqrt{\frac{\frac{4M_y}{f_1 \cdot d}}{1 + 2p + 2p^2 + \beta}} \quad (2.9)$$

где $F_{v,\alpha,k,1}$ – несущая способность шурупа без МЗП на срез под углом α к волокнам, Н; $F_{v,\alpha,k,2}$ – несущая способность шурупа с укреплением МЗП на срез под углом α к волокнам, Н; f_3 – прочность металлических накладок при смятии, МПа; $f_{h,\alpha,k}$ – прочность при смятии древесины в гнезде под углом α к волокнам, МПа; для *CLT* и *LVL* при $\alpha = 0^\circ$, $f_{h,0,k} = 0,15d^{-0,3} \cdot \rho_k$; при $\alpha = 90^\circ$, $f_{h,0,k} = 0,15 \cdot 1,58d^{-0,3} \cdot \rho_k$

[*SIA 265:2003*]; M_y – сопротивление шурупа при изгибе, МПа; для *CLT* $M_y = f_{u,k} \cdot \frac{d^3}{6}$;

для *LVL* $M_y = 0,13f_{u,k} \cdot d^3$ [*ENV 1998-1 1:1993*]; $f_{u,k}$ – прочность шурупа на растяжение, МПа; $f_{u,k} = 600$ МПа [*Europäische technische Zulassung ETA-12/0067*]; t_1 – эффективная длина резьбы шурупа, мм; $F_{ax,k}$ – несущая способность шурупа на выдергивание под углом α к волокнам, Н; для *CLT* $F_{ax,k} = \frac{f_{ax,90,k} \cdot d \cdot l_{ef}}{(\sin \alpha)^2 + 1,5(\cos \alpha)^2}$,

для *LVL* $F_{ax,k} = \pi \cdot d \cdot l_{ef} \cdot f_{ax,\alpha,k}$,

$f_{ax,90,k} = 0,0872\rho_k \cdot d^{-0,4119} \cdot \frac{1}{\pi}$ [*DIN 1052:2008*]

для *LVL* $F_{ax,k} = \pi \cdot d \cdot l_{ef} \cdot f_{ax,\alpha,k}$,

$f_{ax,\alpha,k} = \frac{f_{ax,90,k}}{(\sin \alpha)^2 + 1,5(\cos \alpha)^2}$, $f_{ax,90,k} = 0,003(\pi d \cdot l_{ef})^{-0,2} \cdot \rho_k$ [*SIA 265:2003*]; $f_{ax,90,k}$ – сопротивление на выдергивание шурупа поперек волокон, МПа; $f_{y,k}$ – предел текучести МЗП, МПа; $f_{y,k} = 187$ МПа; ρ_k – плотность древесины, кг/м³; n – отношение b_1 и b_2 ; $n = b_2/b_1$; $n = 1$; m – отношение b_1 и b_3 ; $m = b_3/b_1$; $m = \beta - 1$; γ – отношение f_1 и f_2 ; $\gamma = 2f_{y,k}/f_{h,\alpha,k}$; β – отношение f_1 и f_3 ; $\beta = f_3/f_{h,\alpha,k}$; b_1 – длина распределения напряжения древесины при смятии в гнезде под шурупы, мм; b_2 – длина распределения напряжения при смятии МЗП в гнезде под шурупы, мм; b_3 – длина распределения напряжения при смятии металлической накладки в гнезде под шурупы, мм; $b_3 = 8$ мм; d – наружный диаметр резьбы шурупа, мм; $t_1 = 42$ мм; t_2 – толщина металлической накладки, мм; $t_2 = 1$ мм; a_1 – длина распределения напряжения древесины при смятии в гнезде под шурупы, мм; a_2 – длина распределения напряжения при смятии металлической накладки в гнезде под шурупы, мм;

• вертикальная компонента от несущей способности шурупа на выдергивание под углом к волокнам, Н;

$$F_{2,k,1} = R_{ax,k} \cdot \sin \alpha \quad (2.10)$$

• сила трения между алюминиевыми наладками и деревянными элементами в зависимости от горизонтальной компоненты несущей способности шурупа на выдергивание под углом к волокнам, Н;

$$F_{2,k,2} = \mu \cdot R_{ax,k} \cdot \cos \alpha \quad (2.11)$$

• несущая способность соединения на металлических накладках без укрепления и с МЗП в деревянных конструкциях стеновой панели и балки по критериям сопротивления шурупов на выдергивание и срез, Н;

$$F_{v,k,панель,шпурп} = n \cdot (F_{v,\alpha,k} + F_{2,k,1} + F_{2,k,2}) \quad (2.12)$$

$$F_{v,k,балка,шерпа} = n \cdot (F_{v,\alpha,k,1} + F_{2,k,1} + F_{2,k,2}) \quad (2.13)$$

$$F_{v,k,шерпа} = \min(F_{v,k,панель,шерпа}, F_{v,k,балка,шерпа}) \quad (2.14)$$

где $F_{v,k,панель,шерпа}$ – несущая способность соединения в стеновой панели по критериям сопротивления шурупов на выдергивание и срез, Н; n – количество шурупов; $m_{1/2}$ – виды разрушения шурупа на срез в соответствии с теорией *Johansen*; μ – коэффициент силы трения; $\mu = 0,25$; $F_{v,k,шерпа}$ – несущая способность соединения по сопротивлениям шурупов на выдергивание и срез, Н; $F_{v,k,балка,шерпа}$ – несущая способность соединения в балке из *CLT* и *LVL* по сопротивлениям шурупов на выдергивание и срез, Н; $R_{ax,k}$ – несущая способность шурупа на выдергивание под углом к волокнам, Н;

Виды разрушения деревянных элементов, МЗП и металлических накладок представлены на рис. 4–6.

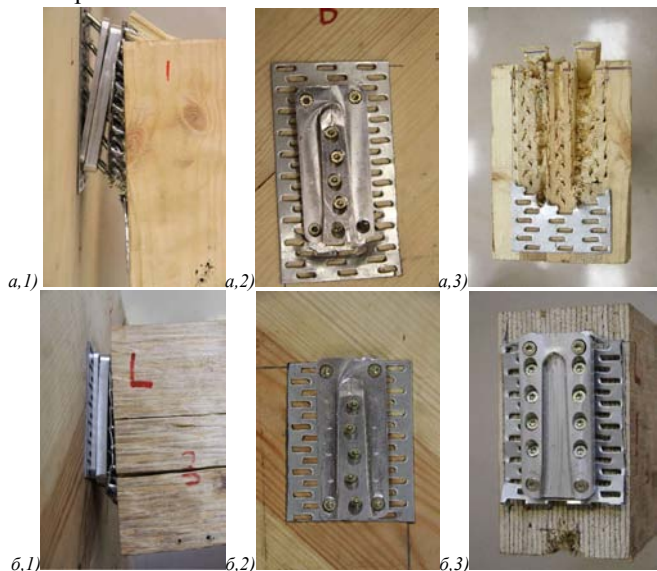


Рис. 4. Виды разрушения соединения в деревянных конструкциях: а,1)-а,3) стеновой панели и балки из *CLT*; б,1)-б,3) стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL*

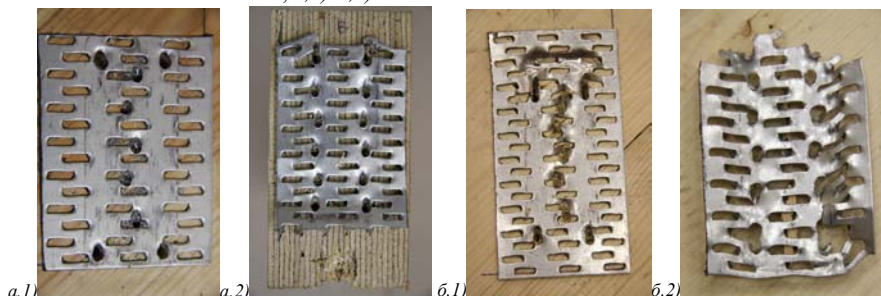


Рис. 5. Виды разрушения МЗП в деревянных конструкциях: а,1)-а,2) стеновой панели и балки из *CLT*; б,1)-б,2) стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL*

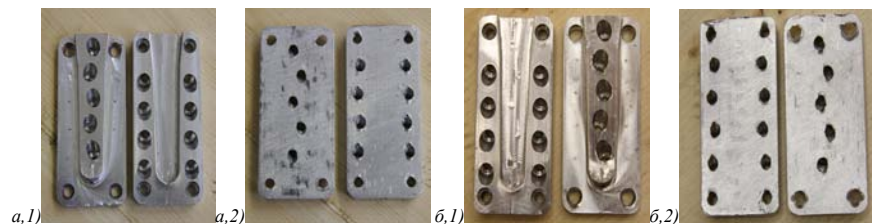


Рис. 6. Виды разрушения металлических накладок в деревянных конструкциях: а,1)-а,2) стеновой панели и балки из *CLT*; б,1)-б,2) стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL*

Сравнения расчётных и экспериментальных результатов несущей способности соединения на металлических накладках по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез без укрепления и с МЗП представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности соединения без укрепления МЗП

На широкой стороне панели из <i>CLT</i>			На узкой стороне панели из <i>CLT</i>			Вдоль волокон балки из <i>LVL</i>		
$F_{v,\phi,CLT}$	$F_{v,p,CLT}$	μ	$F_{v,\phi,CLT}$	$F_{v,p,CLT}$	μ	$F_{v,\phi,LVL}$	$F_{v,p,LVL}$	μ
27830	26331	5,69%	26910	27684	-2,80%	22600	32036	-29,45%

Таблица 2

Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности соединения с укреплением МЗП

На широкой стороне панели из <i>CLT</i>			На узкой стороне панели из <i>CLT</i>			Вдоль волокон балки из <i>LVL</i>		
$F_{v,\phi,CLT,МЗП}$	$F_{v,p,CLT,МЗП}$	μ	$F_{v,\phi,CLT,МЗП}$	$F_{v,p,CLT,МЗП}$	μ	$F_{v,\phi,LVL,МЗП}$	$F_{v,p,LVL,МЗП}$	μ
33520	29234	14,66%	33520	31556	6,22%	29640	36764	19,38%

Примечания: $F_{v,\phi,n,CLT}$ – фактическая несущая способность, Н; $F_{v,p,n,CLT}$ – расчётная несущая способность, Н; m_n – приращение $F_{v,\phi,n,CLT}$ и $F_{v,p,n,CLT}$; $\mu_n = \frac{F_{v,\phi,n,CLT} - F_{v,p,n,CLT}}{F_{v,p,n,CLT}} \cdot 100\%$

Из табл. 1 видно, что расчётные результаты ниже экспериментальных на 5,69 %. Расчётные данные по предложенной математической модели достаточно близки к экспериментальным. В свою очередь, при конструировании погрешность расчётных данных для оценки фактической несущей способности имеет достаточную точность и безопасность. Из табл. 2 видно, что аналогично выводу расчётные результаты ниже 14,66 %, чем экспериментальные. Несущая способность соединения с укреплением МЗП в балке из *CLT* выше, чем в балке из *LVL*. Следовательно, автор рекомендует применять в практике предложенную математическую модель. Для подтверждения эффективности методики с применением МЗП. Выполнено сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности соединения на металлических накладках без укрепления и с МЗП по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез (табл. 3 и 4).

Таблица 3

Сравнение расчётных результатов определения несущей способности соединения без и с укреплением МЗП

На широкой стороне панели из CLT			На узкой стороне панели из CLT			Вдоль волокон балки из LVL		
$F_{v,p,90,CLT,МЗП}$	$F_{v,p,90,CLT}$	μ_p	$F_{v,p,0,CLT,МЗП}$	$F_{v,p,0,CLT}$	μ_p	$F_{v,p,0,LVL,МЗП}$	$F_{v,p,0,LVL}$	μ_p
29234	26331	11,03%	31556	27684	13,99%	36764	32036	14,76%

Таблица 4

Сравнение экспериментальных результатов определения несущей способности соединения без укрепления и с МЗП

На широкой стороне панели из CLT			На узкой стороне панели из CLT			Вдоль волокон балки из LVL		
$F_{v,\phi,90,CLT,МЗП}$	$F_{v,\phi,90,CLT}$	μ_ϕ	$F_{v,\phi,0,CLT,МЗП}$	$F_{v,\phi,0,CLT}$	μ_ϕ	$F_{v,\phi,0,LVL,МЗП}$	$F_{v,\phi,0,LVL}$	μ_ϕ
33520	27830	20,45%	33520	26910	24,56%	29640	22600	31,15%

Примечания:

- $F_{v,p,90,CLT,МЗП}$ – расчётная несущая способность соединения с укреплением МЗП, Н.
- $F_{v,p,90,CLT}$ – расчётная несущая способность соединения без укрепления МЗП, Н.
- $F_{v,\phi,90,CLT,МЗП}$ – фактическая несущая способность соединения с укреплением МЗП, Н.
- $F_{v,\phi,90,CLT}$ – фактическая несущая способность соединения без укрепления МЗП, Н.
- μ_p – расчётное приращение $F_{v,p,90,CLT,МЗП}$ и $F_{v,p,90,CLT}$;

$$\mu_n = \frac{F_{v,p,n,CLT,МЗП} - F_{v,p,n,CLT}}{F_{v,p,n,CLT}} \cdot 100\%$$

- μ_ϕ – фактическое приращение $F_{v,\phi,90,CLT,МЗП}$ и $F_{v,\phi,90,CLT}$;

$$\mu_n = \frac{F_{v,\phi,n,CLT,МЗП} - F_{v,\phi,n,CLT}}{F_{v,\phi,n,CLT}} \cdot 100\% ; \alpha - \text{угол между осью шурупа и волокнами.}$$

Из табл. 3 и 4 видно, что расчётная несущая способность соединения с укреплением МЗП выше минимально до 11,03% и максимально до 14,76%, чем без МЗП, а фактическая с укреплением МЗП возрастает минимально до 20,45% и максимально до 31,35%. Таким образом, применение МЗП может эффективно повысить несущую способность соединения. Поэтому при проектировании деревянных зданий инженеры и архитекторы могут использовать эту методику, позволяющую эффективно и экономично проводить конструктивный расчёт.

3. Усовершенствован метод расчёта несущей способности соединения на металлических накладках при поперечных смещениях металлических накладок

Экспериментальный стенд и металлическая установка для крепления деревянных опытных образцов приведены на рис. 7, б. Расчётная схема по определению несущей способности соединения на металлических накладках по критерию сопротивления шурупов на выдергивание представлена на рис. 7, а, из которого видно, что с учётом физико-механических и геометрических характеристик металлических накладок несущая способность крепежа зависит от следующих факторов:

- несущей способности шурупов на выдергивание, Н;
- прочности алюминиевых накладок на растяжение, МПа;
- контактной площади между выступами двух алюминиевых накладок, мм²;
- плотности древесины, кг/м³;
- нагрузки от воздействия ветра и землетрясения, Н;

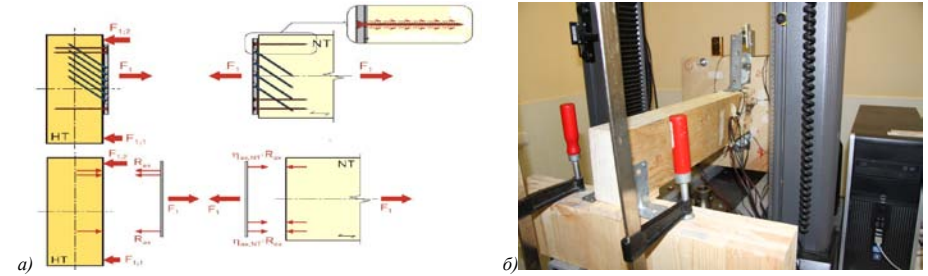


Рис. 7. а– расчётная схема по определению несущей способности соединения на металлических накладках по критерию сопротивления шурупов на выдергивание; б) экспериментальный стенд и установка для крепления деревянных опытных образцов

С использованием полученных результатов в соответствии с разделом. 2.2 и приложением Б в диссертационной работе автором усовершенствован метод для аналитического расчёта несущей способности соединения на металлических накладках по критерию сопротивления на выдергивание шурупов:

- несущая способность шурупа на выдергивание из деревянных элементов CLT, Н:

$$F_{ax,k} = \frac{f_{ax,90,k} \cdot d \cdot l_{ef}}{(\sin \alpha)^2 + 1,5(\cos \alpha)^2}, [DIN 1052:2008] \quad (3.1)$$

$$f_{ax,90,k} = 0,0872 \rho_k \cdot d^{-0,4119} \cdot \frac{1}{\pi}, [\text{модель от Frese}] \quad (3.2)$$

$$F_{ax,k,CLT} = \mu_\alpha \cdot F_{ax,k,CLT} \quad (3.3)$$

где $F_{ax,k}$ – несущая способность шурупа на выдергивание, Н; $f_{ax,90,k}$ – сопротивление шурупа на выдергивание поперек волокон, МПа; d – наружный диаметр резьбы шурупа, мм; l_{ef} – эффективная длина резьбы шурупа, мм; ρ_k – плотность древесины, кг/м³; α – угол оси шурупа к волокнам древесины; μ_α – коэффициент коррекции; при $\alpha = 0^\circ$, $\mu_0 = 1,1$; при $\alpha = 90^\circ$, $\mu_0 = 1,2$;

- несущая способность шурупа на выдергивание из деревянных элементов LVL вдоль волокон в соответствии с SIA 265:2003, Н:

$$F_{ax,k} = \pi \cdot d \cdot l_{ef} \cdot f_{ax,\alpha,k}, \quad (3.4)$$

$$f_{ax,\alpha,k} = \frac{f_{ax,90,k}}{(\sin \alpha)^2 + 1,5(\cos \alpha)^2} \quad (3.5)$$

$$f_{ax,90,k} = 0,003(\pi d \cdot l_{ef})^{-0,2} \cdot \rho_k \quad (3.6)$$

• несущая способность соединения на металлических накладках по критерию сопротивления шурупов на выдергивание в деревянных конструкциях стеновой панели и балки, Н:

$$F_{ax,k,SHERPA} = n \cdot \min(F_{ax,k,CLT}, F_{ax,k,LVL}, F_{t,k,алю}) \quad (3.7)$$

где n – количество шурупов; $F_{t,k,алю}$ – несущая способность алюминиевого куба на растяжение; $F_{t,k,алю} = 6824,68$ Н;

Виды разрушения металлических накладок представлены на рис. 8.



Рис. 8. Виды разрушения соединения на металлических накладках в деревянных конструкциях: а-б) – стеновой панели из CLT и балки из CLT; в) – стеновой панели из CLT и балки из LVL

Металлические накладки типа SHERPA изготавливают из алюминиевого материала-EN 6082, прочность материала определяется по BS EN 755-2:2008. С учётом контактной площади сжатия расчётная несущая способность металлических накладок на растяжение составляет 6824,68 Н. На основе предложенных уравнений сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности соединения по сопротивлению шурупов на выдергивание с то же на растяжение металлических накладок приведено в табл. 5.

Таблица 5

Сравнение расчётных и экспериментальных результатов несущей способности соединения с то же металлических накладок на растяжение

Параметр	На широкой стороне CLT	На узкой стороне CLT	Вдоль волокон балки из LVL	Алюминиевые пластины
Расчётные результаты	14430,48	13863,91	24336,00	6824,681
ω_p	111,45%	103,14%	256,59%	-
экспериментальные результаты	-	11258,00	12714,59	-
ω_ϕ	-	64,96%	86,30%	-

Примечания: F_p – расчётная несущая способность, Н; F_ϕ – фактическая несущая способность, Н; ω_p – расчётное приращение F_p и $F_{алю}$; $\omega_p = \frac{F_p - F_{алю}}{F_{алю}} \cdot 100\%$; ω_ϕ – экспериментальное приращение F_ϕ и $F_{алю}$; $\omega_\phi = \frac{F_\phi - F_{алю}}{F_{алю}} \cdot 100\%$

Из табл. 5 видно, что расчётные результаты определения несущей способности соединения для деревянных элементов из CLT выше на минимально 103,14 %, чем несущая способность алюминиевых накладок на растяжение, а экспериментальные результаты выше на минимально 64,96 %, чем-то же. Расчётные результаты определения несущей способности соединения для деревянных элементов из LVL выше на минимально 256,59 %, чем прочность на растяжение алюминиевых накладок, а экспериментальные результаты выше на минимально 86,30 %, чем то же. С другой стороны, в соединениях появилось отчётливое пластичное разрушение, потому что прочность металлических накладок на растяжение не удовлетворяет условию сопротивления шурупов на выдергивание. Для того, чтобы повысить несущую способность и усовершенствовать конструкцию соединения, необходимо выбрать наиболее рациональный материал.

4. Разработана математическая модель для аналитического расчёта коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки

Расчётная схема по определению коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки представлена на рис. 9.

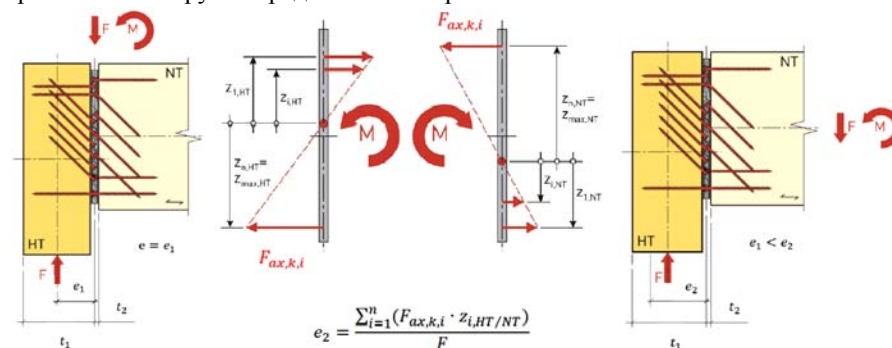


Рис. 9. Расчётная схема по определению коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки: слева – предельный эксцентриситет; в середине – влияние эксцентриситета на металлические накладки; справа – эксцентриситет изгиба

Автором предложен новый аналитический алгоритм расчёта коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки для нахождения несущей способности соединения, показанный в следующих формулах:

• коэффициент влияния эксцентриситета приложения нагрузки:

$$\omega = \frac{1}{(1 + (\frac{e_3 - e_1}{e_2})^3)^{\frac{1}{3}}} \quad (4.1)$$

$$e_1 = 0,5(t_1 + t_2) \quad (4.2)$$

$$e_2 = \frac{\min(M_1, M_2)}{F} \quad (4.3)$$

$$e_3 = \frac{M}{F} \quad (4.4)$$

$$M_{1/2} = \sum_{i=1}^n (F_{ax,k,i} \cdot z_{i,П/Б}) \quad (4.5)$$

где ω – коэффициент влияния эксцентриситета приложения нагрузки; e_1 – предельный эксцентриситет, мм; M – изгибающий момент, Н · мм; $F_{ax,k,i}$ – несущая способность шурупа на выдергивание, Н; e_2 – влияние эксцентриситета на металлических накладках, мм; e_3 – эксцентриситет изгиба, мм; F – несущая способность соединения на металлических накладках по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез, Н; $M_{1/2}$ – изгибающий момент, действующий на алюминиевые детали, Н · мм;

• несущая способность соединения с учётом коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки, Н:

$$F' = \omega \cdot F \quad (4.6)$$

В научном исследовании компании *SHERPA* несущая способность соединения на металлических накладках равна 15000 Н и коэффициент влияния эксцентриситета приложения нагрузки с учётом физико-механических и геометрических характеристик деревянных опытных образцов составляет 0,5. Сравнения расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности соединения без укрепления и с МЗП с учётом коэффициентов влияния эксцентриситета приложения нагрузки представлены в табл. 6 и 7.

Таблица 6

Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности соединения без укрепления МЗП

Параметр	$F_{v,k,оф}$	$F_{v,k,90,р,CLT}$	$F_{v,k,0,р,CLT}$	$F_{v,k,ф,CLT,1}$	$F_{v,k,ф,CLT,3}$	$F_{v,k,р,LVL}$	$F_{v,k,ф,LVL}$
$F_{v,k}$	15000	26331	27684	27830	26910	32036	22600
μ	-	75,54%	84,56%	85,53%	79,40%	113,57%	50,67%
ω	0,50	0,41	0,40	0,41	0,36	0,42	0,41
$F_{v,k}$	7518,00	10795	11073	11322	9753	13455	9303
μ'	-	43,94%	47,65%	50,97%	30,05%	79,40%	24,05%

Таблица 7

Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности соединения с укреплением МЗП

Параметр	$F_{v,k,оф,МЗП}$	$F_{v,k,90,р,CLT,МЗП}$	$F_{v,k,0,р,CLT,МЗП}$	$F_{v,k,ф,CLT,7,МЗП}$	$F_{v,k,р,LVL,МЗП}$	$F_{v,k,ф,LVL,6,МЗП}$
$F_{v,k}$	15000	29234	31556	33520	36764	29640
μ	-	94,89%	110,37%	123,47%	145,09%	97,60%
ω	0,50	0,39	0,38	0,40	0,40	0,36
$F_{v,k}$	7518,00	11401	11991	13408	14705	10670
μ'	-	52,02%	59,88%	78,77%	96,07%	42,27%

Примечания: $F_{v,k}$ – несущая способность соединения на срез без учёта коэффициента, Н;

$F_{v,k}'$ – то же с учётом коэффициента, Н; μ – приращение $F_{p/ф}$ и $F_{v,k,оф}$; $\mu = \frac{F_{p/ф} - F_{v,k,оф}}{F_{v,k,оф}} \cdot 100\%$;

μ' – приращение $F_{p/ф}'$ и $F_{v,k,оф}'$; $\mu' = \frac{F_{p/ф}' - F_{v,k,оф}'}{F_{v,k,оф}' } \cdot 100\%$

Из табл. 12 видно, что коэффициент влияния эксцентриситета приложения нагрузки, определяемый по предложенным уравнениям, достаточно близок к данному коэффициенту 0,5. Полученные расчётные и экспериментальные результаты, умножаемые на коэффициент ω , соответствуют не только нормативной несущей способности 7518 Н, но и незначительно превышают её, потому что нормативная несущая способность соединения на металлических накладках типа *SHERPA S15* должна удовлетворять условию безопасности для различных типов деревянных материалов при конструировании. Методика расчёта коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки, разработанная в компании *SHERPA*, усовершенствована в соответствии с исследованием автора. При этом, была выполнена:

- корректировка неопределённых понятий о коэффициенте влияния эксцентриситета приложения нагрузки и на основе данной методики;
- предложена новая математическая модель;

Из табл. 5 видно, что расчётные и экспериментальные результаты для соединения выше на максимально 113,57 % и минимально 50,67 %, чем нормативное значение несущей способности 15000 Н, а после умножения на коэффициент выше на максимально 79,40 % и минимально 24,05 %, чем-то же 7518 Н. Сравнительный анализ показывает, что предложенная математическая модель может обеспечить и повысить достоверность и надёжность конструирования.

5. Результаты оригинальных экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния и прочности соединения деревянных элементов на металлических накладках

Для определения напряженно-деформированного состояния и прочности соединения элементов деревянных конструкций на металлических накладках были использованы розетки, составленные из отдельных тензодатчиков под углами 0°, 45°, 90° к волокнам. Применение такого типа расстановки позволяет определить вектор главных деформаций. Расположение тензодатчиков на деревянных элементах из *CLT* и *LVL* представлено на рис. 13. Деформация и напряжение на стеновой панели при нагружении до 40 кН даны в табл. 8.

Из табл. 8 видно, что вдоль направления главной деформации возникает относительно высокое растягивающее напряжение на верхнем и нижнем поясе стеновой панели, а на среднем поясе сжимающее напряжение. При этом, в свою очередь, будет происходить расслоение в середине стеновой панели около крепежа. Деформация и напряжение на металлических накладках при нагружении до 40 кН приведены в табл. 9.

Таблица 8

Деформация и напряжение в стеновой панели

Расположение	Верхний пояс	Средний пояс	Нижний пояс
Шифр	П1-CLT	С2-CLT	С3-CLT
ϵ_{\max} , 10^{-6} мм/мм	1349,00	-164,07	1626,00
σ_{\max} , МПа	20,41	-18,79	12,31

Таблица 9

Деформация и напряжение металлических накладок, которая крепится к стеновой панели

Расположение	Верхний пояс	Средний пояс	Нижний пояс
Шифр	АН4,1-CLT	АН4,2-CLT	АН4,3-CLT
ϵ_{\max} , 10^{-6} мм/мм	2604,00	-169,00	-1472,00
σ_{\max} , МПа	182,28	-11,83	-103,04

Из табл. 9 видно, что при нагрузке на верхнем поясе алюминиевой накладки возникает растягивающее напряжение, а на среднем и нижнем поясе сжимающее напряжение. Сравнение деформаций и напряжений в балке из CLT и LVL при нагружении до 40 кН представлено в табл. 10.

Таблица 10

Сравнение деформаций и напряжений в балке из CLT и LVL

Расположение	Верхний пояс		Средний пояс		Нижний пояс	
Шифр	Б7-CLT	Б3-LVL	Б5-CLT	Б1-LVL	Б6-CLT	Б2-LVL
ϵ_{\max} , 10^{-6} мм/мм;	530,36	1650,00	837,43	2611,00	358,61	47,59
σ_{\max} , МПа	5,82	20,47	7,64	31,21	-3,90	-8,54
σ_x , МПа	9,051	13,573	0	0	-9,051	-13,573
ω (100%)	55,52%	-33,69%	1	1	132,08%	58,93%

Примечание: y – координата, определяющая вертикальное положение в поперечном сечении, мм; σ_x – напряжение вдоль продольного направления балки, МПа; $\sigma_x = \frac{M \cdot y}{J_z}$; M – изгибающий момент, Н · мм; ω – приращение; $\omega = \frac{\sigma_x - \sigma_{\max}}{\sigma_{\max}} \cdot 100\%$; J – момент инерции поперечного сечения, мм⁴; для прямоугольного поперечного сечения $J_z = \frac{b \cdot h^3}{12}$; b – ширина поперечного сечения балки, мм; для балки из CLT $b=100$, мм; для балки из LVL $b=70$, мм; h – высота поперечного сечения балки, мм; $h=140$, мм;

Из табл. 10 видно, что на верхнем и среднем поясе балки возникает растягивающее напряжение, а на нижнем поясе сжимающее напряжение. При сравнении экспериментальных результатов видно, что при нагружении до 40 кН в балке из LVL напряжения выше, чем в балке из CLT. В данной диссертационной работе автора установлено, что несущая способность соединения в балке из CLT по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез составляет 38 377,45 Н, выше на

23,15%, чем в балке из LVL 31 164,43 кН. Следовательно, экспериментальные данные с удовлетворительной точностью описывают предложенную расчётную методику. Сравнение деформаций и напряжений алюминиевых накладок при нагружении до 40 кН представлено в табл.11.

Таблица 11

Сравнение деформаций и напряжений на металлических накладках

Расположение	Верхний пояс		Средний пояс		Нижний пояс	
Шифр	АН8,2-CLT	АН4,1-LVL	АН8,3-CLT	АН4,31-LVL	АН8,1-CLT	АН4,21-LVL
ϵ_{\max} , 10^{-6} мм/мм	-195,00	1385,00	755,00	465,00	-92,00	-259,00
σ_{\max} , МПа	-13,65	96,95	52,85	32,55	-6,44	-18,13

Из табл. 11 видно, что на верхнем и нижнем поясе металлической накладки, которая крепится к балке из CLT возникает сжимающее напряжение, на среднем поясе растягивающее, а на верхнем и среднем поясе балки из LVL возникает растягивающее напряжение и на нижнем поясе сжимающее. По аналогии с результатами из табл. 11 деформации и напряжения в балке из LVL выше, чем в балке из CLT.

6. Результаты численных исследований по МКЭ с использованием программы Ansys 15.0 по определению напряженно-деформированного состояния соединения на металлических накладках

Поскольку в узлом соединения может возникнуть изгибающий момент, обуславливающий большое пластичное разрушение металлических накладок, автором было проведено численное исследование по МКЭ. Виды разрушения металлических накладок с учётом влияния эксцентриситета по программе Ansys 15.0 представлены на рис. 10 и 11.

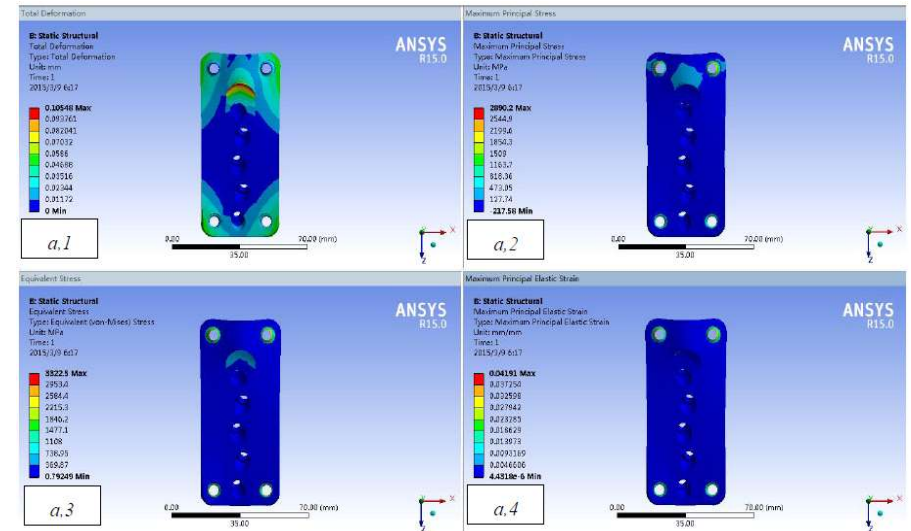


Рис. 10 (начало)

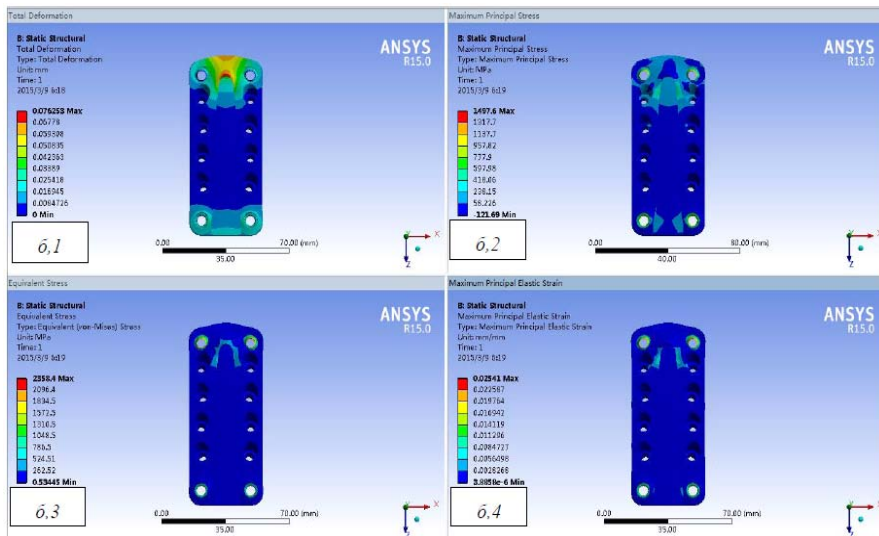


Рис. 10 (окончание). Виды разрушения металлических накладок с учётом влияния эксцентриситета: *а, 1-4*) главное перемещение и напряжение, эквивалентное напряжение и деформация на металлической накладке в стеновой панели из *CLT*; *б, 1-4*) главное перемещение, напряжение, эквивалентных напряжение и деформация то же в балке из *CLT* и *LVL*

Сравнения зависимости деформации от напряжения на верхнем, среднем и нижнем поясе металлической накладок и балки из *CLT* и *LVL* представлены на рис. 12.

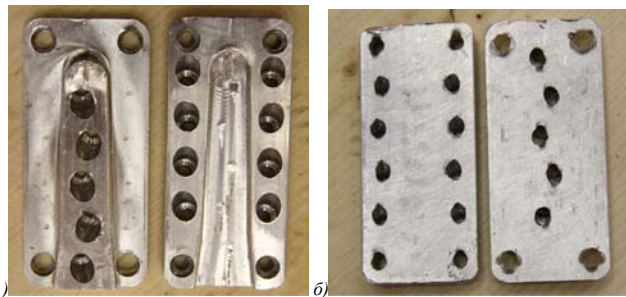


Рис. 11. Виды разрушения металлических накладок с учётом эксцентриситета: *а*— на лицевой стороне; *б*— на обратной стороне

Из рис. 12 видно, что при одинаковом усилии, локальное напряжение и деформация металлической накладки, которая крепится к балке из *LVL* выше, чем к балке из *CLT*. Это зависит от структурных характеристик материалов, расположения и количества шурупов, геометрического габарита крепежа и отношения ширины к высоте поперечного сечения и т. д. Из данных научных работ известно, что жёсткость (модуль упругости $E=11000$ МПа) для *CLT* выше, чем материал из *LVL* (модуль упругости $E=10000$ МПа), а отношения ширины к высоте $100/140$ мм/мм

для балки из *CLT* выше, чем $70/140$ мм/мм для балки из *LVL* (табл. 10), поэтому у конструкции стеновой панели и балки из *CLT* имеет относительно меньше прогиб, напряжение и выше несущую способность, чем балки из *LVL*. Сравнение расчётных данных по МКЭ с использованием программы *Ansys 15.0* и экспериментальных представлено в табл. 12 и 13.

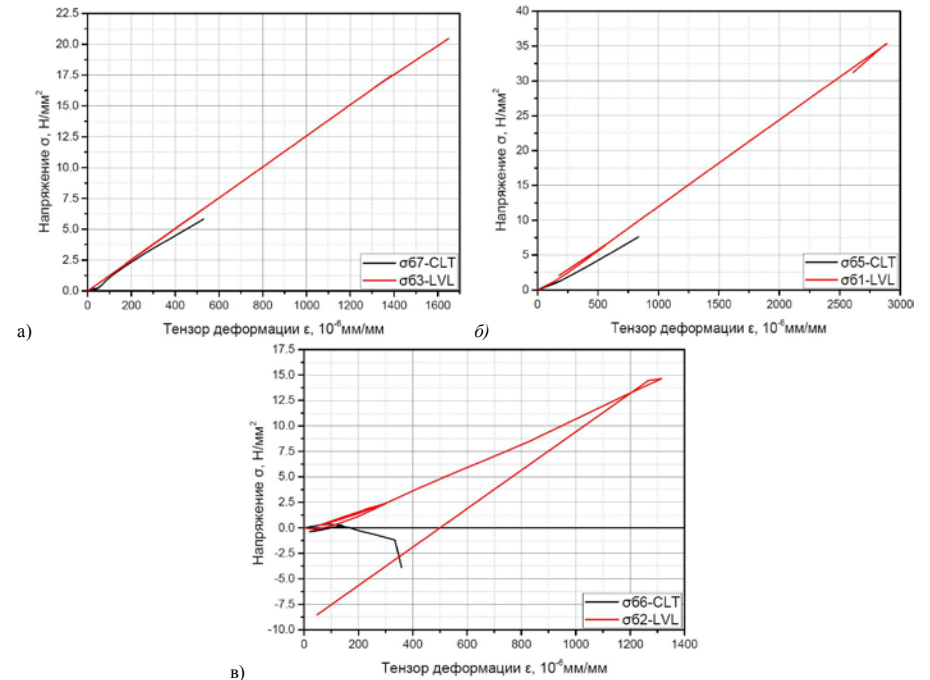


Рис. 12. Сравнение зависимости деформации от напряжения: *а*— на верхнем поясе балки; *б*— на среднем поясе балки; *в*— на нижнем поясе балки; чёрная линия— для *CLT*; красная линия— для *LVL*

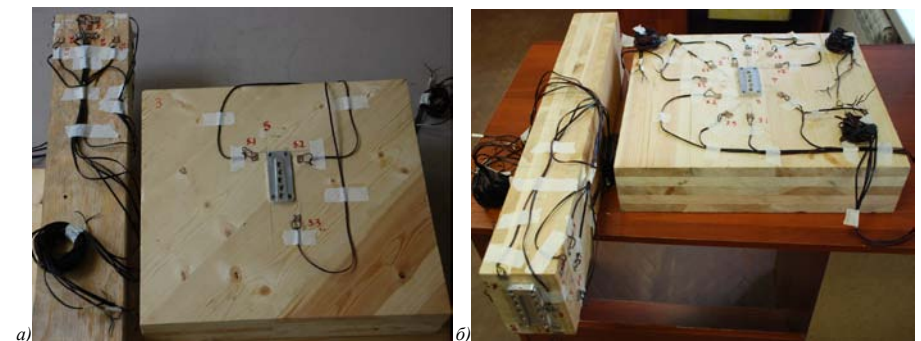


Рис. 13. Расположение тензорезисторов в деревянных конструкциях: *а*— стеновой панели и балки из *CLT*; *б*— стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL*

Таблица 12

Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения главного напряжения на металлических накладках с учётом влияния эксцентриситета, МПа

Расположение	$\sigma_{\text{экс, б, CLT}}$	$\sigma_{\text{МКЭ, б, CLT}}$	$\sigma_{\text{экс, б, LVL}}$	$\sigma_{\text{МКЭ, б, LVL}}$	$\sigma_{\text{экс, с, CLT}}$	$\sigma_{\text{МКЭ, с, CLT}}$
Верхняя	-13,65	-58,18	96,95	51,60	182,28	159,12
Центральная	52,85	4,35	32,55	3,47	-11,83	7,93
Нижняя	-6,44	-73,02	18,13	64,32	103,04	177,01

Таблица 13

Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения главной деформации на металлических накладках с учётом влияния эксцентриситета, мм

Расположение	$\epsilon_{\text{экс, б, CLT}}$	$\epsilon_{\text{МКЭ, б, CLT}}$	$\epsilon_{\text{экс, б, LVL}}$	$\epsilon_{\text{МКЭ, б, LVL}}$	$\epsilon_{\text{экс, с, CLT}}$	$\epsilon_{\text{МКЭ, с, CLT}}$
Верхняя	-195	-1240	1385	1083	2604	3492
Центральная	755	73	465	60	-169	160
Нижняя	-92	-1562	259	1339	1472	3588

Из табл. 12 и 13 видно, что при расчёте по МКЭ получается удовлетворительная сходимость опытных и расчётных результатов. Сравнительным анализом подтверждено, что с использованием метода конечных элементов и программы *Ansys 15.0* можно исследовать напряженно-деформированное состояние соединения на металлических накладках. Следовательно, при конструировании может осуществляться оценка несущей способности и совершенствование конструкции соединения.

Выводы и предложения

1. Разработана математическая модель расчёта несущей способности шурупа на выдергивание из деревянных материалов из поперечно-клееной древесины и бруса из клееного шпона на основе различных норм и моделей
2. Предложена оригинальная конструкция соединения на основе металлических накладок типа *SHERPA*, включающая дополнительную деталь металлической зубчатой пластины, которая позволяет повысить несущую способность соединения (до 31,15 %) и сократить себестоимость на 4000 руб. за одну шт;
3. Разработана математическая модель для аналитического расчёта несущей способности шурупа на срез без укрепления и с металлической зубчатой пластиной в деревянных элементах из поперечно-клееной древесины и бруса из клееного шпона на основе теории *Johansen, K.W* и *EC5* в соответствии с видами разрушения соединения;
4. Предложена математическая модель расчёта несущей способности соединения без укрепления и с металлической зубчатой пластиной в деревянных конструкциях стеновой панели и балок;
5. Разработаны рекомендации для совершенствования проектирования соединения на металлических накладках при поперечных смещениях металлических накладок
6. Предложена математическая модель для аналитического расчёта коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки. Результаты исследования

позволяют использовать полученный аналитический алгоритм при расчётах большепролётных конструкций;

7. Подтверждена достоверность и эффективность предложенных математических моделей расчёта несущей способности соединения на металлических накладках без укрепления и с металлической зубчатой пластиной;

8. Выполнен расчёт несущей способности и моделирование соединения в деревянных конструкциях стеновой панели и балок на основе экспериментальных данных, полученных с использованием тензодатчиков;

9. Обоснован метод рационального проектирования и расчёта несущей способности соединения на металлических накладках по МКЭ без и с учётом влияния эксцентриситета приложения нагрузки с использованием программы *Ansys 15.0*.

III. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Сюй, Юнь. Оптимизация расчёта несущей способности шурупов на выдергивание в соединениях *SHERPA* в деревянных элементах из *CLT* и *LVL* / Сюй Юнь // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 6 (47). – С. 70 – 76 (0,44 п. л.).
2. Сюй, Юнь. Расчёт несущей способности соединения *SHERPA* при изгибе в деревянных конструкциях с использованием панели-*CLT* и балки из *CLT* и *LVL* / Сюй Юнь // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – СПНиО, – № 6 (0,5 п. л.).
3. Сюй, Юнь. Исследование коэффициента эксцентриситета для расчёта несущей способности соединения *SHERPA* при изгибе в большепролётных деревянных конструкциях / Сюй Юнь // Фундаментальные исследования. – 2015. – №2. – С. 255 – 260 (0,5 п. л.).
4. Сюй, Юнь. Расчёт несущей способности соединения *SHERPA* на выдергивание в деревянной конструкции в составе панели-*CLT* и балки из *CLT* и *LVL* / Сюй Юнь // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – СПНиО, – № 1 (0,5 п. л.).
5. Сюй, Юнь. Расчёт несущей способности соединения *SHERPA* с укреплением МЗП в деревянных конструкциях из комбинации стеновой панели-*CLT* с балкой из *CLT* и *LVL* / Сюй Юнь // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – СПНиО, – № 1 (0,5 п. л.).
6. Сюй, Юнь. Моделирование и расчёт несущей способности соединения *SHERPA* в деревянных конструкциях по МКЭ / Сюй Юнь // Фундаментальные исследования. – № 2 (часть 8) 2015, –стр. 1658-1664 (0,5 п. л.).

Компьютерная верстка И. А. Яблоковой

Подписано к печати 29.04.15. Формат 60×84 1/16. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,6. Тираж 120 экз. Заказ 44.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.
Отпечатано на ризографе. 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 5.

