

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

«САНКТ-ПЕТЕРБУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ

УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

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»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор технических наук

доцент В.Н. Глухих

Санкт-Петербург, 2015

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	7
ГЛАВА 1. РАЗВИТИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ И МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ.....	18
1.1. Общие сведения из истории развития соединения на металлических накладках типа <i>SHERPA</i> в деревянных конструкциях.....	18
1.2. Традиционный и зарубежный опыт применения серий продукции типа <i>SHERPA</i> в деревянных конструкциях	22
1.2.1. Сравнение традиционных и современных соединений	22
1.2.2. Существующие деревянные здания в мире с использованием соединения на металлических накладках	25
1.2.3. Новое развитие и перспективы деревянных зданий— многоэтажные здания из стеновых панелей, состоящих из поперечно-клееной древесины.....	30
1.2.4. Сравнение различных деревянных конструкций	34
1.3. Развитие и совершенствование методов расчета несущей способности соединения на металлических накладках	37
1.3.1. Исследование несущей способности соединения на металлических накладках типа <i>SHERPA</i>	37
1.3.2. Исследование методики повышения несущей способности соединения элементов деревянных конструкций на металлических накладках с металлической зубчатой пластиной	40

ГЛАВА 2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАКЛАДКАХ	42
2.1. Математическая модель расчёта несущей способности шурупа на выдергивание	45
2.2. Аналитическое исследование несущей способности односрезного шурупа в соединениях элементов деревянных конструкций на металлической накладке	48
2.3. Аналитическое исследование несущей способности односрезного шурупа на металлической накладке в соединениях деревянных элементов без укрепления и с металлической зубчатой пластиной.....	54
2.4. Математическая модель расчёта несущей способности соединения элементов деревянных конструкций на металлических накладках без укрепления металлической зубчатой пластиной по критериям сопротивления шурупов на выдергивание и срез	60
2.5. Математическая модель расчёта несущей способности соединения на металлических накладках с укреплением металлической зубчатой пластиной по критериям сопротивления шурупов на выдергивание и срез	63
2.6. Совершенствование методики расчёта несущей способности соединения на металлических накладках по критерию сопротивления шурупов на выдергивание	67
2.7. Математическая модель расчёта коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки	69

2.8. Аналитическое исследование напряженно-деформированного состояния деревянных элементов с металлическими накладками	72
2.9. Выводы по главе	73
ГЛАВА 3. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	75
3.1. Экспериментальное исследование плотности деревянных материалов.....	75
3.1.1. Условия хранения материала образцов.....	75
3.1.2. Оборудование	75
3.1.3. Методика и результаты проведения эксперимента	76
3.2. Экспериментальное исследование несущей способности шурупа на выдергивание	78
3.3. Экспериментальное исследование несущей способности односрезного шурупа на металлической накладке	82
3.4. Экспериментальное исследование несущей способности односрезного шурупа на металлической накладке с укреплением металлической зубчатой пластиной.....	86
3.5. Экспериментальное исследование несущей способности соединения элементов деревянных конструкций на металлических накладках без укрепления металлической зубчатой пластиной по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез.....	90
3.6. Экспериментальное исследование несущей способности соединения на металлических накладках с укреплением металлической зубчатой пластиной по	

сопротивлению шурупов на выдергивание и срез.....	96
3.7. Экспериментальное исследование несущей способности соединения элементов деревянных конструкций на металлических накладках по сопротивлению шурупов на выдергивание.....	101
3.8. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния деревянных элементов с металлическими накладками	104
3.9. Выводы по главе	110
ГЛАВА 4. СРАВНЕНИЕ РАСЧЁТНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ	113
4.1. Сравнение результатов экспериментального и аналитического исследования несущей способности шурупа на основе различных норм и моделей	113
4.1.1. На выдергивание из деревянных элементов из поперечно-клеёной древесины и бруса из клееного шпона	113
4.1.2. На срез в деревянных элементах из поперечно-клеёной древесины и бруса из клееного шпона с металлическими накладками	115
4.2. Сравнение результатов экспериментального и аналитического исследования несущей способности односрезного шурупа на металлической накладке с укреплением металлической зубчатой пластиной	121
4.3. Сравнение результатов экспериментального и аналитического исследования несущей способности соединения элементов деревянных конструкций на металлических накладках без укрепления металлической зубчатой пластиной по сопротивлению шурупов на выдергивание и	

срез.....	124
4.4. Сравнение результатов экспериментального и аналитического исследования несущей способности соединения элементов деревянных конструкций на металлических накладках с металлической зубчатой пластиной по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез.....	125
4.5. Сравнение результатов экспериментального и аналитического исследования несущей способности соединения на металлических накладках по сопротивлению шурупов на выдергивание.....	129
4.6. Сравнение результатов аналитического исследования коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки	131
4.7. Моделирование и расчёт несущей способности соединения на металлических накладках по МКЭ.....	135
4.8. Выводы по главе	151
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	155
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	156
ПРИЛОЖЕНИЕ	169

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность избранной темы

В современных экономических условиях значительный прирост объёмов 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 со временем 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 могут 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, которая позволяет 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 с балкой, не разработан алгоритм для аналитического расчёта несущей способности соединения. 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 счёт уменьшения напряжений смятия можно значительно повысить несущую способность соединения. Выполненные исследования позволили обосновать основное направление совершенствования конструкций элементов 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 клеенных 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 клеенных стержнях. Расчётом большепролетных клееных деревянных конструкций, их надёжностью и безопасностью занимался известный российский учёный проф. Е. Н. Серов.

Известны и 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 : *Kevarinmäki, Blaß 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., Blaß H.J., Uibel T., Strassmann B., Pirnbacher G., Frese M., Fellmoser P., Blaß H.J., Hübner U.* В соответствии с такими нормами как, СП 64-13330-2011, *ÖNORM EN 1995-1-1:2009, DIN 1052:2008, SIA*

265:2003 предложены методики и формулы для 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, пункт 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 и Ansys 15.0*.

Теоретическое и практическое значение диссертационной работы заключается в том, что результатом являются предложение новой более эффективной конструкции соединения деревянных элементов на основе металлических накладок с использованием металлической зубчатой пластины, обоснованные методики испытаний и расчёта соединений элементов деревянных конструкций 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. II 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 112 наименований.

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 пластиной в 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.

ГЛАВА 1. РАЗВИТИЕ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ И МЕТОДИК ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

1.1. Общие сведения из истории развития соединения на металлических накладках типа *SHERPA* в деревянных конструкциях

С тех пор как основатель компании *Vinzenz Harrer GmbH*— Винценц Харрер [97] обосновал в 2004 г. необходимость разработки нормативных систем соединений и крепежа деревянных конструкций с использованием совершенной системной технологии, идея самого первого крепежа типа *SHERPA*, основанного по принципу: объединить два алюминиевого элемента, создавая (перевернутую) форму давно известного соединения типа «ласточкин хвост».

С 2005 года до 2013 исследовательская работа проводилась при сотрудничестве с техническим университетом Грац и была проверена нормативная система. Новая серия *XL/DXL* способна нести нагрузку максимально до 280 кН, что расширяет возможность проектирования крупных деревянных конструкций. В номенклатуре изделий: крепежи для соединения между собой деревянных конструкций, а также соединения с элементами из других материалов, таких как сталь, бетон или железобетон, стеновые крепежи, опор, специальных винтов и слоев противопожарной защиты.

Системы соединения типа *SHERPA*, применяемые проектировщиками, архитекторами и инженерами по достоинству оценивающих технические свойства деревянных материалов в своих проектных работах, могут быть использованы для

балконов, лестниц, дизайна интерьера, мебели или деревянных конструкций, коммерческого строительства, жилых и нежилых зданий, мостов и т.д. Эта очень удобная и эффективная система соединения, которая позволяет значительно сократить срок сборки. Главной целью исследований было оптимизировать процесс от проектирования до монтажа и получить наибольшую эффективность.

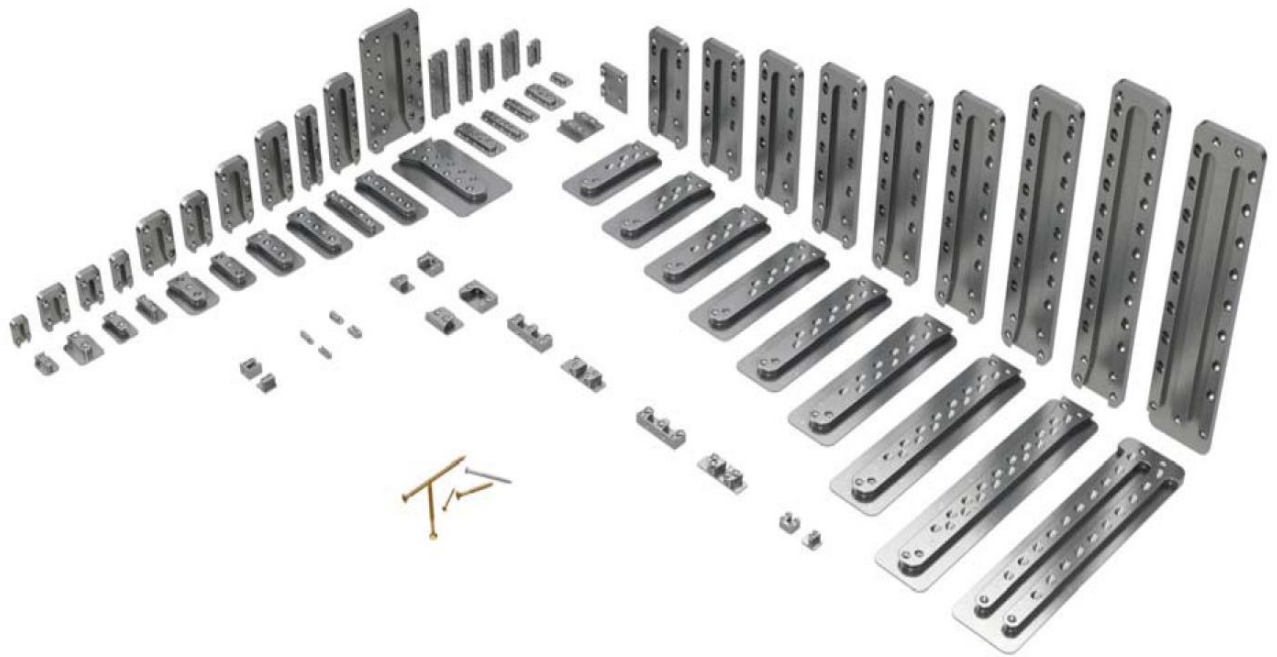


Рис. 1.1 Общий вид серии крепежа типа *SHERPA*

Данная своеобразная и удобная техническая продукция позволяет надежно передать горизонтальные и вертикальные нагрузки, воспринимать воздействие на сжатие, растяжение и изгиб по трем взаимно перпендикулярным осям (рис. 1.2). Разнообразие соединений, изготовленных специально для конкретного проектирования конструкций, обеспечивают длительную, надежную, прочную передачу нагрузки. Соединители типа *SHERPA* многократно проверены и являются безопасными на основе научно-исследовательских испытаний, о чем свидетельствуют выводы в работе [98]:

- одобрение Генерального строительства от "Немецкого института

строительных технологий, Берлин" (Немецкого института строительных технологий, Берлин) для разъемов типа *SHERPA* - древесина серии *Z-9.1-788*;

- одобрение Генерального строительства от "Немецкого института строительных технологий, Берлин" (Немецкого института строительных технологий, Берлин) для разъемов типа *SHERPA* - XL / DXL серии *Z-9.1-558*;

- европейское техническое одобрение со стороны "Австрийского института строительных технологий" (Австрийский институт строительной техники) для разъема модели *AE* и *S1-S5* соединители для древесины *ETA-12/0065*;

- европейское техническое одобрение со стороны "Австрийского института строительных технологий" (Австрийский институт строительной техники) Трехмерных гвоздевых пластин (балки с торцовыми соединителями для соединений дерева к дереву) *ETA-12/0067*;



Рис. 1.2. Конструктивная схема работы соединения типа *SHERPA* [42]

Соединенные элементы типа *SHERPA* могут быть разделены на 3 типа (рис. 1.3):

- линейка древесины - традиционных соединений балок со стропилами, соединения крыш, стен и деревянных конструкций;
- линейка *XL* - инженерных деревянных сооружений с большой несущей способностью;
- линейка сборки - для лестничных маршей, балконов, подиумов, соединений стен, соляриев, гаражей;



Рис. 1.3. Типы соединительных элементов типа *SHERPA*: *а*— линейка древесины; *б*— линейка *XL*; *в*— линейка сборки

В данное время серии продукции типа *SHERPA* могут быть использованы в различных областях, как: многоэтажные здания, каркасная конструкция со стеновыми панелями из *CLT*; специальное сооружение, большепролетная крыша на спортивном стадионе; велосипедные и пешеходные мосты, клееная стропильная балка, поддерживающая на клеёных перекладинах, с мостовым настилом конструкции панели из *CLT*; звездообразные конструкции; круговые конструкции.

Большепролетные конструкции с использованием металлических накладок типа *SHERPA* включают в себя:

- однопролетная конструкция с клееной стропильной балкой, с использованием крепежа для соединения стропильной балки с пилеными или клееными поперечными элементами;

- соединение обрешетки с клееной стропильной балкой; однопролетная конструкция с клееной стропильной балкой;
- однопролетная конструкция со стеновыми панелями из *CLT* для поперечного крепления или в качестве элементов фасада; стеновые панели из *CLT*, крепленные с колоннами однопролетной конструкции;
- однопролетная конструкция с клееной стропильной балкой и жестким уклонным соединением; соединение клееной стропильной балки со свесом крыши;
- двухпролетная конструкция с клееной стропильной балкой; соединение клееной стропильной балки со свесом крыши;

1.2. Традиционный и зарубежный опыт применения серий продукции типа *SHERPA* в деревянных конструкциях

1.2.1. Сравнение традиционных и современных соединений

Соединения, которые крепятся к деревянными элементами из комбинации главной и второстепенной балки, могут быть разнообразных типов. В настоящее время используется множество плотницких, инженерных и систематичных соединений. Плотницкие соединения включают в себя соединение шипов в гвоздях, ласточкин-хвост и врубку, у которых есть различные достоинства и недостатки, как: для ласточкин-хвоста (рис. 1.4, *а*) крепеж может передать усилия по всем направлениям, но усушка и набухание древесины влияют на несущую способность соединения; соединение шипов (рис. 1.4, *б*) - это традиционное соединение, несущая способность у которого вдоль волокон выше, чем поперёк волокон. Инженерные соединения включают в себя соединение с использованием

металлических решетчатых накладок и нагелей, стальной хомут, соединения с использованием шурупов, у которых есть различные достоинства и недостатки, как: соединения с использованием металлических решетчатых накладок (рис.1.4, в) могут воспринимать воздействие на сжатие, растяжение и скалывание, но ограничения габаритов деревянных элементах приводят к тому, что в процессе эксплуатации и монтажа в деревянных элементах и металлических накладках появилось неравномерное распределение напряжений и деформаций из-за усушки и набухания древесины; для стального хомута (рис. 1.4, г) соединение может воспринимать воздействие на сжатие, растяжение и скалывание, но противопожарной защиты у него нет; соединения с использованием шурупов (рис. 1.4, д) имеют низкую себестоимость. При этом, имеют низкую несущую способность на скалывание, растяжение и сложные в монтаже. В последние годы с развитием инженерных соединений появились более новые современные конструкции на основе экспериментальных исследований. С учётом комбинации шурупов с металлическими накладками соединительная система (рис. 1.4, е) содержит в себе следующие достоинства:

- удобство и быстрота сборки;
- высокий уровень предварительной сборки на заводе;
- более высокая прочность соединений, воспринимающих нагрузку до 280 кН;
- безопасность и надежность, обеспечиваемая общестроительным сертификатом;
- многофункциональность;

По сравнению с традиционным инженерным соединением крепеж типа *SHERPA* не только имеет регулируемый габарит детали, но может обеспечивать невидимость соединения как плотницкое соединение «ласточкин-хвост» для повышения огнестойкости. Поскольку металлические накладки могут защищать окружающую древесину от влияния огня, соединение обладает более высокой огнестойкостью.

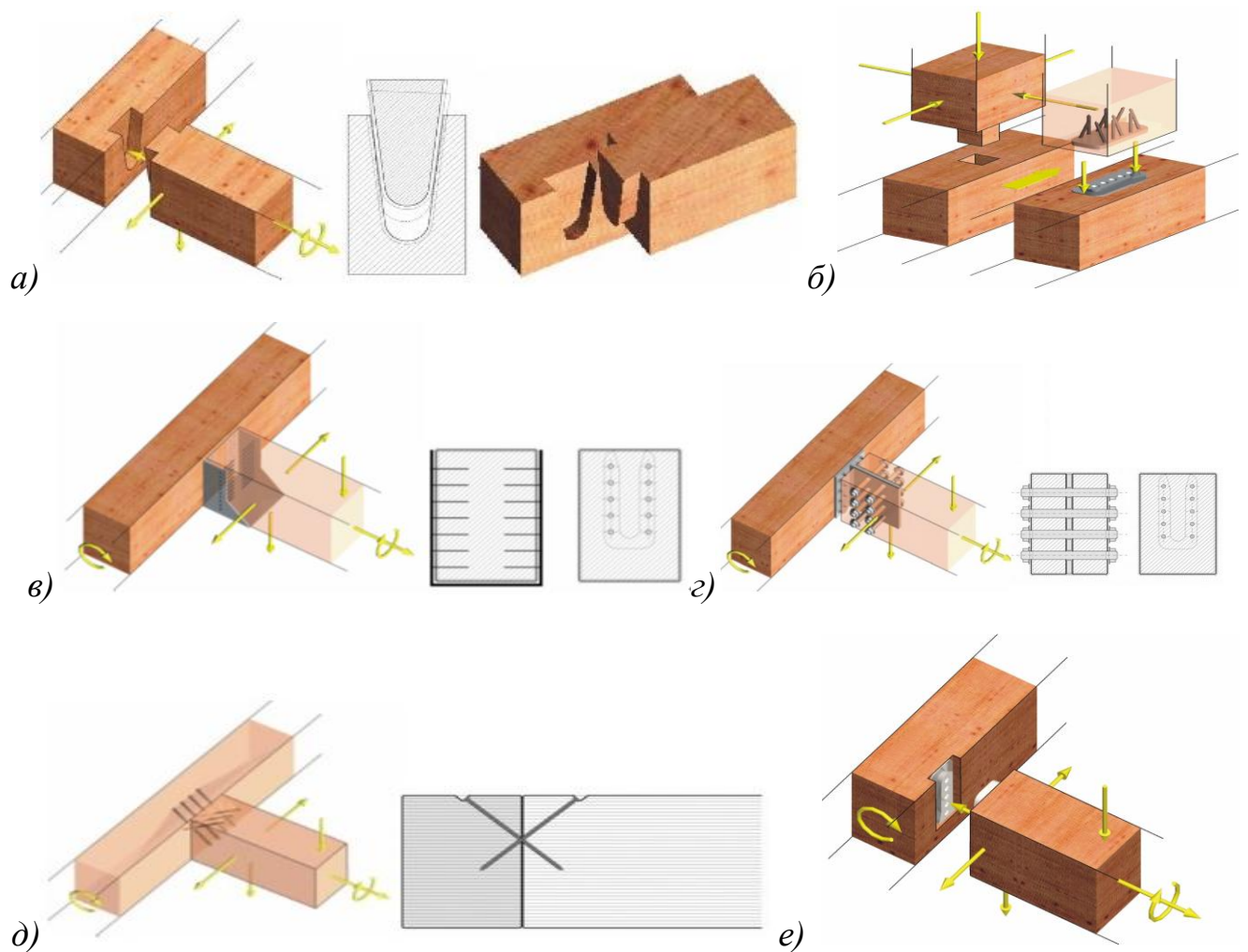


Рис. 1.4. Сравнение традиционных и современных соединений в деревянных конструкциях [99]: *а*— ласточкин-хвост; *б*— соединение шипов в гнездах; *в*— металлический хомут; *г*— металлические накладки типа *SHERPA*; *д*— соединение с использованием шурупов; *е*— соединение с использованием решетчатых накладок и нагелей

1.2.2. Существующие деревянные здания в мире с использованием соединения на металлических накладках

Соединение типа *SHERPA* многократно были использованы в деревянных конструкциях при проектировании, проведенного строительными и перерабатывающими компаниями.

Заслуживает внимания, и система покрытия плавательного бассейна, построенного в Аворице во Франции в 2012 г. с использованием соединения типа *SHERPA* (рис. 1.5). Такой коммерческий и развлекательный центр-плавательный бассейн, который находится на вершине горы, самый высокий аквапарк в Европе. Особенный опыт свидетельствует о том, что соединение, установленное в соединительной деревянной системе крыши, обладает высокой надежностью и несущей способностью при воздействии ветра и снеговых нагрузок в окружающей среде, такой как горная область.

Модуль стоечно-балочной конструкции «школа для обучения медсестер», которая состоит из деревянных стоек, поперечных балок (перемычек), была выполнена в Люксембурге в 2011 г. (рис. 1. 6) [98]. Между собой конструкции из массивной клееной древесины и несущие опоры и балки соединялись с использованием соединения типа *SHERPA*. При такой системе были получены более просторные внутренние пространства, большие площади проемов для улучшения освещения в помещениях. С целью эстетического оформления на фасаде здания в проёме может быть установлено стекло.

Церковь Риф-Таксахи, состоящая из стеновой панели из *CLT* и массивных клееных балок, была построена в Австрии за 2 года с 2012 г. по 2013 г. (рис. 1.7)

[98]. С помощью соединения массивные балки могут крепиться к поверхности несущих стен. Применение стеновой панели из *CLT* позволяет усовершенствовать процесс устройства проемов в стенах.

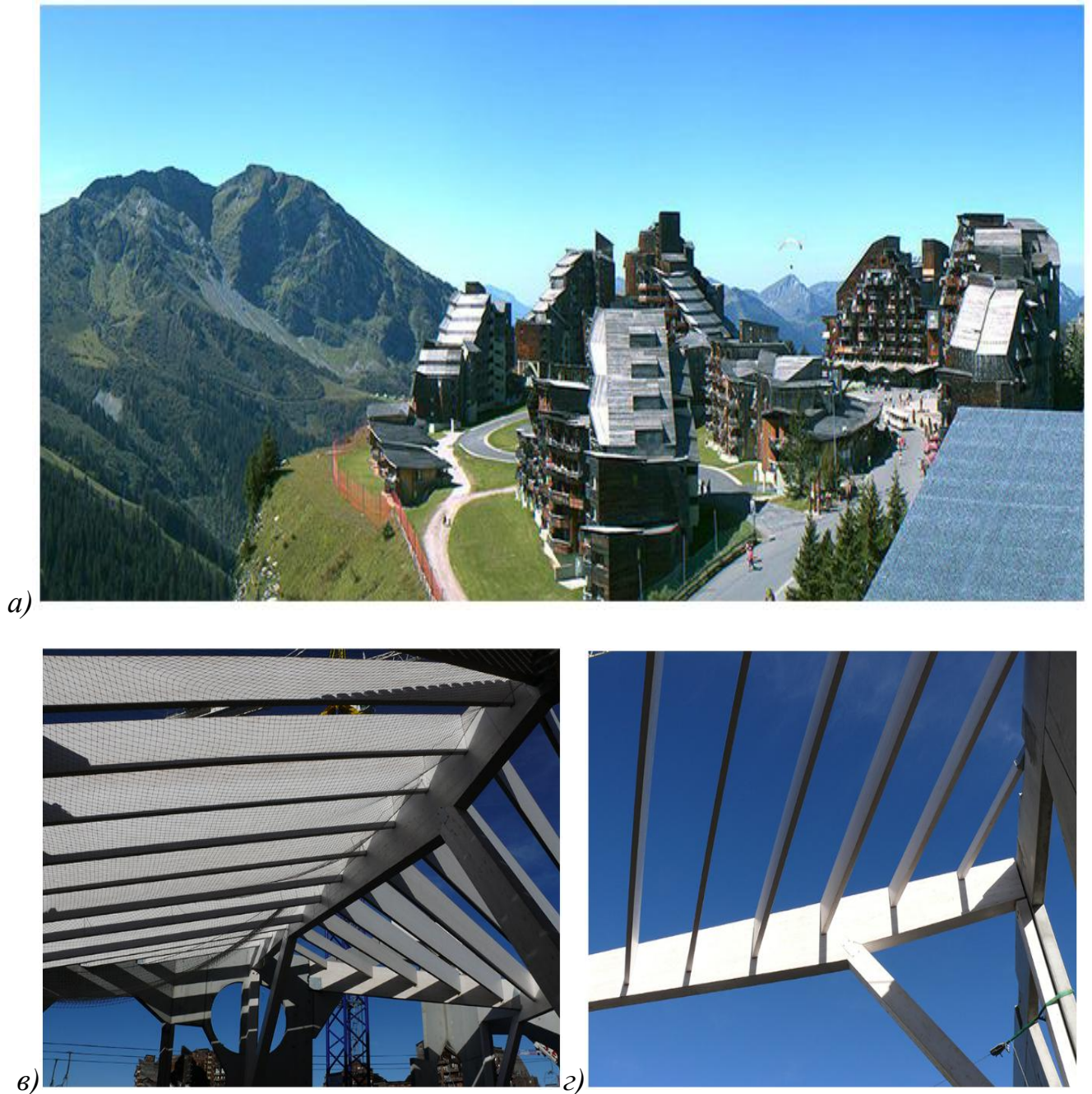


Рис.1.5. Плавательный бассейн в Аворице из Франции, год постройки 2012: а) общий вид комплексного здания; б)-в) конструкция крыши с использованием соединения типа *SHERPA*



Рис. 1. 6. Школа для обучения медсестер в Люксембурге, год постройки 2011: *а*— общий вид стоечно-балочной конструкции; *б*— расположение соединения типа *SHERPA*; *в*— сборка деревянных элементов

Деревянное здание «Торговый центр» в Нойфурте в Австрии было построено в 2012. г (рис. 1.8) [98]. В конструкции здания используется комбинация железобетонных колонн с деревянными клеёными балками, воспринимающими более высокую нагрузку от оборудования, людей, животных, складированных материалов. Из-за невидимости соединения типа *SHERPA* и простоты сборки расширяется верхнее свободное пространство.

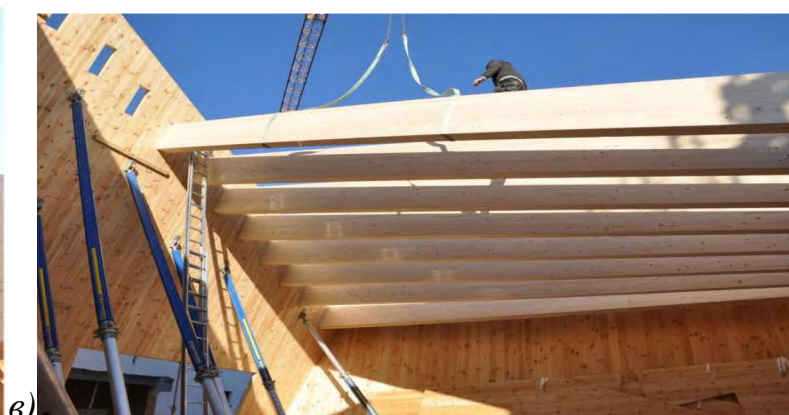
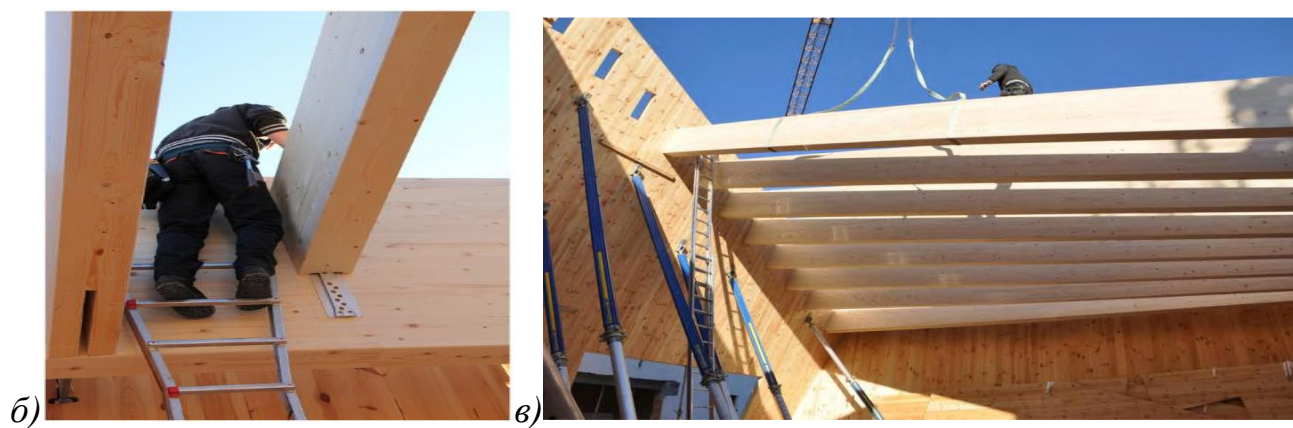


Рис. 1. 7. Церковь Риф-Таксах в Австрии, год постройки 2012/13: *a*— общий вид здания; *б*— монтаж балки; *в*— основная конструктивная структура





Рис. 1.8. Торговый комплексный центр в Нойфурте в Австралии, год постройки 2012 [74]: а)-б) монтаж второстепенной балки с главной; в— подвес несущей стены с проёмом

Большепролетная кровля в хоккейном зале с использованием соединения типа *SHERPA* впервые была возведена в Швейцарии в 2012 г. (рис. 1.9) [98]. Дощатоклеенные гнутые рамы были выполнены трехшарнирными, что облегчило их изготовление, транспортировку и монтаж. Криволинейность карнизных узлов достигается выгибом слоев по окружности при изготовлении рам. С применением соединения продольные балки, которые могут крепиться к поверхности дощатоклеенных гнутых рам, позволяют повысить надёжность конструкции крыши в целом.

Вышеперечисленные здания были запроектированы и построены архитекторами *Rollimarchini Architekten GmbH* в Берне, *Team K Architekten AG Burgdorf* и инженерами *Indermühle Bauingenieure* в Туне, *ArGe Kühni AG*, *Ramseier AG* и *Hirsbrunner AG*, *Lädrach AG* [98].



а)



б)



в)

Рис. 1.9. Зал хоккейный в Швейцарии, год настройки 2012: *а*— общий вид конструкции крыши; *б*— внешний фасад; *в*— расположение соединения типа *SHERPA*

1.2.3. Новое развитие и перспективы деревянных зданий— многоэтажные здания из стеновых панелей, состоящих из поперечно-клееной древесины

Научные исследования, поставившие цель развития современной технологии разработки стеновой панели из *CLT* (рис. 1.10) ассоциацией Австрийской деревянной, были проведены в середине 90-х годов прошлого века. В начале 21-ого века строительство деревянных конструкций в соответствии с требованиями новой технологии существенно увеличилось. *CLT* (панель из поперечно-клееной

древесины) — это массивный, многослойно клееный деревянный материал, применяемый в строительстве. Поскольку проклейка слоев крест-накрест была проведена под высоким давлением, характеристики усадки и набухания деревянных материалов сокращены до минимума. Такой современный строительный материал приведет к открытию новых возможностей в деревянном многоэтажном домостроении. В настоящее время стеновая панель из *CLT* широко используется в строительстве в всем мире и спрос на неё постоянно увеличивается.



Рис. 1. 10. Общий вид образца стеновой панели из *CLT*

До недавнего времени строительство многоэтажных деревянных зданий было невозможным из-за ограничения применения традиционных методов деревянного строительства и относительно несовершенной технологией переработки древесины. Благодаря новому материалу— стеновые панели из *CLT* появилась возможность строительства многоэтажных зданий. Поскольку стеновые панели из *CLT* могут быть предварительно изготовлены на заводе, то применение в процессе домостроения такого материала приведет к более короткому сроку сборки и меньшим количествам отходов.

В России ведущим производителем в строительстве деревянных многоэтажных зданий является компания «Промстройлес», которая создала специальную линию по производству стеновой панели из *CLT* в Санкт-Петербурге. В последнее время в России были построены несколько многоэтажных деревянных зданий. Первые подобные сооружения появились в Москве, Перми и Санкт-Петербурге.

В настоящее время еще не так много было построено многоэтажных зданий с использованием стеновой панели из *CLT*, чтобы проводить научно-исследовательские статистические наблюдения. Исследованиями и опытно-конструкторскими разработками в данной области занимались такие учёные как, *Blaß, H.J., Görlacher, R.* [56], *Schickhofer, G., Moosbrugger, T., Jöbstl, R.-A., Hasewend, B., Traetta, G.* [73], *Moosbrugger, T., Guggenberger, W., Bogensperger, T.* [69], *Bosl, R.* [59], *A. Ceccotti, M. P. Lauriola, M. Pinna, C. Sandhaas* [52], *Jeitler G.* [64], и др. На основе данных научных работ было установлено, что деревянные конструкции из стеновой панели из *CLT* обеспечивают высокую прочность, сопротивляемость к сжатию и растяжению, устойчивость к гниению.

Самое высокое деревянное здание «*Stadthaus*»- 9 этажей с высотой 32 м в Европе, которое содержит 29 квартир, было возведено в Лондоне в 2008 году [96] (рис. 1.11). Его несущие конструкции полностью состоят из перекрытий и стен, изготавливаемых из стеновой панели из *CLT*. Геометрический габарит конструктивного элемента составляет максимально до 9,14 м. Поскольку пространство каждого этажа разделяется на несколько помещений, это позволяет обеспечить надёжность и устойчивость здания.

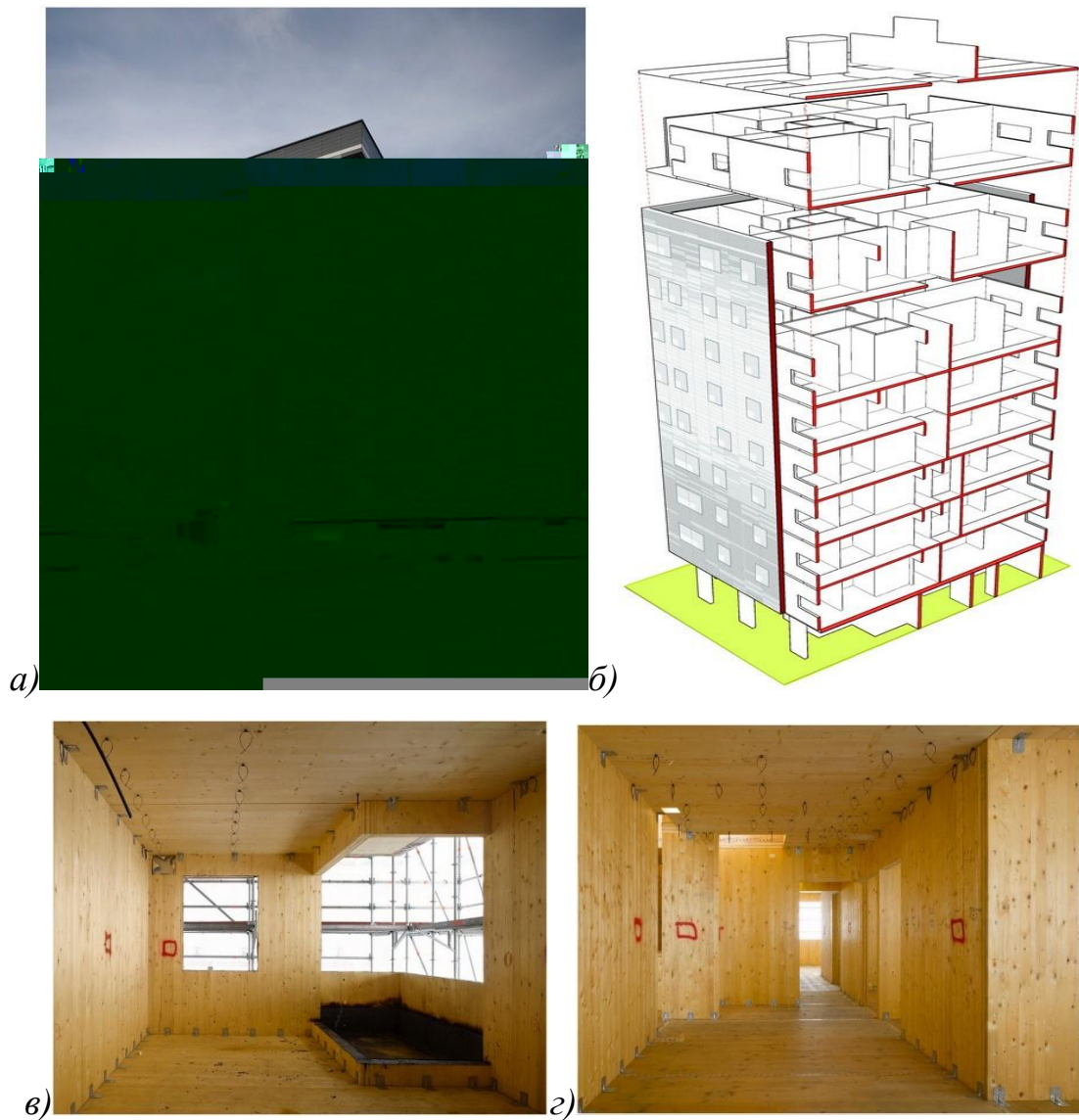


Рис. 1.11. Самое высокое деревянное здание в Европе с использованием стеновой панели из CLT «Stadthaus» в Лондоне, год постройки 2008 г.: а— внешний фасад; б— трехмерное моделирование; в) и г) внутренняя структура

В 2010 г. школа «Открытая академия» [100] (рис. 1.12.), построенная в Англии, до сих пор самое большое деревянное комплексное здание в Великобритании. Главное сооружение составляет 3 этажа, центральная высота куполообразных крыш достигает 18 м. С учетом смежного спортивного стадиона в итоге площадь школы составляет 9500 м². Основная конструкция полностью

состоит из несущих стеновых панелей из *CLT* и клееных деревянных балок с пролётом максимально до 28 м, изготовленных из австрийской компании- *KLH*.



Рис. 1.12. Школа «Открытая академия» в Великобритании, год постройки 2010 г.:

а— внешний фасад; *б*— куполообразная крыша; *в*— деревянная клееная балка;

1.2.4. Сравнение различных деревянных конструкций

В настоящее время в строительстве деревянных зданий конструктивные схемы могут быть разделены на 3 типа (рис. 1.13):

- каркасная конструкция

Самой общепринятой технологией строительства деревянных каркасных зданий является их сборка из готовых компонентов. Каркас стен в высоких зданиях изготовлен из массивной фанерной или клееной древесины, выпускаемой в виде нормативных стройматериалов с определенными размерами. С использованием массивной клееной древесины могут быть построены здания выше четырех этажей. Для увеличения пролета, ранее было принято увеличивать в конструкции из бетона и древесины или их высоты, или расхода этих материалов.

- Конструкция из стеновых панелей из *CLT*

Несущие стены могут быть изготовлены из стеновых панелей из *CLT*, служащих несущими компонентами для деревянных зданий, а также играют укрепительные роли в конструктивной системе перекрытий и стен. С использованием стеновых панелей из *CLT* может быть упрощен процесс устройства проемов в стенах и перекрытиях, а также в наружных конструкциях. 12-этажное здание может быть построено за счет несущей способности стеновых панелей из *CLT*. Строительные элементы в составе стеновых панелей из *CLT*, в частности, окна, двери и изоляционные и облицовочные материалы, могут быть предварительно изготовлены на заводе.

- Конструкция из стоечно-балочного каркаса

Стойечно-балочная конструкция может быть построена на основе соединений между собой несущих балок и опор из массивной клееной древесины. Перекрытиями и стеновыми конструкциями заполняются промежутки каркаса. Несущая способность каркаса зависит от установки колонн или раскосов, придающих постройке дополнительную жесткость. Внутреннее пространство

может быть расширено с использованием стоечно-балочной системы, а также расширены площади проемов в стеновых конструкциях. Поскольку в здании не были приняты несущие перегородки, планирование внутренних комнат можно свободно регулировать. Фасады могут быть закрыты большими застекленными площадями.

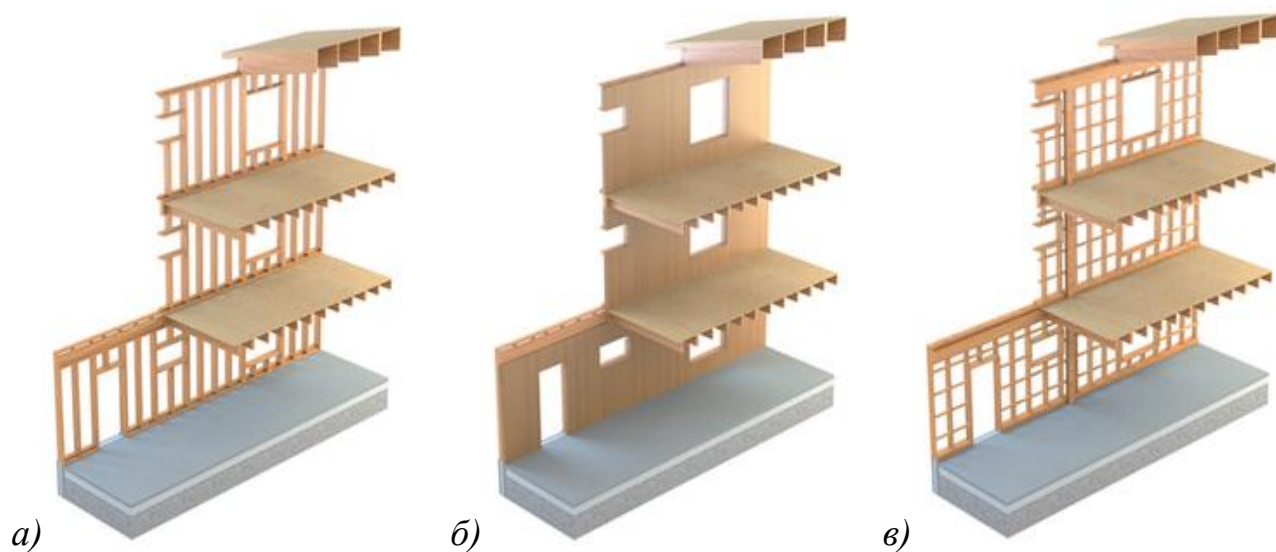


Рис. 1.13. Сравнение различных конструктивных деревянных схем [101]: а— каркасная конструкция; б— конструкция из стеновых панелей из CLT; в— конструкция из стоечно-балочного каркаса

Из вышеприведенных общих сведений из истории развития соединения на металлических накладках типа *SHERPA* видно, что применение изобретения соединения зависит от развития технологии переработки древесины и требований в экологическом и экономическом плане. В связи с целым рядом преимуществ соединения можно проектировать более надёжные, экономичные многоэтажные деревянные здания.

1.3. Развитие и совершенствование методов расчета несущей способности соединения на металлических накладках

1.3.1. Исследование несущей способности соединения на металлических накладках типа *SHERPA*

Крепеж типа *SHERPA*, используемый в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* или *LVL*, позволяет надежно передать горизонтальные и вертикальные нагрузки, воспринимать нагрузку на сжатие, растяжение и срез по трем взаимно перпендикулярным осям. Направление нагрузки вдоль вставки металлических накладок с учетом влияния эксцентриситета значительно влияют на несущую способность крепежа. Поскольку соединение на металлических накладках состоит из двух алюминиевых деталей и шурупов, при анализе несущей способности нужно учитывать следующие факторы:

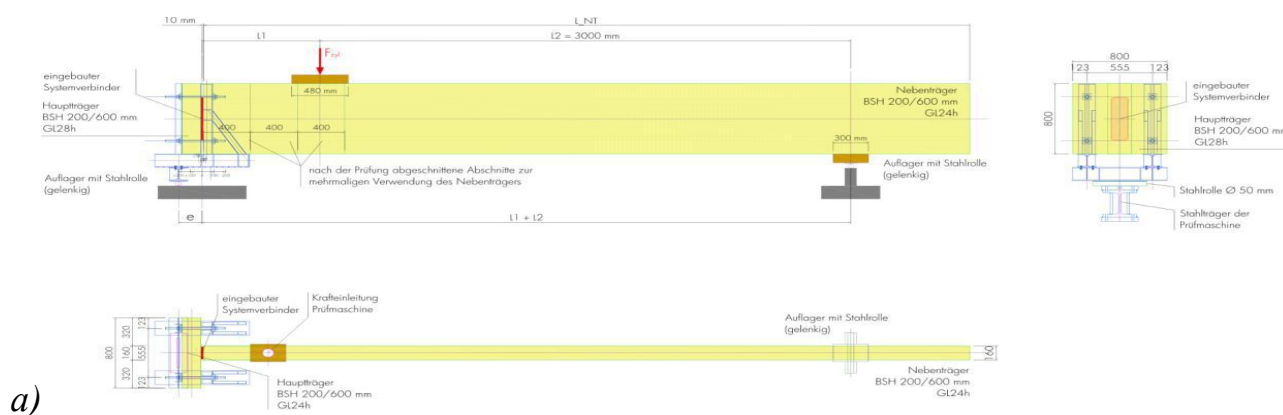
- несущую способность шурупа на выдергивание, срез и изгиб, Н;
- прочность при смятии в гнезде металлических накладок под шурупы, МПа;
- длина распределения напряжения при смятии в гнезде древесины, мм;
- длина резьбовой части шурупа, мм;
- зазор между металлическими накладками и деревянными элементами, мм;
- толщина деревянного элемента и металлических накладок, мм;
- угол между осью шурупа и направлением волокон;
- плотность древесины, кг/м³;

В мире широко используются различные виды крепежа элементов деревянных конструкций, позволяющие сократить время сборки и обеспечивающие надежность конструкций. Наиболее широкое развитие и применение в деревянных

домостроениях получили нагельные соединения благодаря значительному вкладу в их разработку, исследование известных российских учёных Б. Л. Николаи [29, 30], В. Ф. Иванова [11], А. Я. Найчука [31], В. В. Большакова [15], А. В. Павлика [6], Г. Г. Никитина [27, 28], В. А. Кононова [12], С. М. Чернявского [51], Ю. В. Пискунова [40, 41], А. Г. Черных [47, 48, 49] 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. В работах П. А. Дмитриева [7, 8, 9], В. В. Пуртова [4, 39] и Г. Г. Карлесена [15] проведено исследование несущей способности дюбелей и нагельных соединений, прочности древесины на смятие в отверстиях. В научной монографии российских учёных Глухих В. Н. и Черных А. Г. [5] подобно рассмотрены вопросы анизотропии усушки, упругих характеристик древесины, сопротивляемости предотвращению поперечного коробления пиломатериалов в процессе сушки. Проф. Лабудин Б. В. [18-23] исследовал соединения деревянных конструкций композиционным материалом на основе эпоксидной матрицы и стеклоткани. Совместную работу клеенных стальных стержней в деревянных конструкциях исследовал российский учёный Ф. А. Бойтемиров. В ЦНИИСК им. «В. А. Кучеренко» А. А. Погорельцевым [37, 38] и другими [33-36, 24-26] был выполнен расчёт растянутых стыков КДК на клеенных стержнях. Расчётом большепролетных клееных деревянных конструкций, их надёжностью и безопасностью занимался известный российский учёный проф. Серов Е. Н. [44-46].

В компании *SHERPA* [42] были представлены экспериментальные результаты

несущей способности соединения на металлических накладках. В работах *T. Bogensperger* и *F. Hude* [75] было проведено теоретическое и экспериментальное исследование несущей способности соединения на стальных накладок в деревянных конструкциях главной и второстепенной балки. В статье *Manfred. Augustin* и *Georg. Flatscher* [67] был проведен сравнительный анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований. В работах *Manfred. Augustin* [68] было проведено экспериментальное исследование, подтверждающее достоверность расчётных результатов в соответствии с работой [68]. В работе *Manfred. Augustin* [43] были проведены испытания по определению несущей способности типов продукции *SHERPA-XL* (*SHERPA-Alt-250* и *SHERPA-Alt-140*) на растяжение, срез и выдергивание шурупов. В статье *DI. Hanns. Schinner* [61] была предложена математическая модель расчёта несущей способности соединения на металлических накладках, которые крепятся к железобетонному фундаменту. До сих пор нет универсального аналитического алгоритма расчёта несущей способности соединения на металлических накладках в деревянных конструкциях стеновой панели из CLT и балки из LVL или CLT. На рис. 1.14 приведена испытательная установка соединения на металлических накладках в деревянных конструкциях главной и второстепенной балки из клеённой древесины [68].



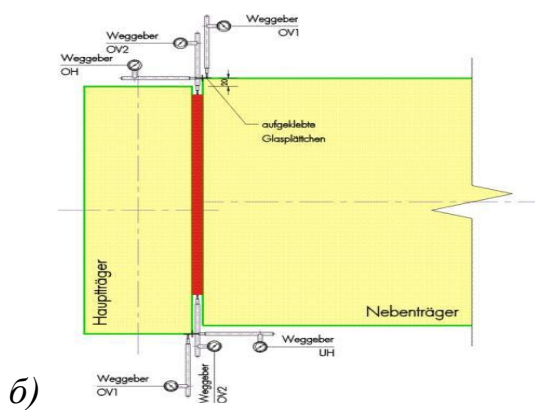


Рис. 1.14. Испытательная установка соединения на металлических накладках в деревянных конструкциях главной и второстепенной балки из клеённой древесины: *а*— установка опытных деревянных образцов ; *б*— установка измерительных инструментов; *в*— универсальная испытательная машина

1.3.2. Исследование методики повышения несущей способности соединения элементов деревянных конструкций на металлических накладках с металлической зубчатой пластиной

Металлическая зубчатая пластина (МЗП), изготавливаемая из листовой стали толщиной от 1 до 2 мм по методу холодной штамповки, использованы в соединительных системах деревянных конструкций. Прочность древесины при смятии в гнезде под шурупы значительно влияет на несущую способность соединения. Это может быть достигнуто за счёт введения в конструкцию крепежа дополнительной металлической зубчатой пластины, благодаря которой происходит перераспределение усилий, воспринимаемых каждым элементом соединения. За счет уменьшения напряжений смятия можно значительно повысить несущую способность соединения. Соединение на металлических накладках с укреплением

МЗП в деревянных элементах приведен на рис. 1.15. Вопросами разработки метода расчёта, прочности и деформации соединений элементов на МЗП посвящены работы Г. П. Албаута, М. В. Табанюховой, А. М. Дурновского [10], В. Г. Котлова [13], А. В. Крицина [14], Д. В. Лоскутовой [16], А. К. Наумова [32]. В работах *Kevarinmäki* (1995) [66] методика повышения несущей способности нагельных соединений с укреплением МЗП впервые была предложена. В работах *Blaß, H. J. , Schmid, M. u Werner, H* [57] были проведены испытания по определению несущей способности нагельных соединений элементов деревянных конструкций на срез с применением МЗП и предложена расчётная методика в соответствии с *EC5 и 1052:2008-12*.

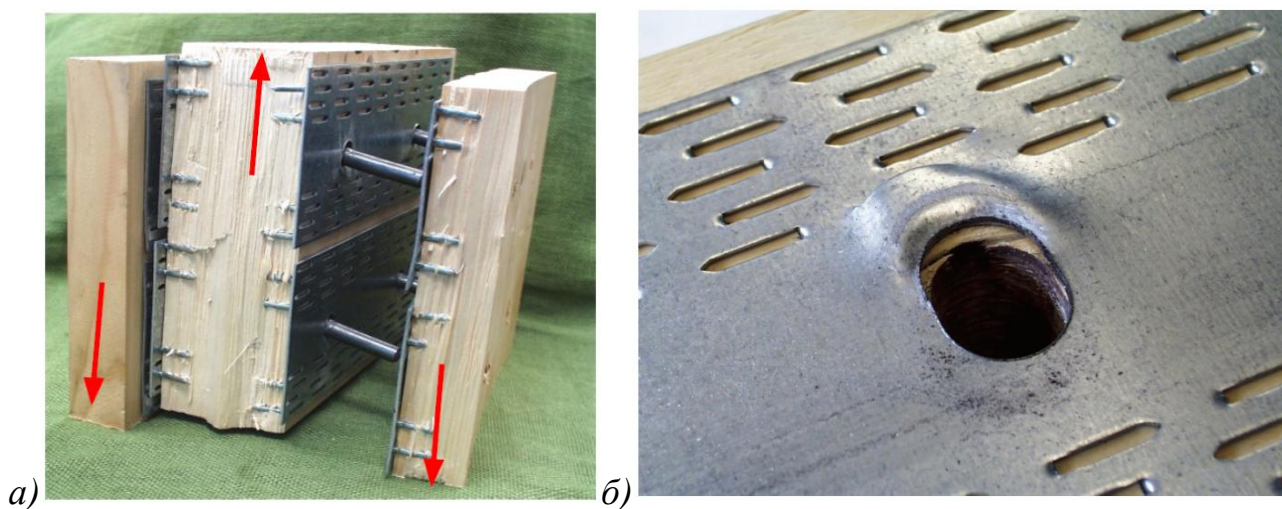


Рис. 1.15. Испытание по определению несущей способности нагельных соединений элементов деревянных конструкций на срез с укреплением МЗП: *а*— конструктивная схема соединения; *б*— пластическая деформация при смятии в гнезде металлической накладке под шурупы

ГЛАВА 2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ НАКЛАДКАХ

Внедрение в практику расчёта несущей способности соединения на металлических накладках при растяжении, сжатии и срезе по трем взаимно перпендикулярным осям, обусловленные сопротивлением шурупов на выдергивание и срез, требует уточнения изложенных аналитических исследований в соответствии с различными моделями, позволяет построить универсальный алгоритм в области упругой деформации.

Целью аналитических исследований явилось формирование математической модели расчёта несущей способности соединения на металлических накладках в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* и *LVL* без укрепления и с МЗП по критериям сопротивления шурупов на выдергивание и срез на основе, как существующих методик по различным моделям, так и механизма разрушения шурупа при изгибе в соединениях деревянных конструкций.

Блок— схема по определению оптимальной математической модели расчета несущей способности шурупа на срез в соединениях с металлической накладкой представлена на рис. 2.1. Автором предложена конструктивная схема соединения деревянных конструкций на металлических накладках с укреплением МЗП, представленная на рис 2.2 и 2.3.

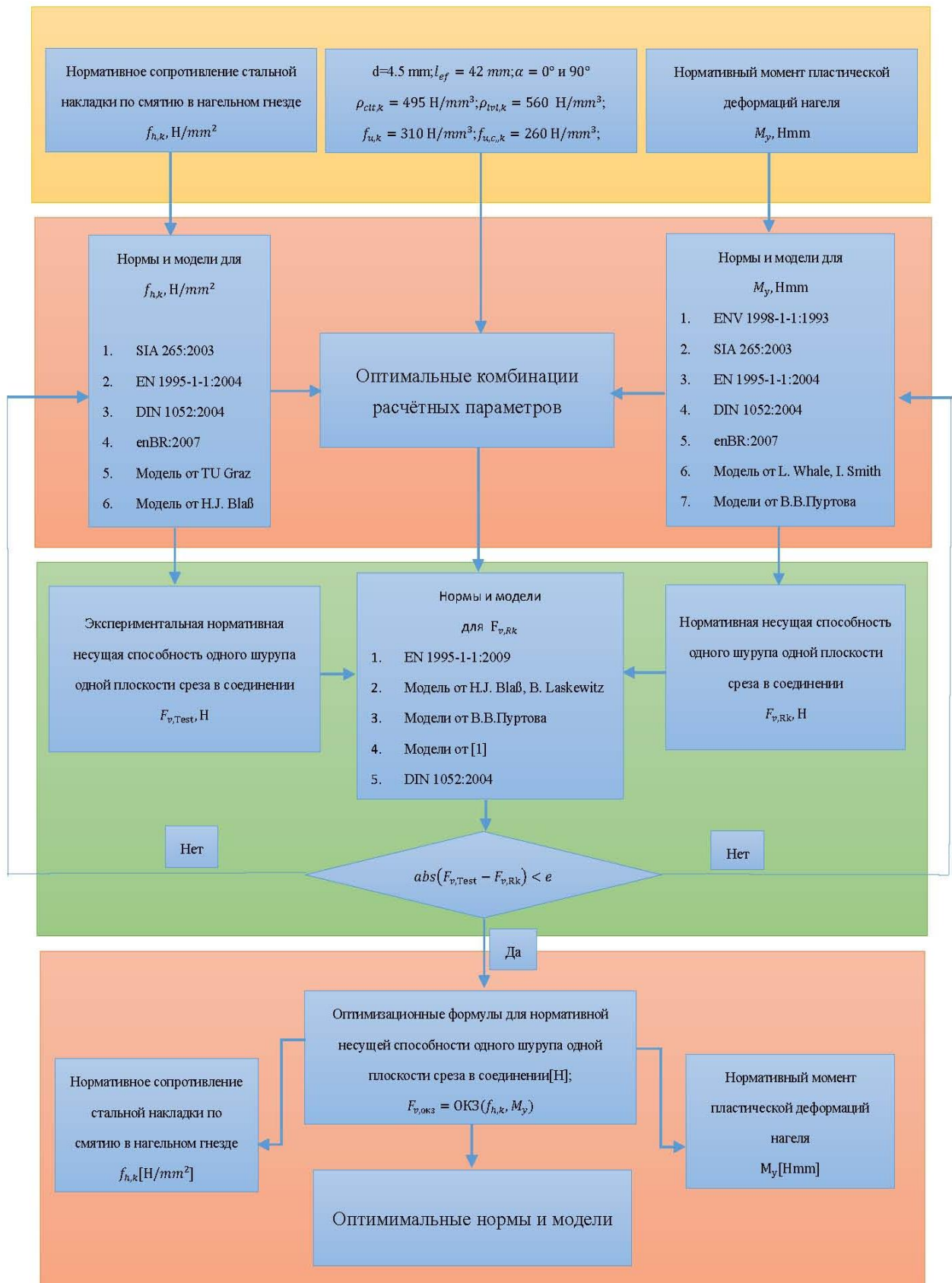


Рис. 2.1. Блок—схема по определению оптимальной математической модели несущей способности шурупа на срез в соединениях на металлических накладках

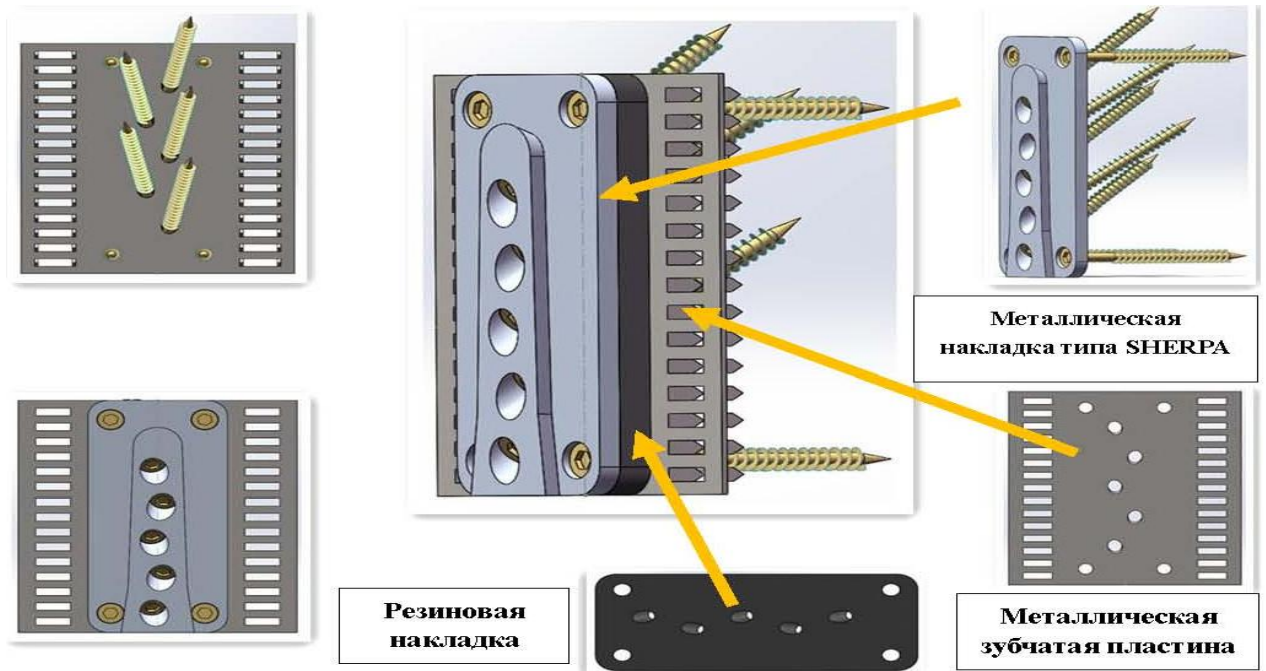


Рис. 2.2. Конструктивная схема соединения деревянных конструкций на металлической накладке с укреплением МЗП, которая крепится к торцовой поверхности стеновой панели

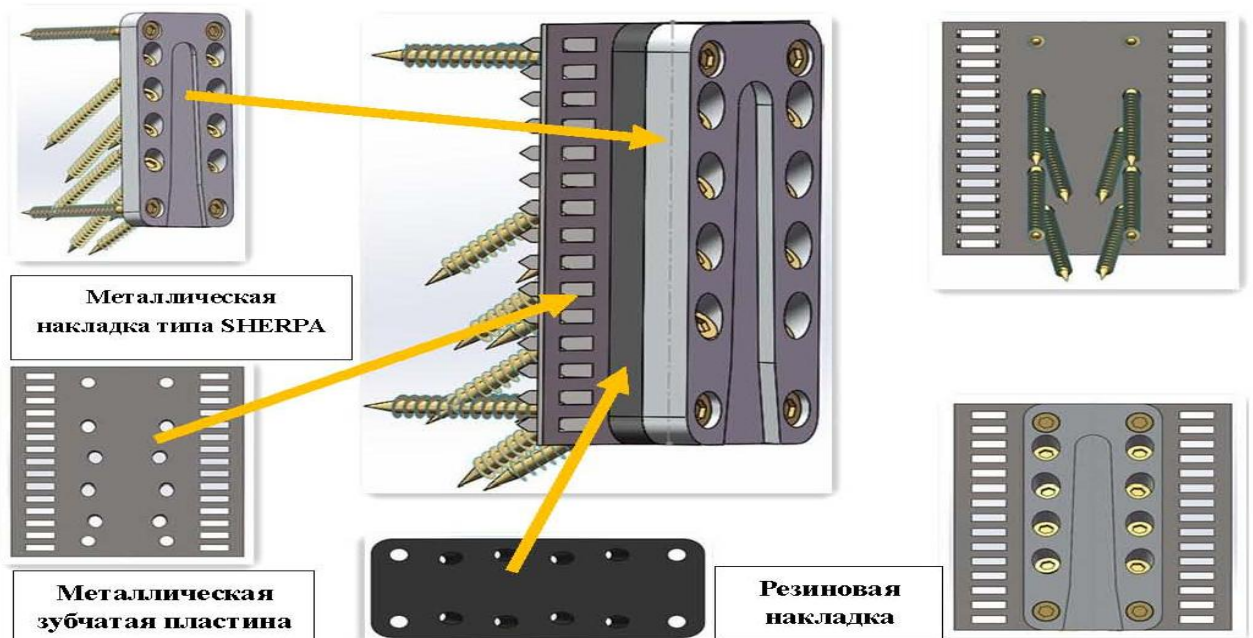


Рис. 2.3. Конструктивная схема соединения деревянных конструкций на металлической накладке с укреплением МЗП, которая крепится к торцовой поверхности балки

2.1. Математическая модель расчёта несущей способности шурупа на выдергивание

Несущая способность шурупа на выдергивание зависит от геометрических и физико-механических свойств шурупа, прочностных свойств деревянных материалов и эксплуатационных условий. Исследованиями в данной области занимались такие ученые как, *Schickhofer*. [97], *Plieschounig St.* [71], *Brandner R.* [60], *Blaß H.J.*, *Uibel T.* [55, 56], *Strassmann B.* [74], *Pirnbacher G.* [70], *Frese M.*, *Fellmoser P.*, *Blaß H.J.* [62], *Hübner U.* [63]. В соответствии с такими нормами как, *СП 64-13330-2011* [77], *ÖNORM EN 1995-1-1:2009* [94], *DIN 1052:2008* [90], *SIA 265:2003* [95] были предложены методики и формулы. Поскольку в этой диссертационной работе используются деревянные конструкции стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* и *LVL*, а аналитический алгоритм расчёта несущей способности шурупа на выдергивание из деревянных элементов из *CLT* отсутствует в *СНиП 64-13330-2011* [79], это ограничивает возможность оценки фактической несущей способности соединения с достаточной достоверностью при расчётах.

В настоящее время расчёт несущей способности шурупа на выдергивание в соответствии с различными нормами и научными исследованиями с учётом местного климата, уровня технологии переработки деревянных материалов, породы древесины и требованиями рынка, может быть выполнен по следующим формулам:

- модель от нормы *ÖNORM EN 1995-1-1:2009* [94]:

$$F_{ax.,\alpha,Rk} = \frac{n_{ef} \cdot f_{ax,k} \cdot d \cdot l_{ef} \cdot k_d}{1,2 \cdot (\cos \alpha)^2 + (\sin \alpha)^2} \quad (2.1)$$

$$f_{ax,k} = 0,52 \cdot d^{-0,5} \cdot l_{ef}^{-0,1} \cdot \rho_k^{0,8} \quad (2.2)$$

$$k_d = \min\left(\frac{d}{8}, 1\right) \quad (2.3)$$

$$n_{ef} = n^{0,9} \quad (2.4)$$

Где:

$F_{ax,\alpha,Rk}$ — несущая способность шурупа на выдергивание под углом α к волокнам, Н;

f_{ax}, f — сопротивление шурупа на выдергивание поперек волокнам, МПа;

k_d — коэффициент;

ρ_k — плотность древесины, кг/м³;

α — угол между осью шурупа и направлением волокон;

n_{ef} — расчётное число шурупов;

d — наружный диаметр резьбы шурупа, мм;

l_{ef} — длина резьбовой части шурупа, мм;

n — фактическое число шурупов;

- модель от нормы *DIN 1052:2008* [90]:

$$R_{ax,k} = \min\left(\frac{f_{1,k} \cdot d \cdot l_{ef}}{\frac{4}{3} \cdot (\cos \alpha)^2 + (\sin \alpha)^2}, f_{2,k} \cdot d_k^2\right) \quad (2.5)$$

$$f_{1,k} = 70 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2 \quad (2.6)$$

$$f_{2,k} = 80 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_k^2 \quad (2.7)$$

Где :

$R_{ax,k}$ — несущая способность шурупа на выдергивание под углом α к волокнам, Н;

$f_{1,k}$ — сопротивление шурупа на выдергивание перпендикулярно волокнам, МПа;

$f_{2,k}$ — прочность головки шурупа на растяжение, МПа;

d_k — наружный диаметр резьбы шурупа, мм;

ρ_k — плотность древесины, кг/м³;

α — угол между осью шурупа и направлением волокон;

d — внутренний диаметр резьбы шурупа, мм;

l_{ef} — длина резьбовой части шурупа, мм;

- модель от *SIA 265:2003* [95]:

$$R_{ax,d} = n^{0,9} (\pi \cdot d \cdot l_{ef}) \cdot f_{v,\alpha,d} \quad (2.8)$$

$$f_{v,\alpha,d} = \frac{f_{v,90,d}}{1,5(\cos \alpha)^2 + (\sin \alpha)^2} \quad (2.9)$$

$$f_{v,90,d} = 30 \cdot 10^{-3} (\pi \cdot d \cdot l_{ef})^{-0,2} \cdot \rho_k \quad (2.10)$$

Где:

$R_{ax,d}$ — расчётная несущая способность шурупа на выдергивание под углом α к волокнам, Н;

$f_{v,\alpha,d}$ — несущая способность шурупа на выдергивание под углом α к волокнам, Н;

n — фактическое число шурупов;

$f_{v,90,d}$ — сопротивление шурупа на выдергивание перпендикулярно волокнам, МПа;

ρ_k — плотность древесины, кг/м³;

α — угол между осью шурупа и направлением волокам;

d — наружный диаметр резьбы шурупа, мм;

l_{ef} — длина резьбовой части шурупа, мм;

• модель-1 от *H. J. Blaß* [54]:

$$R_{ax,\alpha,Rk} = \frac{31 \cdot d^{0,8} \cdot l_{ef}^{0,9}}{1,5 \cdot (\cos \alpha)^2 + (\sin \alpha)^2} \quad (2.11)$$

Где:

$R_{ax,\alpha,Rk}$ — несущая способность шурупа на выдергивание под углом α к волокнам, Н;

ρ_k — плотность древесины, кг/м³;

l_{ef} — длина резьбовой части шурупа, мм;

d — наружный диаметр резьбы шурупа, мм;

α — угол между осью шурупа и направлением волокам;

• модель-2 от *H. J. Blaß* [55]:

$$R_{ax,s,pred,1} = 0,445 \cdot d^{0,77} \cdot l_{ef}^{0,91} \cdot \rho_k^{0,75} \quad (2.12)$$

$$R_{ax,s,pred,2} = 0,435 \cdot d^{0,8} \cdot l_{ef}^{0,91} \cdot \rho_k^{0,75} \quad (2.13)$$

$$R_{ax,s,pred} = \min(R_{ax,s,pred,1}, R_{ax,s,pred,2}) \quad (2.14)$$

Где:

$R_{ax,s,pred}$ — сопротивление шурупа на выдергивание, МПа;

l_{ef} — длина резьбовой части шурупа, мм;

$R_{ax,s,pred,1}$ — сопротивление шурупа на выдергивание, МПа;

$R_{ax,s,pred,2}$ — нормативное сопротивление шурупа на выдергивание, МПа;

ρ_k — нормативная плотность древесины, кг/м³;

d — наружный диаметр резьбы шурупа, мм;

• модель от *Pirnbacher* [70]:

$$f_{ax,pred,1} = 0,01353 \cdot \rho_{test} - 0,28147 \cdot (2,44 \cdot d^{0,572}) + 2,1888 \quad (2.15)$$

$$f_{ax,pred,2} = 0,01353 \cdot \rho_{test} \quad (2.16)$$

$$f_{ax,pred} = \min(f_{ax,pred,1}, f_{ax,pred,2}) \quad (2.17)$$

Где:

$f_{ax,pred}$ — сопротивление шурупа на выдергивание, МПа;

$f_{ax,pred,1}$ — сопротивление шурупа на выдергивание, МПа;

$f_{ax,pred,2}$ — сопротивление шурупа на выдергивание, МПа;

l_{ef} — длина резьбовой части шурупа, мм;

ρ_k — плотность древесины, кг/м³;

d – наружный диаметр резьбы шурупа, мм;

- модель от *Frese* [62]:

$$f_{ax, pred, k} = 0,0872 \cdot \rho_k - 0,28147 \cdot d^{0,572} \cdot \left(\frac{1}{\pi}\right) \quad (2.18)$$

$$\ln(f_{ax, pred, 1}) = 2,359 - (0,04172 \cdot d + 2,039 \cdot 10^{-3}) \cdot \rho \cdot \left(\frac{1}{\pi}\right) \quad (2.19)$$

$$f_{ax, pred} = \min(f_{ax, pred, k}, f_{ax, pred, 1}) \quad (2.20)$$

Где:

$f_{ax, pred, k}$ – сопротивление шурупа на выдергивание, МПа;

$f_{ax, pred, 1}$ – сопротивление шурупа на выдергивание, МПа;

$f_{ax, pred, k}$ – сопротивление шурупа на выдергивание, МПа;

d – наружный диаметр нарезной части шурупа, м;

ρ – плотность древесины, кг/м³;

d – наружный диаметр резьбы шурупа, мм;

- модель от нормы СП 64.13330.2011 [79]:

$$T_{B, III} = R_{B, III} \cdot \pi \cdot d \cdot l_1 \quad (2.21)$$

Где:

$R_{B, III}$ – расчётное сопротивление на выдергивание шурупа, которое следует принимать для воздушно – сухой древесины равным 1 МПа;

l_1 – длина нарезной части шурупа, сопротивляющаяся на выдергивание, мм;

2.2. Аналитическое исследование несущей способности односрезного шурупа в соединениях элементов деревянных конструкций на металлической накладке

Методика расчёта несущей способности односрезного дюбеля в соединениях деревянных конструкций на металлической накладке была предложена в работе *Johansen* [65]. С использованием прочности шурупа при изгибе, физико-механических и геометрических характеристик металлических накладок могут быть определены виды разрушения. Модели разрушения шурупа по аналогичному критерию [65], описывающие деревянные элементы на срез в упругой деформации, показаны на рис. 2.4.

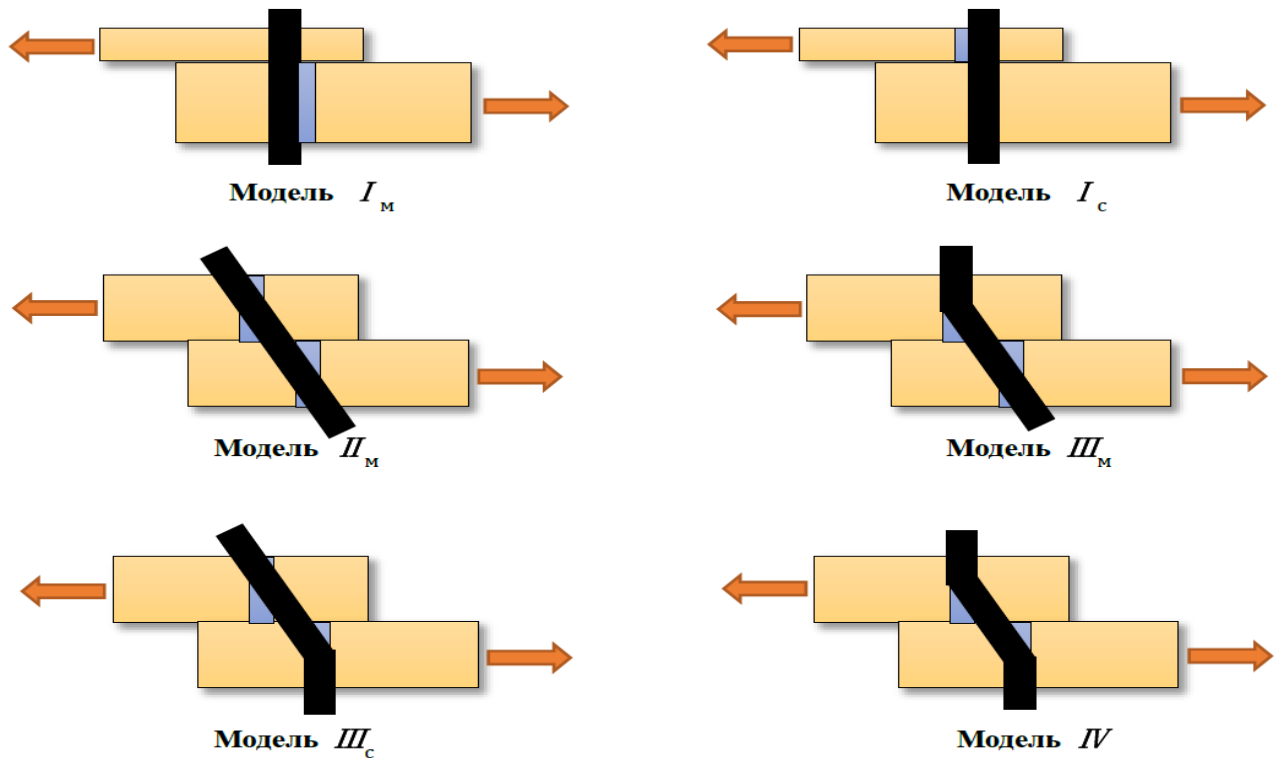


Рис. 2.4. Виды разрушения односрезного шурупа: чёрная часть— шурупа; жёлтая часть— древесина или металлическая накладка

Модель разрушения I — разрушение деревянного элемента за счёт смятия при прочности шурупа при изгибе выше, чем прочность при смятии в гнезде древесины под шурупы;

Модель разрушения II — разрушение локализованного отверстия древесины при смятии при повороте шурупа в плоскости среза;

Модель разрушения III — пластическая деформация шурупа при изгибе при образовании одного пластического шарнира в плоскости среза и смятие деревянного элемента;

Модель разрушения IV — пластическая деформация шурупа при изгибе при образовании двух пластических шарниров в плоскости среза и смятие деревянного элемента;

В работе *H. J. Bläß u B. Laskewitz* [58] был предложен аналитический алгоритм расчёта прочности штифт-образных соединений на срез с учётом зазора между деревянным элементом и металлической накладкой. В работе *Bläß H. J u Uibel. T* [55] на основе конструктивных характеристик деревянных материалов из *CLT* была предложена методика расчёта несущей способности нагельного соединения на срез в деревянных элементах из *CLT* с 3 или 5 слоями. В диссертационной работе *Thomas Hofer* было проведено аналитическое исследование несущей способности соединения на срез в деревянных элементах из *CLT* с различными структурами на основе теории *Johansen* [55]. Данные формулы расчёта прочности древесины при смятии в гнезде под шурупы и прочности шурупа при изгибе в соответствии с различными нормами и научными исследованиями приведены в табл. 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1

Модель по определению прочности при смятии в гнезде древесины

	Модель от [95]	Модель от [90, 91, 92]	Модель от [53]	Модель от [55]
$f_{h,0,k}$	$0,15d^{-0,3} \cdot \rho_k$	$0,082(1 - 0,01d)\rho_k$	$0,1 \cdot d^{-0,15} \cdot \rho_k$	$\frac{0,019d^{-0,3} \cdot \rho_k^{1,24}}{2,5(\cos \alpha)^2 + (\sin \alpha)^2}$ (на широкой стороне панели- <i>CLT</i>)
$k_{90} = \frac{f_{h,90,k}}{f_{h,0,k}}$	1,58	$1,35 + 0,015d$	$d^{0,17}$	$20d_1^{-0,5}$ (на узкой стороне стеновой панели из <i>CLT</i>)
$f_{h,90,k}$	$f_{h,90,k} \cdot k_{90}$	$f_{h,90,k} \cdot k_{90}$	$f_{h,90,k} \cdot k_{90}$	

Примечание:

$f_{h,0,k}$ — прочность древесины при смятии в гнезде под шурупы вдоль волокон, МПа;

$f_{h,90,k}$ — прочность древесины при смятии в гнезде под шурупы поперек волокон, МПа;

k_{90} — приращение $f_{h,0,k}$ и $f_{h,90,k}$;

d — наружный диаметр резьбы шурупа, мм;

ρ_k — плотность древесины, кг/м³

Модель по определению прочности шурупа при изгибе

Наименование	M_y^k
ENV 1998-1-1:1993	$0,13 f_{u,k} \cdot d^{3,0} (f_{y,k} = 0,8 f_{u,k})$
Модель от [82]	$0,26 f_{u,k} \cdot d^{2,7}$
Модель от [77, 78, 79]	$0,3 f_{u,k} \cdot d^{2,6}$
Модель от [63]	$f_{u,k} \cdot \frac{d^{3,0}}{6}$
Модель от [4]	$0,167 f_{u,k} \cdot d^3$
Модель от [65]	150

Примечание:

$M_{y,k}$ — прочность шурупа при изгибе, МПа;

$f_{u,k}$ — прочность шурупа на растяжение, МПа;

d — наружный диаметр резьбы шурупа, мм

Сегодня в каждой стране установлены свои нормы — с учётом местного климата, уровня технологии переработки деревянных материалов, типа породы и требований рынка. Аналитические алгоритмы по определению несущей способности односрезного шурупа в соединениях деревянных элементов на металлической накладке включают пять методик:

- модель от *Blass, Hans Joachim, Laskewitz, Bernd* [58]:

$$F = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{h,1} \cdot t_1 \cdot d \\ f_{h,1} \cdot d \cdot (-t_{zw} + \sqrt{t_{zw}^2 + \frac{\delta \cdot t_{zw}^2}{4} + \frac{M_y}{f_{h,1} \cdot d} + t_1 \cdot t_{zw} + \frac{t_1^2}{2}}) - f_{h,1} \cdot t_1 \cdot d \\ f_{h,1} \cdot d \cdot (-t_{zw} + \sqrt{t_{zw}^2 + \frac{\delta \cdot t_{zw}^2}{4} + \frac{4 \cdot M_y}{f_{h,1} \cdot d}}) \\ f_{h,1} \cdot t_1 \cdot d + f_{h,zw} \cdot t_{zw} \cdot d \\ 2 \cdot f_{h,1} \cdot d \cdot (-t_{zw} + \sqrt{t_{zw}^2 - \frac{\delta \cdot t_{zw}^2}{2} + \frac{M_y}{f_{h,1} \cdot d} + t_1 \cdot t_{zw} + \frac{t_1^2}{2}}) - f_{h,1} \cdot t_1 \cdot d + f_{h,zw} \cdot t_{zw} \cdot d \\ f_{h,1} \cdot d \cdot (-t_{zw} + \sqrt{t_{zw}^2 - \delta \cdot t_{zw}^2 + \frac{4 \cdot M_y}{f_{h,1} \cdot d}}) + f_{h,zw} \cdot t_{zw} \cdot d \end{array} \right. \quad (2.22)$$

Где:

R — несущая способность односрезного шурупа, Н;

$f_{h,1}$ — прочность древесины при смятии в гнезде под шурупы, МПа;

$f_{h,zw}$ — прочность при смятии в гнезде металлической накладке под шурупы, МПа;

M_y — прочность шурупа при изгибе, Н · мм;

d — наружный диаметр резьбы шурупа, мм;

t_{zw} — зазор между металлической накладкой и деревянным элементом, мм;

t_1 — длина резьбовой части шурупа, мм; δ — отношение $f_{h,1}$ и $f_{h,zw}$; $\delta = \frac{f_{h,zw}}{f_{h,1}}$;

- модель от нормы *EN 1995-1-1-2004* [89]:

$$F_{v,Rk} = \min \begin{cases} f_{h,k} \cdot t_1 \cdot d \\ f_{h,k} \cdot d \cdot t_1 \sqrt{1 + \frac{4 \cdot M_y}{f_{h,1} \cdot d}} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \\ 2,3 \sqrt{M_y \cdot f_{h,k} \cdot d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} \end{cases} \quad (2.23)$$

Где:

$F_{v,Rk}$ — несущая способность односрезного шурупа, Н;

$f_{h,k}$ — прочность древесины при смятии в гнезде под шурупы, МПа; t_1 — толщина древесины или длина резьбовой части шурупа, мм; d — наружный диаметр резьбы шурупа, мм; $M_{y,Rk}$ — прочность шурупа при изгибе, МПа; $F_{ax,Rk}$ — сопротивление шурупа на выдергивание, МПа;

- модель китайская [78]:

$$V = \min \begin{cases} 0,7a \cdot d \cdot f_{es} \\ k_{cm} \cdot c \cdot d \cdot f_{em} \\ k_{max} \cdot d^2 \sqrt{f_{bs} \cdot f_{ec}} \\ k_{cs} \cdot A_{ns} \cdot f_{st} \\ k_{cs} \cdot \delta \cdot d \cdot f_{sc} \end{cases} \quad (2.24)$$

Где:

V — несущая способность односрезного шурупа, Н;

f_{em} — прочность древесины при смятии в гнезде под шурупы, МПа;

a — толщина металлической накладке, мм;

c — толщина деревянного элемента, мм;

f_{es} — прочность при смятии в гнезде металлической накладке под шурупы, МПа;

k_{cm} — коэффициент; $k_{cm} = \frac{\sqrt{0,541 + 0,459R_e} - 0,541}{0,541 + R_e}$; $R_e = \frac{f_{em}}{f_{es}}$;

f_{bs} — прочность шурупа при изгибе, МПа;

d — наружный диаметр резьбы шурупа, мм;

f_{ec} — прочность древесины при смятии в гнезде под шурупы, МПа; $f_{ec} = f_{em}$;

k_{max} — коэффициенты при образовании двух пластического шарнира: $k_{max} = 0,443$;

$$k_{bs} = \sqrt{\frac{24}{13} + \frac{3\pi}{26} + \frac{d^2 \cdot f_{bs}}{a^2 \cdot f_{es}}} - 1;$$

A_{ns} — площадь сечения нетто металлической накладки на растяжение, мм²;

f_{st} — прочность шурупа на растяжение, МПа;

δ — толщина металлической накладки, мм;

f_{sc} — прочность при смятии в гнезде металлической накладки под шурупы, МПа;

k_{cs} — коэффициент; $k_{cs} = 1$;

k_{90} — коэффициент $f_{e,0}$ и $f_{e,90}$; $k_{90} = \frac{f_{e,90}}{f_{e,0}} = 0.055$;

- модель от В. В. Пуртова и А. В. Павлика [4]:

$$T = \min \begin{cases} k_{\delta} \cdot \delta \cdot d \cdot R_{CM,\delta}^{BP} \\ k_C \cdot l_H \cdot d \cdot R_{CM,C}^{BP} \\ k'_{\delta} \cdot \delta \cdot d \cdot R_{CM,\delta}^{BP} \\ k'_C \cdot l_H \cdot d \cdot R_{CM,C}^{BP} \\ k_{H,C} \cdot d^2 \sqrt{R_H^{BP} \cdot R_{CM}^{BP}} \\ k_{H,\delta} \cdot d^2 \sqrt{R_H^{BP} \cdot R_{CM}^{BP}} \end{cases} \quad (2.25)$$

Где:

k_{δ} — коэффициент, учитывающий степень полезного использования гнезда по смятию металлической накладки

толщиной δ , определен по формулам: $m = \frac{R_{CM,\delta}^{BP}}{R_{CM,C}^{BP}}$; $n = \frac{\delta}{l_H}$;

k_C — коэффициент, учитывающий степень полезного использования нагельного гнезда по смятию древесины на

участке длиной l_H , определен по формулам: $m = \frac{R_{CM,\delta}^{BP}}{R_{CM,C}^{BP}}$; $n = \frac{\delta}{l_H}$;

$R_{CM,\delta}^{BP}$ — временное или длительное сопротивление древесины по смятию в гнезде, МПа;

$R_{CM,C}^{BP}$ — временное или длительное сопротивление металлической накладки по смятию в гнезде, МПа;

d — диаметр шурупа, мм; l_H — длина на участке по смятию древесины в гнезде, мм;

k'_{δ} — коэффициент, учитывающий степень полезного использования нагельного гнезда по смятию металлической накладки толщиной δ при образовании одного или двух пластических шарниров, определен по формулам:

$$k'_{\delta} = \frac{\sqrt{1 + (1 + 2m) \cdot \left(1 + \frac{4M_{пред}}{\delta^2 \cdot d \cdot R_{CM,\delta}^{BP}}\right)} - 1}{1 + 2m};$$

$M_{пред}$ — нормативное сопротивление момента шурупа на изгиб, Н · мм;

k_C — коэффициент, учитывающий степень полезного использования нагельного гнезда по смятию древесины на участке длиной l_H при образовании пластического шарнира в деревянном элементе, определен по формулам:

$$k'_C = \frac{\sqrt{1 + \left(1 + \frac{2}{m}\right) \cdot \left(1 + \frac{4M_{пред}}{l_H^2 \cdot d \cdot R_{CM,C}^{BP}}\right)} - 1}{1 + \frac{2}{m}};$$

R_{II}^{BP} — временное сопротивление или предел текучести материала шурупов при изгибе, МПа;

R_{CM}^{BP} — временное сопротивление смятию в отверстии при действии усилия вдоль волокон, МПа;

$k_{H,\delta}$ — коэффициент, учитывающий предельную несущую способность соединения по изгибу шурупа в случае разрушения от образования пластического шарнира в пределах деревянного элемента, определен по формулам:

$$k_{H,\delta} = k'_\delta \cdot \frac{\delta}{d} \cdot \sqrt{\frac{R_{II}^{BP}}{R_{CM}^{BP}}} \cdot m_\delta; \quad m_\delta = \frac{R_{CM,\delta}^{BP}}{R_{CM}^{BP}};$$

$k_{H,C}$ — коэффициент, учитывающий предельную несущую способность соединения по изгибу шурупа в случае разрушения от образования пластического шарнира в пределах металлической накладке, определен по формулам:

$$k_{H,C} = k'_\delta \cdot \frac{l_H}{d} \cdot \sqrt{\frac{R_{II}^{BP}}{R_{CM}^{BP}}} \cdot m_C; \quad m_C = \frac{R_{CM,C}^{BP}}{R_{CM}^{BP}};$$

- модель от нормы *DIN 1052* [90]:

$$R_k = \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,k} \cdot f_{h,k} \cdot d} \quad (2.26)$$

$$\Delta R_k = \min(R_k, 0,25 \cdot R_{ax,k}) \quad (2.27)$$

$$R = \Delta R_k + R_k \quad (2.28)$$

Где:

R_k — фактическая несущая способность односрезного шурупа на металлической накладке, Н;

β — отношение $f_{h,1}$ и $f_{h,zw}$; $\delta = \frac{f_{h,zw}}{f_{h,1}}$;

$R_{ax,k}$ — несущая способность шурупа на выдергивание, Н;

R — расчётная несущая способность шурупа на металлической накладке на срез, Н;

2.3. Аналитическое исследование несущей способности односрезного шурупа на металлической накладке в соединениях деревянных элементов без укрепления и с металлической зубчатой пластиной

Методика повышения несущей способности нагельных соединений с укреплением МЗП была впервые предложена в работе *Kevarinmäki* [66]. В работе *Blaß, H. J., Schmid, M. u Werner, H* [57] были проведены испытания определения несущей способности нагельных соединений деревянных конструкций с

укреплением МЗП на срез и предложен аналитический алгоритм в соответствии с нормами *EC5* и *DIN 1052:2008-12*. Аналитическое исследование несущей способности односрезного шурупа с укреплением МЗП в соединениях деревянных элементах из *CLT* и *LVL* в современной литературе практически не представлено. Таким образом, конструктивная схема односрезного шурупа деревянных конструкций на металлических накладках и шурупов без укрепления и с МЗП представлены на рис. 2.5.

Определение оптимальных формул расчёта прочности древесины при смятии в гнезде под шурупы (см. табл. 2.1) и прочности шурупа при изгибе в соединениях деревянного элемента из *CLT* и *LVL* (см. табл. 2.2) выполнено в Приложение Б. Распределение напряжений при смятии в гнезде под шурупы древесины, МЗП и металлической накладки в соответствии с вышепоказанными видами разрушения даны на рис. 2.6.

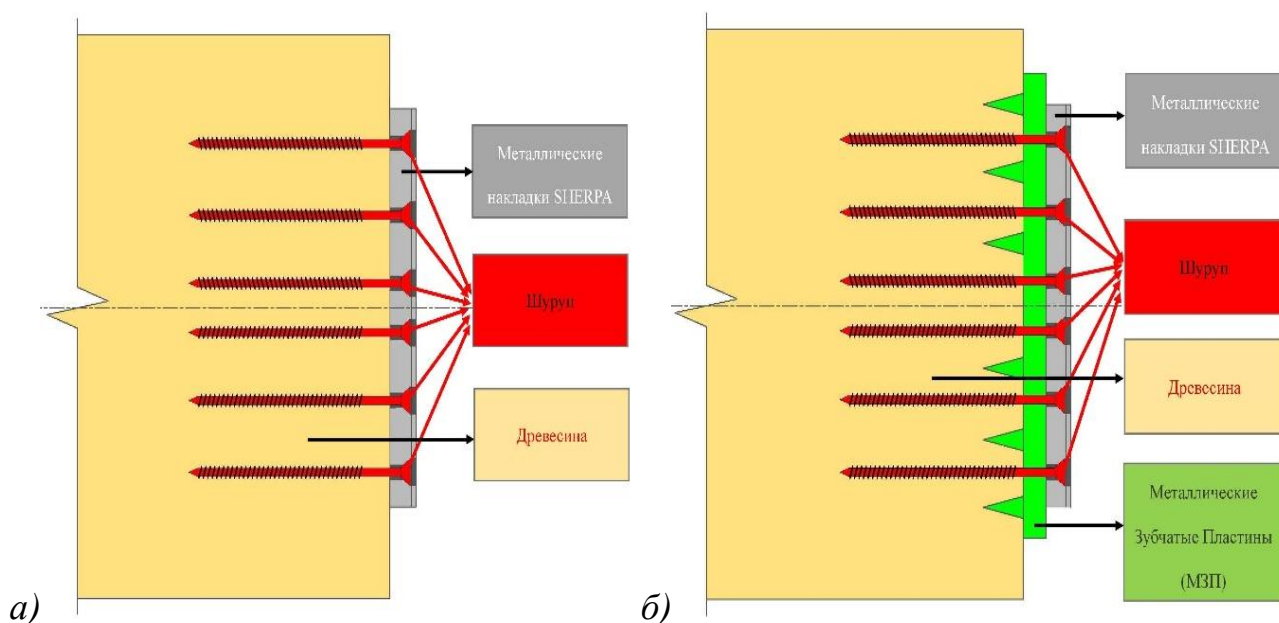


Рис. 2.5. Конструктивная схема односрезного шурупа деревянных конструкций на металлических накладках и шурупов: *а*— без укрепления МЗП; *б*—с укреплением МЗП

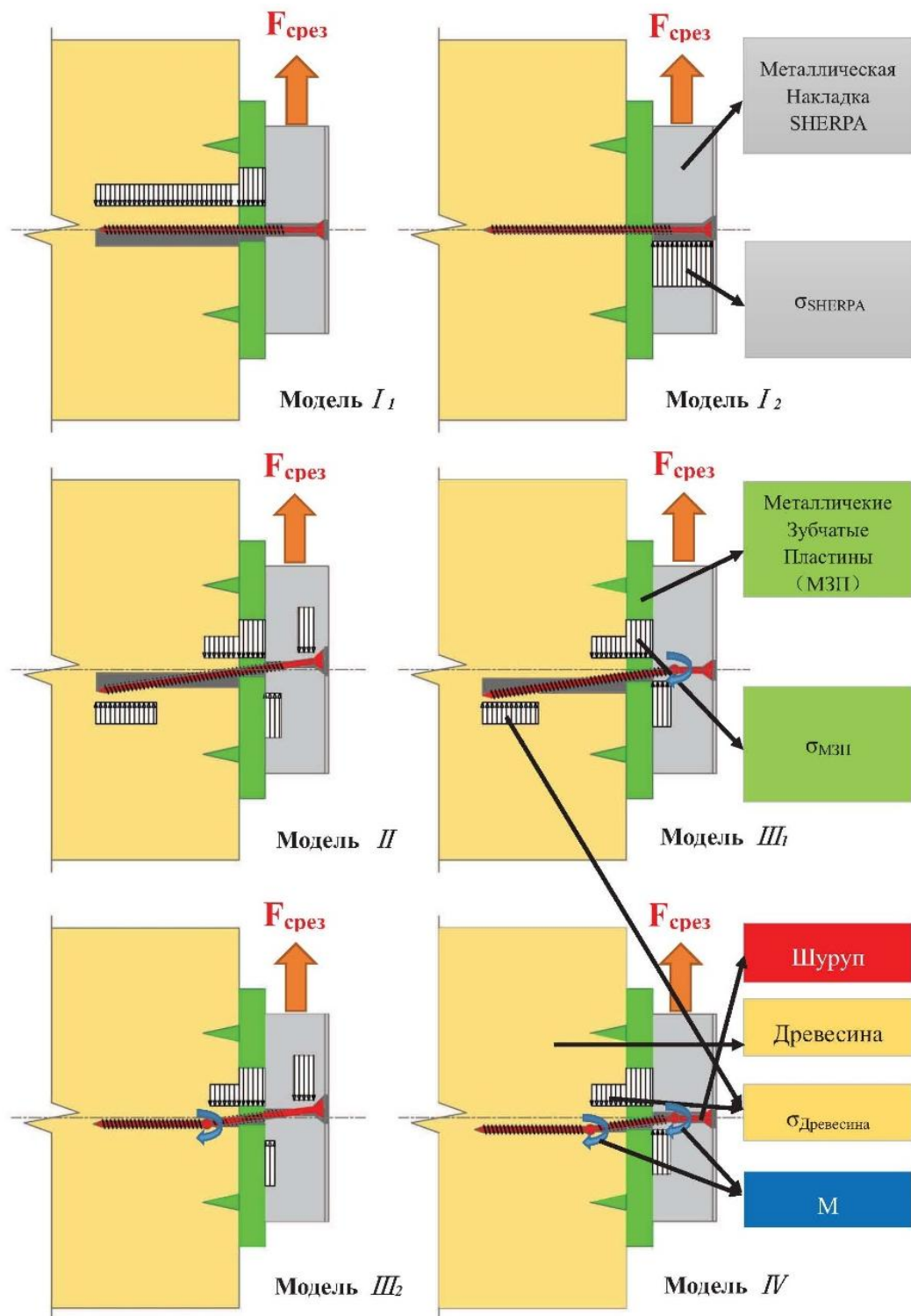


Рис. 2.6. Распределение напряжений при смятии в гнезде под шурупы древесины, МЗП и металлической накладке

Упрощенная расчётная схема по определению длины распределения напряжений при смятии в гнезде под шурупы древесины, МЗП и металлической накладке представлена на рис. 2.7.

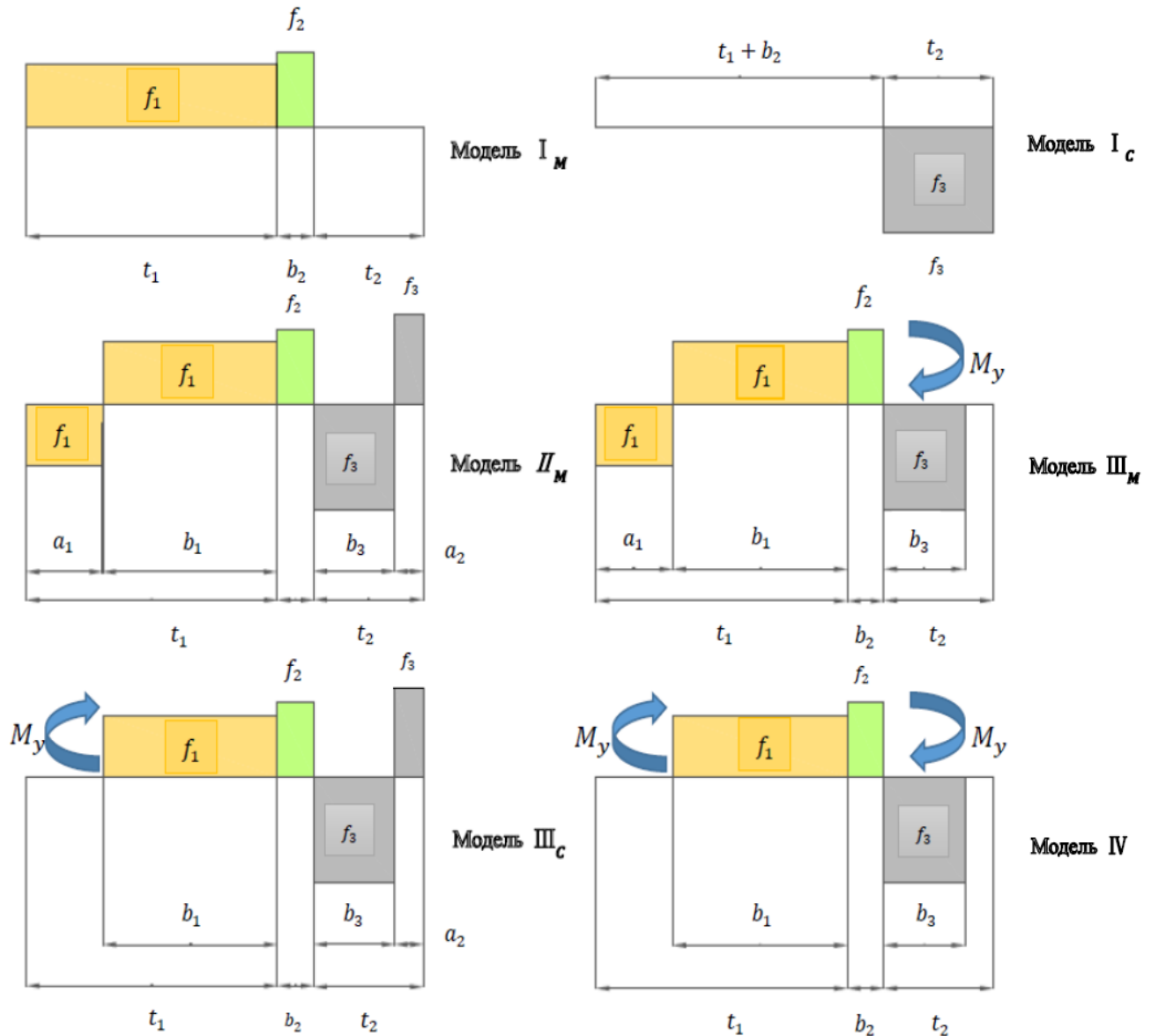


Рис. 2.7. Упрощенная расчётная схема по определению длины распределения напряжений при смятии в гнезде под шурупы древесины, МЗП и металлической накладке: жёлтая часть — в древесине; зелёная часть — в МЗП; серая часть — в металлической накладке

На основе вышеперечисленных работ автором предложен аналитический алгоритм (решение задачи выполнено в Приложении В):

- несущая способность односрезного шурупа без укрепления МЗП под углом α к волокнам, Н:

$$F_{v,\alpha,k,1} = \min \begin{cases} b_1^{M_1} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} \\ b_1^{C_1} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} \\ b_1^{M_2} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d \\ b_1^{M_3} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d \\ b_1^{C_3} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d \\ b_1^4 \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d \end{cases} \quad (2.29)$$

$$b_1^{M_2} = \frac{-(t_1 + \beta \cdot t_2) + \sqrt{(t_1 + \beta \cdot t_2)^2 + (\beta \cdot t_2^2 + t_1^2) \cdot (1 + \beta)}}{1 + \beta} \quad (2.30)$$

$$b_1^{M_3} = \frac{-t_1 + \sqrt{t_1^2 + (\frac{4M_y}{f_1 \cdot d} + t_1^2) \cdot (1 + 2\beta)}}{1 + 2\beta} \quad (2.31)$$

$$b_1^{C_3} = \frac{-\beta \cdot t_2 + \sqrt{(\beta \cdot t_2)^2 + (\beta \cdot t_2^2 + \frac{4M_y}{f_1 \cdot d}) \cdot (2 + \beta)}}{2 + \beta} \quad (2.32)$$

$$b_1^4 = \sqrt{\frac{\frac{4M_y}{f_1 \cdot d}}{1 + \beta}} \quad (2.33)$$

- несущая способность односрезного шурупа с укреплением МЗП под углом

α к волокнам, Н:

$$F_{v,\alpha,k,2} = \min \begin{cases} b_1^{M_1} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} \\ b_1^{C_1} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} \\ b_1^{M_2} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d \\ b_1^{M_3} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d \\ b_1^{C_3} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d \\ b_1^4 \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d \end{cases} \quad (2.34)$$

$$b_1^{M_2} = \frac{-(t_1 + \beta \cdot t_2) + \sqrt{(t_1 + \beta \cdot t_2)^2 + (\beta \cdot t_2^2 + t_1^2) \cdot (1 + 4m + 2y \cdot m^2 + \beta)}}{1 + 4m + 2y \cdot m^2 + \beta} \quad (2.35)$$

$$b_1^{M_3} = \frac{-t_1 + \sqrt{t_1^2 + (\frac{4M_y}{f_1 \cdot d} + t_1^2) \cdot (1 + 4m + 2y \cdot m^2 + 2\beta)}}{1 + 4m + 2y \cdot m^2 + 2\beta} \quad (2.36)$$

$$b_1^{C_3} = \frac{-\beta \cdot t_2 + \sqrt{(\beta \cdot t_2)^2 + (\beta \cdot t_2^2 + \frac{4M_y}{f_1 \cdot d}) \cdot (2 + 4m + 2y \cdot m^2 + \beta)}}{2 + 4m + 2y \cdot m^2 + \beta} \quad (2.37)$$

$$b_1^4 = \sqrt{\frac{\frac{4M_y}{f_1 \cdot d}}{1 + 2p + 2p^2 + \beta}} \quad (2.38)$$

Где:

$F_{v,\alpha,k,1}$ — несущая способность односрезного шурупа без укрепления МЗП под углом α к волокнам, Н;

$F_{v,\alpha,k,2}$ — несущая способность односрезного шурупа с укреплением МЗП под углом α к волокнам, Н;

$f_{h,\alpha,k}$ — прочность при смятии в гнезде древесины под углом α к волокнам, МПа; для *CLT* и *LVL* при $\alpha = 0^\circ$,

$$f_{h,0,k} = 0,15d^{-0,3} \cdot \rho_k; \text{ при } \alpha = 90^\circ, \quad f_{h,0,k} = 0,15 \cdot 1,58d^{-0,3} \cdot \rho_k [95];$$

M_y — прочность шурупа при изгибе, МПа; для *CLT* $M_y = f_{u,k} \cdot \frac{d^3}{6}$; для *LVL* $M_y = 0,13 f_{u,k} \cdot d^3$ [ENV 1998-1-1:1993];

$f_{u,k}$ — прочность шурупа на растяжение, МПа; $f_{u,k} = 600$ МПа [90];

$F_{ax,k}$ — несущая способность шурупа на выдергивание под углом α к волокнам, Н; для *CLT*

$$F_{ax,k} = \frac{f_{ax,90,k} \cdot d \cdot l_{ef}}{(\sin \alpha)^2 + 1,5(\cos \alpha)^2}, \quad f_{ax,90,k} = 0,0872 \rho_k \cdot d^{-0,4119} \cdot \frac{1}{\pi} [77]; \quad \text{для } LVL \quad F_{ax,k} = \pi \cdot d \cdot l_{ef} \cdot f_{ax,\alpha,k},$$

$$f_{ax,\alpha,k} = \frac{f_{ax,90,k}}{(\sin \alpha)^2 + 1,5(\cos \alpha)^2}, \quad f_{ax,90,k} = 0,003(\pi d \cdot l_{ef})^{-0,2} \cdot \rho_k [95];$$

$f_{ax,90,k}$ — сопротивление на выдергивание шурупы поперек волокон, МПа;

$f_{y,k}$ — предел текучести МЗП, МПа; $f_{y,k} = 187$ МПа [105];

n — отношение b_1 и b_2 ; $n = b_2/b_1$; $n = 1$ [73];

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 при смятии в гнезде древесины под шурупы, мм;

b_2 — длина распределения напряжения при смятии в гнезде МЗП под шурупы, мм;

b_3 — длина распределения напряжения при смятии в гнезде металлической накладке под шурупы, мм; $b_3 = 8$ мм;

t_1 — эффективная длина резьбы шурупа, мм; $t_1 = 42$ мм;

t_2 — толщина металлической накладки, мм; $t_2 = 1$ мм;

ρ_k — плотность древесины, кг/м³ (см. таб. 2.1 и 2.2);

a_1 — длина распределения напряжения при смятии в гнезде древесины под шурупы, мм;

a_2 — длина распределения напряжения при смятии в гнезде металлической накладки под шурупы, мм;

2.4. Математическая модель расчёта несущей способности соединения элементов деревянных конструкций на металлических накладках без укрепления металлической зубчатой пластиной по критериям сопротивления шурупов на выдергивание и срез

С использованием вертикальных и наклонных шурупов металлические накладки могут отдельно крепиться к торцовой поверхности деревянных конструктивных элементов, поэтому несущая способность соединения зависит от физико-механических характеристик древесины и металлических накладок, расположения и количества шурупов и т. д. На основе данных исследований в соответствии с разделом 2.4 автором предложена математическая модель расчёта несущей способности соединения на металлических накладках деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* и *LVL*.

Соединение на металлических накладках может передавать и воспринимать воздействие на растяжение и сжатие, срез, но вертикальное усилие вдоль направления вставки и изгибающий момент значительно влияют на несущую способность соединения. Расчётная схема представлена на рис. 2.8, из которого видно, что несущая способность соединения зависит от следующих факторов:

- несущей способности односрезного шурупа на металлической накладке;
- вертикальной компоненты от несущей способности шурупа на выдергивание под углом к волокнам;
- силы трения между алюминиевыми накладками и деревянными элементами в зависимости от горизонтальной компоненты несущей способности шурупа на выдергивание под углом к волокнам;

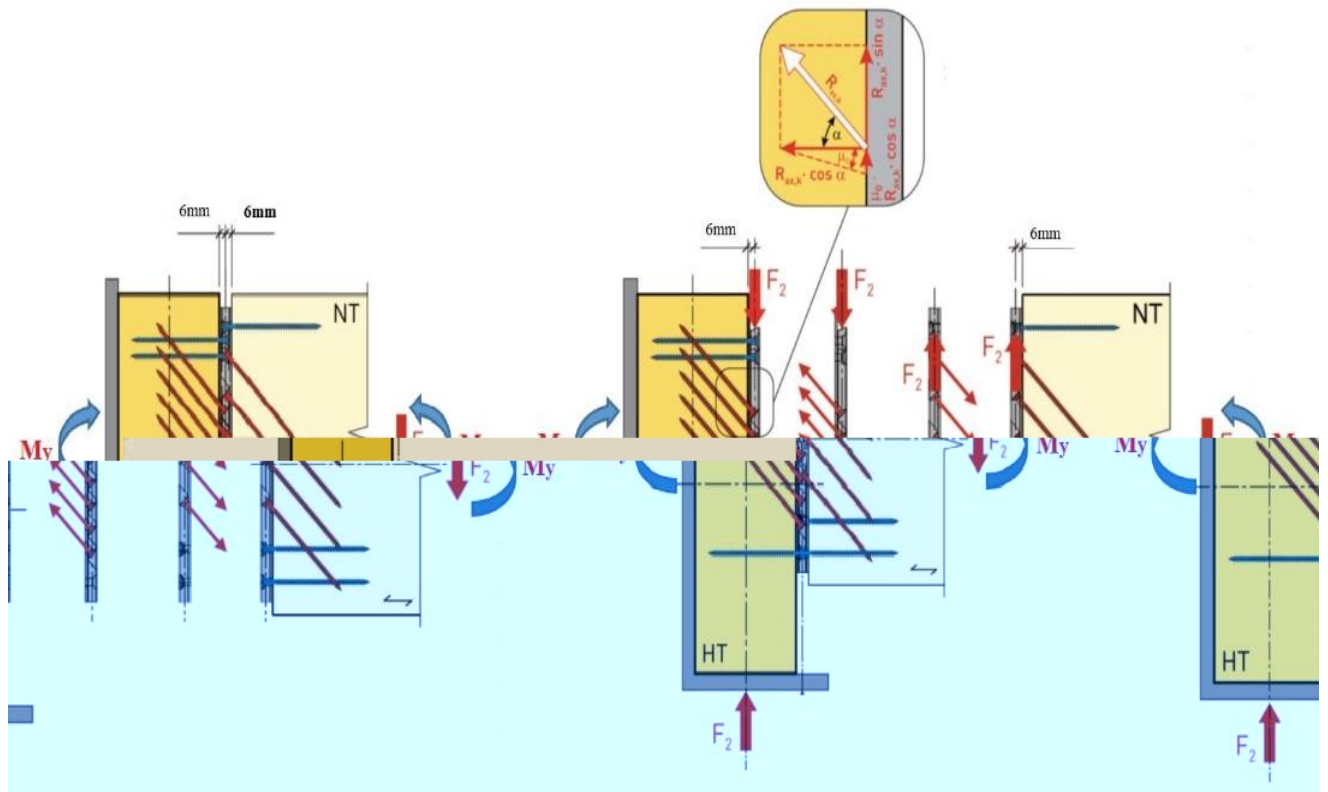


Рис. 2.8. Расчётная схема по определению несущей способности соединения на металлических накладках по критериям сопротивления шурупов на выдергивание и срез

Шурупы в соединениях на металлических накладках типа *SHERPA XS – L* [42] разделяются на горизонтальный и наклонный под углом $\alpha=37,5^\circ$ к волокнам. Угол $37,5^\circ$ принят нами в исследованиях на основе имеющихся в литературе данных [75], в которых оптимальное значение этого угла находится в пределах 30° – 40° . В методике расчёта автор приняли шурупы с углом $37,5^\circ$, такой угол был принят нами в наших исследованиях. Поскольку как количество, расположение шурупов, так и физико-механические характеристики стены и балки обладают отчётливыми отличиями, при определении несущей способности соединения, должно быть принято минимальное значение. Автором предложен аналитический алгоритм определения несущей способности соединения:

- несущая способность односрезного шурупа на металлической накладке, Н:

$$F_{v,\alpha,k,1} = \min \begin{cases} b_1^{M_1} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{V_{ax,\alpha,k}}{4} \\ b_1^{C_1} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{V_{ax,\alpha,k}}{4} \\ b_1^{M_2} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{V_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d \\ b_1^{M_3} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{V_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d \\ b_1^{C_3} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{V_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d \\ b_1^4 \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{V_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d \end{cases} \quad (2.39)$$

$$b_1^{M_2} = \frac{-(t_1 + \beta \cdot t_2) + \sqrt{(t_1 + \beta \cdot t_2)^2 + (\beta \cdot t_2^2 + t_1^2) \cdot (1 + \beta)}}{1 + \beta} \quad (2.40)$$

$$b_1^{M_3} = \frac{-t_1 + \sqrt{t_1^2 + (\frac{4M_y}{f_1 \cdot d} + t_1^2) \cdot (1 + 2\beta)}}{1 + 2\beta} \quad (2.41)$$

$$b_1^{C_3} = \frac{-\beta \cdot t_2 + \sqrt{(\beta \cdot t_2)^2 + (\frac{4M_y}{f_1 \cdot d} + \beta \cdot t_2^2) \cdot (2 + \beta)}}{2 + \beta} \quad (2.42)$$

$$b_1^4 = \sqrt{\frac{\frac{4M_y}{f_1 \cdot d}}{1 + \beta}} \quad (2.43)$$

- вертикальная компонента от несущей способности шурупа на выдергивание под углом к волокнам, Н:

$$F_{2,K,1} = R_{ax,k} \cdot \sin \alpha \quad (2.44)$$

- сила трения между металлическими накладками и деревянными элементами в зависимости от горизонтальной компоненты несущей способности шурупа на выдергивание под углом к волокнам, Н:

$$F_{2,k,2} = \mu \cdot R_{ax,k} \cdot \cos \alpha \quad (2.45)$$

- несущая способность при смятии в гнезде металлических накладок под шурупы, Н:

$$F_3 = 0,01 f_3 \cdot d \cdot t_3 \quad (2.46)$$

- несущая способность соединения на металлических накладках без укрепления МЗП в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* и *LVL* по критериям сопротивлению шурупов на выдергивание и срез, Н:

$$F_{v,k,панель,sherpa} = n \cdot (F_{v,\alpha,k,1} + F_{2,k,1} + F_{2,k,2} + F_3) \quad (2.47)$$

$$F_{v,k,балка,sherpa} = n \cdot (F_{v,\alpha,k,1} + F_{2,k,1} + F_{2,k,2} + F_3) \quad (2.48)$$

$$F_{v,k,sherpa} = \min(F_{v,k,панель,sherpa}, F_{v,k,балка,sherpa}) \quad (2.49)$$

Где:

$F_{v,k,панель,sherpa}$ — несущая способность соединения по критериям сопротивления шурупов на выдергивание и срез, Н;
 $m_{1/2}$ — виды разрушения односрезного шурупа в соответствии с теорией *Johansen* [65];

$F_{v,k,sherpa}$ — несущая способность соединения по критериям сопротивлению шурупов на выдергивание и срез, которое крепится к стеновой панели из *CLT*, Н;

μ — коэффициент силы трения; $\mu = 0,25$ [48];

n — количество шурупов;

$R_{ax,k}$ — несущая способность шурупа на выдергивание под углом к волокнам, Н;

$F_{v,k,балка,sherpa}$ — несущая способность соединения по критериям сопротивления шурупов на выдергивание и срез, которое крепится к балке из *CLT* и *LVL*, Н;

2.5. Математическая модель расчёта несущей способности соединения на металлических накладках с укреплением металлической зубчатой пластиной по критериям сопротивления шурупов на выдергивание и срез

Несущую способность соединения деревянных конструкций на МЗП определяют по условиям смятия древесины в гнездах под шурупы и изгиба зубьев МЗП, а также по условиям прочности пластины при работе на сжатие, растяжение и срез [103]. Сегодня МЗП чаще используются в соединениях бруса, деревянных стоек и балок между собой в стропильных системах. Поскольку прочность

древесины при смятии в гнезде под шурупы может значительно влиять на несущую способность соединения, может быть осуществлено повышение несущей способности соединения. Крепеж с укреплением МЗП в соединениях деревянных элементов из стеновой панели и балки представлен на рис. 2.9.

На основе выполненной работы в соответствии с разделом. 2.4 автором предложена математическая модель определения несущей способности соединения на металлических накладках с укреплением МЗП в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* и *LVL*, которая зависит от сопротивления шурупов на выдергивание и изгиб, прочности при смятии в гнезде древесины под шурупы, предела текучести материала МЗП на растяжение, расположения и количества шурупов, приведенный по следующим уравнениям:

- несущая способность односрезного шурупа с укреплением МЗП под углом α к волокнам, Н:

$$F_{v,\alpha,k,2} = \min \begin{cases} b_1^{M_1} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} \\ b_1^{C_1} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} \\ b_1^{M_2} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d \\ b_1^{M_3} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d \\ b_1^{C_3} \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d \\ b_1^4 \cdot f_{h,\alpha,k} \cdot d + \frac{F_{ax,\alpha,k}}{4} + 2f_{y,k} \cdot b_2 \cdot d \end{cases} \quad (2.50)$$

$$b_1^{M_2} = \frac{-(t_1 + \beta \cdot t_2) + \sqrt{(t_1 + \beta \cdot t_2)^2 + (\beta \cdot t_2^2 + t_1^2) \cdot (1 + 4m + 2y \cdot m^2 + \beta)}}{1 + 4m + 2y \cdot m^2 + \beta} \quad (2.51)$$

$$b_1^{M_3} = \frac{-t_1 + \sqrt{t_1^2 + (\frac{4My}{f_1 \cdot d} + t_1^2) \cdot (1 + 4m + 2y \cdot m^2 + 2\beta)}}{1 + 4m + 2y \cdot m^2 + 2\beta} \quad (2.52)$$

$$b_1^{C_3} = \frac{-\beta \cdot t_2 + \sqrt{(\beta \cdot t_2)^2 + (\beta \cdot t_2^2 + \frac{4M_y}{f_1 \cdot d}) \cdot (2 + 4m + 2y \cdot m^2 + \beta)}}{2 + 4m + 2y \cdot m^2 + \beta} \quad (2.53)$$

$$b_1^4 = \sqrt{\frac{\frac{4M_y}{f_1 \cdot d}}{1 + 2p + 2p^2 + \beta}} \quad (2.54)$$

Где:

$F_{v,\alpha,k,2}$ — несущая способность односрезного шурупа с укреплением МЗП под углом α к волокнам, Н;

$f_{h,\alpha,k}$ — прочность при смятии в гнезде древесины 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 $\alpha = 90^\circ$, $f_{h,0,k} = 0,15 \cdot 1,58d^{-0,3} \cdot \rho_k$; [95];

M_y — прочность шурупа при изгибе, МПа; для *CLT* $M_y = f_{u,k} \cdot \frac{d^3}{6}$; для *LVL* $M_y = 0,13 f_{u,k} \cdot d^3$ [ENV 1998-1-1:1993];

$f_{u,k}$ — прочность шурупа на растяжение, МПа; $f_{u,k} = 600$ МПа [93];

$F_{ax,k}$ — несущая способность шурупа на выдергивание под углом α к волокнам, Н; для *CLT*

$$F_{ax,k} = \frac{f_{ax,90,k} \cdot d \cdot l_{ef}}{(\sin \alpha)^2 + 1,5(\cos \alpha)^2}, \quad f_{ax,90,k} = 0,0872 \rho_k \cdot d^{-0,4119} \cdot \frac{1}{\pi} \quad [77] \quad ; \quad \text{для } LVL \quad F_{ax,k} = \pi \cdot d \cdot l_{ef} \cdot f_{ax,\alpha,k},$$

$$f_{ax,\alpha,k} = \frac{f_{ax,90,k}}{(\sin \alpha)^2 + 1,5(\cos \alpha)^2}, \quad f_{ax,90,k} = 0,003(\pi d \cdot l_{ef})^{-0,2} \cdot \rho_k \quad [95];$$

$f_{ax,90,k}$ — сопротивление на выдергивание шурупа поперек волокон, МПа;

γ — отношение f_1 и f_2 ; $\gamma = 2f_{y,k}/f_{h,\alpha,k}$;

$f_{y,k}$ — предел текучести МЗП на растяжение, МПа; $f_{y,k} = 187$ МПа [105];

ρ_k — плотность древесины, кг/м³ (см. таб. 2.1 и 2.2);

n — отношение b_1 и b_2 ; $n = b_2/b_1$; $n = 1$ [94];

m — отношение b_1 и b_3 ; $m = b_3/b_1$; $m = \beta = 1$;

b_1 — длина распределения напряжения при смятии в гнезде древесины под шурупы, мм;

b_2 — длина распределения напряжения при смятии в гнезде МЗП под шурупы, мм;

β — отношение f_1 и f_3 ; $\beta = f_3/f_{h,\alpha,k}$;

b_3 — длина распределения напряжения при смятии в гнезде металлической накладки под шурупы, мм; $b_3 = 8$ мм;

t_1 — эффективная длина резьбы шурупа, мм; $t_1 = 42$ мм;

t_2 — толщина металлической накладки, мм; $t_2 = 1$ мм;

a_1 — длина распределения напряжения при смятии в гнезде древесины под шурупы, мм;

a_2 — длина распределения напряжения при смятии в гнезде металлической накладки под шурупы, мм;

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

$$F_{2,K,1} = R_{ax,k} \cdot \sin \alpha \quad (2.55)$$

- сила трения между алюминиевыми накладками и деревянными элементами в зависимости от горизонтальной компоненты несущей способности шурупа на выдергивание под углом к волокнам, Н:

$$F_{2,k,2} = \mu \cdot R_{ax,k} \cdot \cos \alpha \quad (2.56)$$

- несущая способность при смятии в гнезде металлических накладок под шурупы, Н:

$$F_3 = 0,01 f_3 \cdot d \cdot t_3 \quad (2.57)$$

- несущая способность соединения на металлических накладках с укреплением МЗП в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* и *LVL* по критериям сопротивления шурупов на выдергивание и срез, Н:

для стеновой панели из *CLT*:

$$F_{v,k,панель,sherpa} = n \cdot (F_{v,\alpha,k,1} + F_{2,k,1} + F_{2,k,2} + F_3) \quad (2.58)$$

Для балки из *CLT* и *LVL*:

$$F_{v,k,балка,sherpa} = n \cdot (F_{v,\alpha,k,1} + F_{2,k,1} + F_{2,k,2} + F_3) \quad (2.59)$$

$$F_{v,k,sherpa} = \min(F_{v,k,панель,sherpa} \text{ и } F_{v,k,балка,sherpa}) \quad (2.60)$$

Где:

$F_{v,k,панель,sherpa}$ — несущая способность соединения на металлических накладках с укреплением МЗП по критериям сопротивления шурупов на выдергивание и срез в стеновой панели, Н; μ — коэффициент силы трения; $\mu = 0,25$ [48]; $m_{1/2}$ — виды разрушения односрезного шурупа в соответствии с теорией *Johansen* [65];

$F_{v,k,sherpa}$ — несущая способность соединения на металлических накладках с укреплением МЗП по критериям сопротивления шурупов на выдергивание и срез, Н;

n — количество шурупов;

$R_{ax,k}$ — несущая способность шурупа на выдергивание под углом к волокнам, Н;

$F_{v,k,балка,sherpa}$ — несущая способность соединения на металлических накладках по критериям сопротивления шурупов на выдергивание и срез, которое крепится к балке из *CLT* и *LVL*, Н;

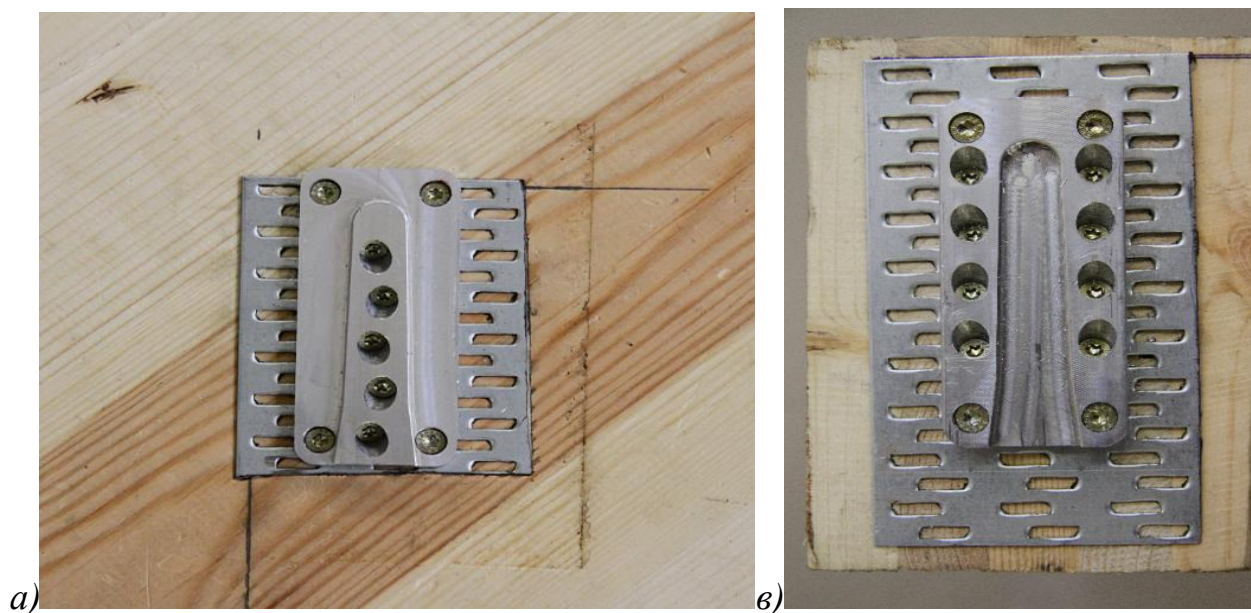


Рис. 2.9. Общие виды соединения на металлических накладках с укреплением МЗП:
а — на широкой стороне стеновой панели из CLT; *б* — на узкой стороне балки из CLT

2.6. Совершенствование методики расчёта несущей способности соединения на металлических накладках по критерию сопротивления шурупов на выдергивание

При расчёте несущей способности соединения на металлических накладках по критерию сопротивления шурупов на выдергивание должны учитываться воздействия ветра и землетрясения, которые вызывают поперечное перемещение здания, у которого расчётная схема представлена на рис. 2.10. Воздействие нагрузки, влияющее на наветренные стороны сооружений (дома, мачты, опоры линий электропередачи и т. п.), зависит от формы парусной поверхности обдуваемого сооружения или предмета, его подвижности, способа крепления или условий его движения, назначения и плотности воздуха [106]. Нагрузка от ветрового воздействия определяется в соответствии с СП 20.13330.2011 [71]. Сейсмическая нагрузка, являющаяся одним из основных понятий в сейсмостойком строительстве

и означает приложение колебательного возбуждения землетрясения к различным постройкам, определяется в соответствии с СНиП II-7-81 [84].

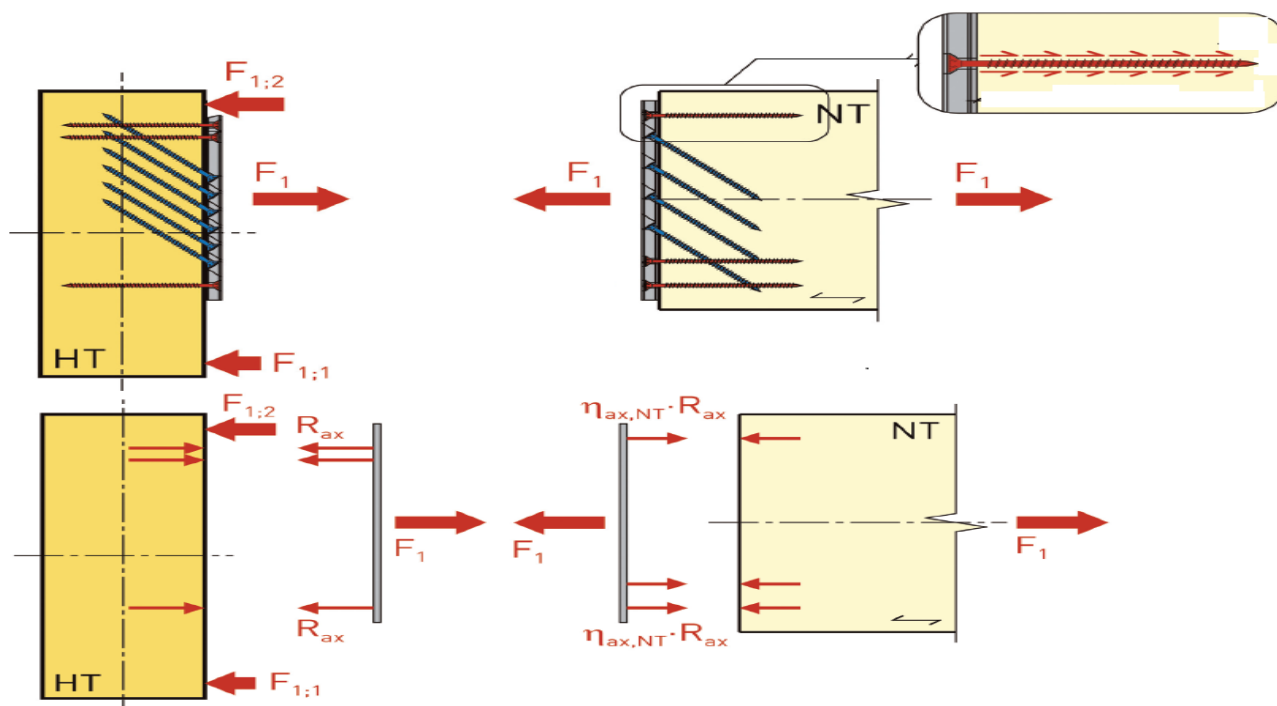


Рис. 2.10. Расчётная схема по определению несущей способности соединения на металлических накладках по критерию сопротивления шурупов на выдергивание

С учётом физико-механических и геометрических характеристик металлических накладок несущая способность соединения зависит от следующих факторов:

- несущей способности шурупов на выдергивание, N ;
- прочности металлических накладок на растяжение, $МПа$;
- контактной площади между выступами двух алюминиевых накладок, $мм^2$;
- физико-механических характеристик древесины;
- нагрузки от воздействия ветра и землетрясения, N ;

С использованием полученных результатов в соответствии с разделом. 2.2 и Приложением Б автором предложены оптимальные формулы определения несущей

способности соединения:

- несущая способность шурупа на выдергивание из *CLT*, Н:

$$F_{ax,k} = \frac{f_{ax,90,k} \cdot d \cdot l_{ef}}{(\sin \alpha)^2 + 1,5(\cos \alpha)^2}, [90] \quad (2.61)$$

$$f_{ax,90,k} = 0,0872 \rho_k \cdot d^{-0,4119} \cdot \frac{1}{\pi}, [95] \quad (2.62)$$

$$F_{ax,k,CLT} = \mu_\alpha \cdot F_{ax,k,CLT} \quad (2.63)$$

- несущая способность шурупа на выдергивание из *LVL* вдоль волокон в соответствии с [90], Н:

$$F_{ax,k} = \pi \cdot d \cdot l_{ef} \cdot f_{ax,\alpha,k} \quad (2.64)$$

$$f_{ax,\alpha,k} = \frac{f_{ax,90,k}}{(\sin \alpha)^2 + 1,5(\cos \alpha)^2} \quad (2.65)$$

$$f_{ax,90,k} = 0,003(\pi d \cdot l_{ef})^{-0,2} \cdot \rho_k \quad (2.66)$$

- несущая способность соединения на металлических накладках по критерию сопротивления шурупов на выдергивание в деревянной конструкции стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* и *LVL*, Н:

$$F_{ax,k,SHERPA} = n \cdot \min(F_{ax,k,CLT}, F_{ax,k,LVL}, F_{t,k,алю}) \quad (2.67)$$

где:

α — угол оси шурупа к волокнам древесины;

$F_{t,k,алю}$ — прочность алюминиевого куба на растяжение; $F_{t,k,алю} = 6824,68$ Н;

n — количество шурупов;

Где: μ_α — коэффициент коррекции; при $\alpha = 0^\circ$, $\mu_0 = 1,1$; при $\alpha = 90^\circ$, $\mu_0 = 1,2$;

2.7. Математическая модель расчёта коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки

В соответствии с требованием более просторного внутреннего пространства, например, в торговом центре, на спортивном стадионе, в промышленном здании и

т. д., большепролетная деревянная конструкция чаще используется в виде дощатоклееных балок пролётом 6-24 м, дощатоклееных арок с пролётом более 100 м и деревянных рам с пролётом до 18-30м [43]. В большепролетных конструкциях крепеж находится не только под действием нагрузки вдоль направления вставки, но и изгиба. Таким образом, при расчётах соединения на металлических накладках по критериям сопротивлению шурупов на выдергивание и срез должен рассматриваться коэффициент влияния эксцентриситета приложения нагрузки. В научном исследовании компании *SHERPA* с *Timberland* (лаборатория по испытанию деревянных конструкций Технического университета г. Грац в Австрии) была достигнута несущая способность крепеж типа *SHERPA* 280 кН [97]. При этом, крепеж может быть использован в более широкой области применения и обеспечит более высокую устойчивость и безопасность. Расчётная схема по определению коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки представлена на рис. 2.11.

Из рис. 2.11 видно, что коэффициент влияния эксцентриситета приложения нагрузки состоит из 3 частей:

- предельного коэффициента в зависимости от толщины стены и металлических накладок;
- влияния коэффициента на металлических накладок в зависимости от сопротивления шурупа на выдергивание и расположения отверстия под шурупы на соединение с металлическими накладками;
- коэффициента в зависимости от изгибающего момента и усилия вдоль направления вставки;

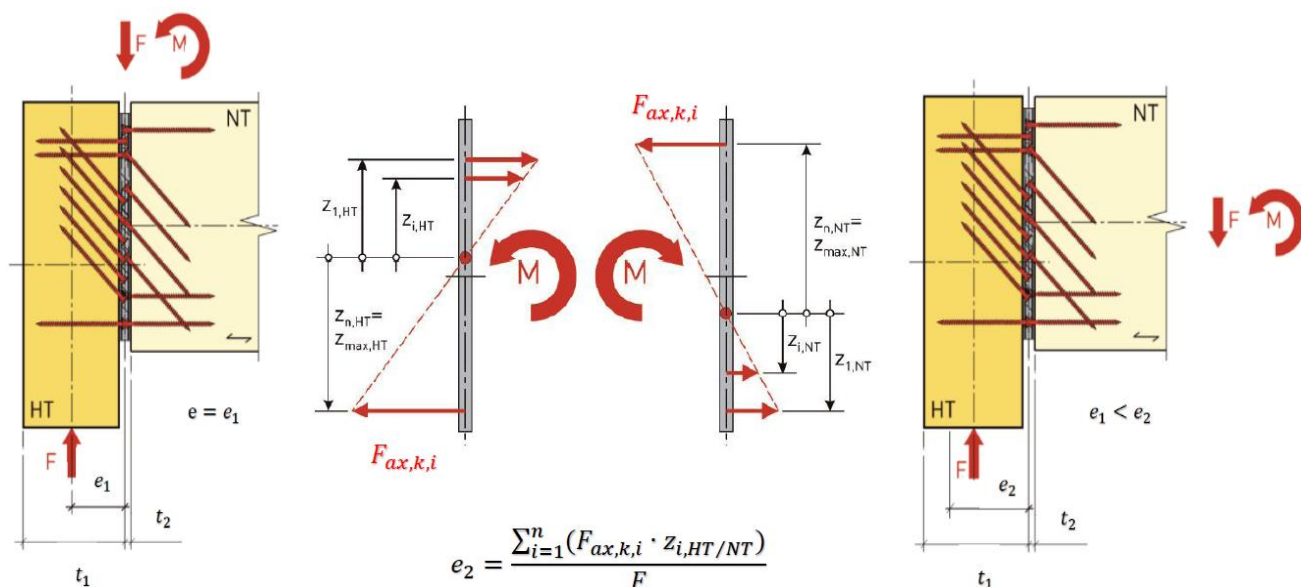


Рис. 2.11. Расчётная схема по определению коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки: слева— предельный эксцентриситет; в середине— влияние эксцентриситета на металлических накладках; справа— эксцентриситет изгиба

С умножением на коэффициент влияния эксцентриситета приложения нагрузки можно получить расчётную несущую способность, близкую к фактической. Автором предложена математическая модель определения коэффициента, приведенная в следующих уравнениях:

- несущая способность соединения F' с учётом коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки с учётом рекомендации [42], Н:

$$F' = \omega \cdot F \quad (2.68)$$

$$\omega = \frac{1}{\left(1 + \left(\frac{e_3 - e_1}{e_2}\right)^3\right)^{\frac{1}{3}}} \quad (2.69)$$

$$e_1 = 0,5(t_1 + t_2) \quad (2.70)$$

$$e_2 = \frac{\min(M_1, M_2)}{F} \quad (2.71)$$

$$e_3 = \frac{M}{F} \quad (2.72)$$

$$M_{1/2} = \sum_{i=1}^n (F_{ax,k,i} \cdot z_{i,II/B}) \quad (2.73)$$

Где:

ω — коэффициент влияния эксцентриситета приложения нагрузки;

e_1 — предельный эксцентриситет, мм;

e_2 — влияние эксцентриситета на металлических накладок, 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 металлические накладки, Н · мм;

M — изгибающий момент, Н · мм;

$F_{ax,k,i}$ — несущая способность шурупа на выдергивание, Н;

2.8. Аналитическое исследование напряженно-деформированного состояния деревянных элементов с металлическими накладками

Крепеж под нагрузкой вдоль направления вставки с учётом влияния эксцентриситета приложения нагрузки будет приводить к появлению концентратора напряжения на локальных участках стеновой панели, балки и металлических накладок. Изменение напряженно-деформированного состояния деревянных элементов влияет на несущую способность крепежа. В стыке возникает скалывание и разрыв вдоль и поперек волокон древесины по принципу дробности. По найденным главной деформации и напряжению соединения с использованием тензодатчиков можно проверить достоверность аналитических и экспериментальных исследований несущей способности соединения. Для того, чтобы повысить эффективность экспериментов, необходимо определить главные перемещения и напряжения не только в деревянных элементах, но и на металлических накладках.

Зависимость между деформациями, измеренными многоэлементными тензорезисторами (розетками) различных форм

Определение величины	Трехэлементная розетка
$\varepsilon_{\max}, 10^{-6} \text{ мм/мм}$	$0,5 \left\{ (\xi_1 + \xi_3) + \sqrt{(\xi_1 - \xi_3)^2 + [2\xi_2 - (\xi_1 + \xi_3)]^2} \right\}$
$\varepsilon_{\min}, 10^{-6} \text{ мм/мм}$	$0,5 \left\{ (\xi_1 + \xi_3) - \sqrt{(\xi_1 - \xi_3)^2 + [2\xi_2 - (\xi_1 + \xi_3)]^2} \right\}$
$\tau_{\max}, 10^{-6} \text{ мм/мм}$	$0,5 \sqrt{(\xi_1 - \xi_3)^2 + [2\xi_2 - (\xi_1 + \xi_3)]^2}$
α	$0,5 \arctan \left(\frac{2\xi_2 - (\xi_1 + \xi_3)}{\xi_1 - \xi_3} \right)$
$\sigma_{\max}, \text{ МПа}$	$\frac{E}{1 - \mu^2} (\xi_{\max} + \mu \cdot \xi_{\min})$
$\sigma_{\min}, \text{ МПа}$	$\frac{E}{1 - \mu^2} (\xi_{\min} + \mu \cdot \xi_{\max})$
$\tau_{\max}, 10^{-6} \text{ мм/мм}^2$	$\frac{E}{1 - \mu^2} \tau_{\max}$
$\sigma_{\max}, \text{ МПа}$	$E \cdot e$ (для одноэлементная розетка)

Примечание: ε_1 — горизонтальная деформация, мм/мм; ε_2 — наклонная деформация под углом 45 °к волокнам, мм/мм; ε_3 — вертикальная деформация, мм/мм; E — модуль упругости вдоль волокон [79], МПа; $E=10000$ МПа для материала *CLT* и *LVL*; μ – коэффициент Пуассона вдоль волокон; $\mu=0,45$

В табл. 2.3 представлена зависимость между деформациями, измеренными многоэлементными тензорезисторами (розетками) различных форм определения максимальных, минимальных деформаций, а также деформаций сдвига и углов между направлениями измерений и направлением максимальных деформаций [17].

2.9. Выводы по главе

1. Предложена математическая модель расчета несущей способности шурупа на выдергивание из деревянных элементов из *CLT* и *LVL*;

2. Предложен аналитический метод расчета несущей способности односрезного шурупа без укрепления и с МЗП на металлической накладке в деревянных элементах из *CLT* и *LVL*;

3. Предложен аналитический алгоритм расчёта несущей способности соединения на металлических накладках без укрепления и с МЗП в деревянных конструкциях стеновой панели и балки по критериям сопротивления шурупов на выдергивание и срез;

4. Предложено оптимальное решение для проектирования соединения на металлических накладках по критерию сопротивления шурупов на выдергивание;

5. Предложена математическая модель расчёта коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки. Результаты исследований позволяют использовать их в расчётах большепролетных конструкциях;

6. Рассмотрено влияние напряженно-деформированного состояния деревянных элементов на несущую способность соединения;

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью исследований явилось проведение экспериментов по определению несущей способности соединения без укрепления и с МЗП в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* и *LVL* на металлических накладках по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез для проверки достоверности аналитических исследований.

3.1. Экспериментальное исследование плотности деревянных материалов

3.1.1. Условия хранения материала образцов

Изготовление опытных образцов было осуществлено в заводских условиях в соответствии с требованиями [79, 82, 84, 86]. В лаборатории, где хранились экспериментальные образцы, поддерживался температурно-влажностный режим при помощи калориферов. Температура в лаборатории 20 ± 1 °С, влажность древесины перед испытаниями была в пределах 8-12%. Фактические пороки древесины, выявленные при визуальном осмотре, были сопоставлены с допускаемыми.

3.1.2. Оборудование

Проведение испытаний проводилось в механической лаборатории СПбГАСУ, где находится оборудование, позволяющее осуществлять испытания определения плотности элементов из *CLT* и *LVL* с помощью лабораторных весов *Ohaus Pioneer PA413C* (рис.3.1). Максимальный вес составляет до 410 г с дискретностью до 0,001.

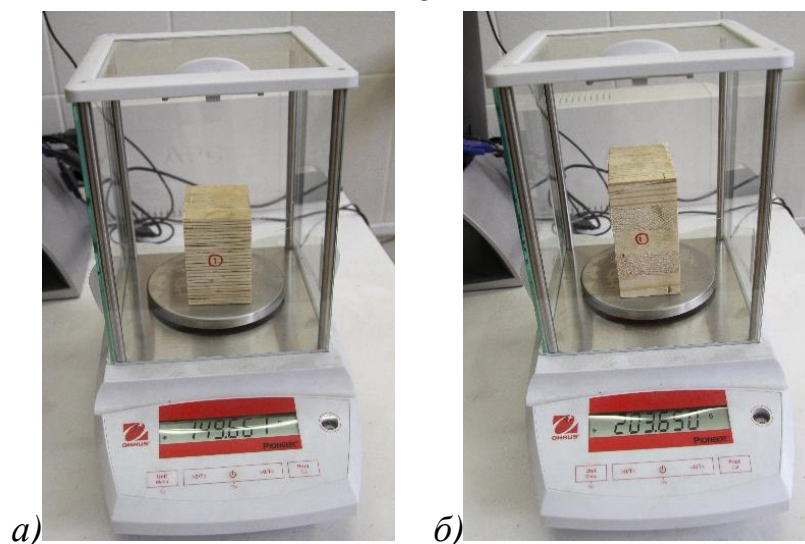


Рис.3.1. Лабораторные весы *Ohaus Pioneer PA413C*: *а*— опытный образец из *LVL*; *б*— опытный образец из *CLT*

3.1.3. Методика и результаты проведения эксперимента

Выполненный анализ состояния вопроса позволил сформулировать основные направления исследования, включая программу экспериментов.

Экспериментальные исследования были направлены на:

- определение плотности деревянных материалов из *CLT*;
- определение плотности деревянных материалов из *LVL*;

Поскольку автором использовалась конструкция «балка из *LVL* (брус из клееного шпона выбран брус *LVL Ultralam-R* на рис. 3.2, *а*) и стеновой панели из *CLT* с пятью слоями (панели из поперечно-клееной древесины были изготовлены компанией Промстройлеса на рис. 3.2. *б*)», была определена плотность материалов из *CLT* и *LVL*. Температура в лаборатории 20 ± 1 °C, влажность материалов 13%. Количество образцов на каждый вид испытаний составляло 5 шт. Были изготовлены опытные образцы прямоугольной формой и размеры образцов определялись с точностью до 0,1 мм.

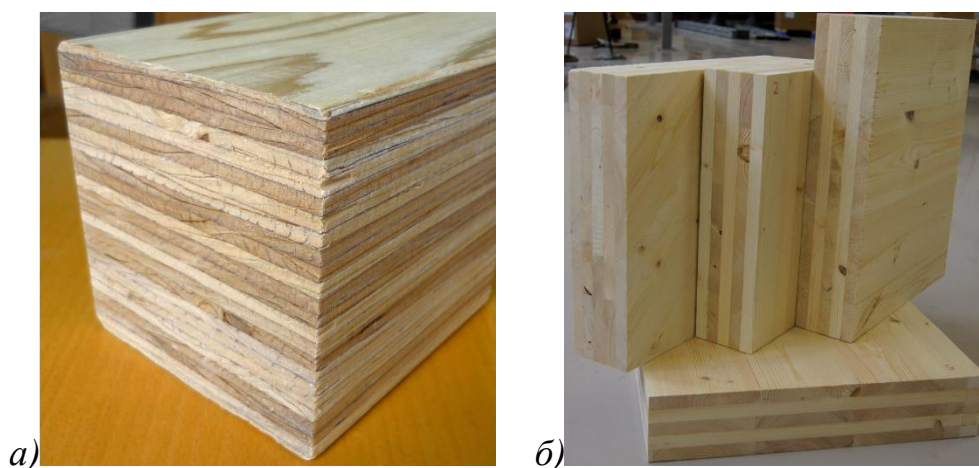


Рис. 3.2. Опытные образцы: *a*— *LVL Ultralam-R*; *б*— *CLT* с пятью слоями

Таблица 3.1

Определение плотности *CLT* $\rho_{k,CLT}$, кг/м³

№	Длина, м	Ширина, м	Высота, м	Вес, кг	Плотность, кг/м ³
1	0,0808	0,0495	0,1003	0,2036	507
2	0,0692	0,0501	0,1004	0,1803	517
3	0,0688	0,0440	0,1004	0,1517	499
4	0,0689	0,0426	0,1005	0,1411	478
5	0,0801	0,0427	0,1003	0,1616	471
6	Среднее значение				495

Таблица 3.2

Определение плотности *LVL* $\rho_{k,LVL}$, кг/м³

№	Длина, м	Ширина, м	Высота, м	Вес, кг	Плотность, кг/м ³
1	0,0702	0,0511	0,0765	0,1496	546
2	0,0675	0,0486	0,0764	0,1402	559
3	0,0711	0,0485	0,0764	0,1470	558
4	0,0693	0,0469	0,0765	0,1418	570
5	0,0690	0,0461	0,0766	0,1386	569
6	Среднее значение				560

После обработки результатов, полученных в ходе испытаний, некоторые результаты имеют отклонение по сравнению со средней величиной показателя плотности. С целью уменьшения ошибок нормативной плотностью должно быть принято среднее значение.

3.2. Экспериментальное исследование несущей способности шурупа на выдергивание

3.2.1. Оборудование

Экспериментальные исследования проводились в механической лаборатории СПбГАСУ с использованием универсальной испытательной машины *INSTRON* 5969 (рис. 3.3, а), имеющей максимальный режим работы до 50 кН. Количество образцов на каждый вид испытаний составляло 5 шт. Температура в лаборатории 20 ± 1 °С, влажность материалов 13 %. Скорость нагружения при непрерывном увеличении нагрузки составляла 3 мм/мин.

3.2.2. Методика и результаты проведения эксперимента

Выполненный анализ состояния вопроса позволил сформулировать основные направления исследования, включая программу экспериментов.

Экспериментальные исследования были направлены на:

- определение несущей способности шурупа на выдергивание из широкой и узкой стороны стеновой панели из *CLT*;
- определение несущей способности шурупа на выдергивание вдоль волокон *LVL*;

Параметры шурупа (рис. 3.3, б) для металлических накладок типа *SHERPA*-серии *XS* и *S* [93] с точностью 0,1 мм, показаны в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Параметры шурупа [36], мм

Диаметр головки шурупа	Номинальный диаметр шурупа	Внутренний диаметр шурупа	Диаметр гладкой части шурупа	Длина шурупа	Длина резьбы
7,5	4,5	2,6	3,1	50,0	36,0

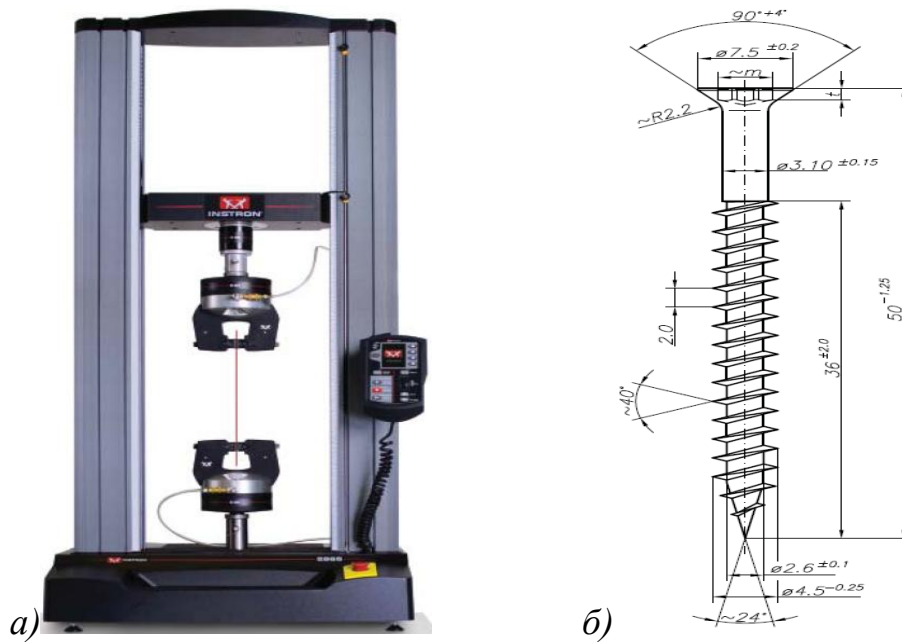


Рис. 3.3. *а*— универсальная испытательная машина *INSTRON 5969*; *б*— шуруп для металлических накладок типа *SHERPA*-серии *XS* и *S* [80]

Испытания по определению несущей способности шурупов на выдергивание из деревянных элементов из *CLT* и *LVL* представлены на рис. 3.4 и 3.5 в соответствии с зависимостью «нагрузка-перемещение» (рис. 3.6-3.7). В этом разделе были проведены 3 эксперимента (№. 18, 19 и 20), обозначения которых показаны в Приложении А.

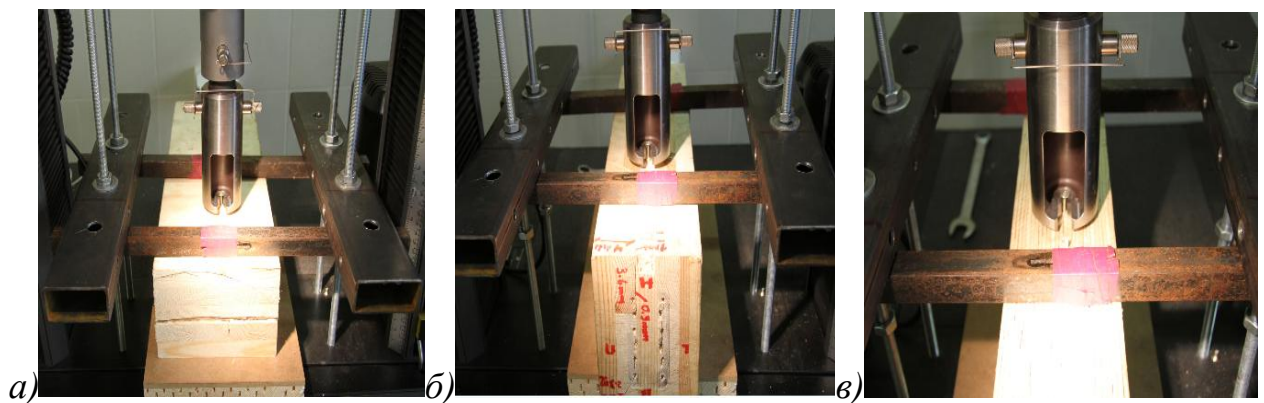


Рис. 3.4. Испытания по определению несущей способности шурупов на выдергивание: *а*— из широкой стороны стеновой панели из *CLT*; *б*— из узкой стороны стеновой панели из *CLT*; *в*— вдоль волокон *LVL*

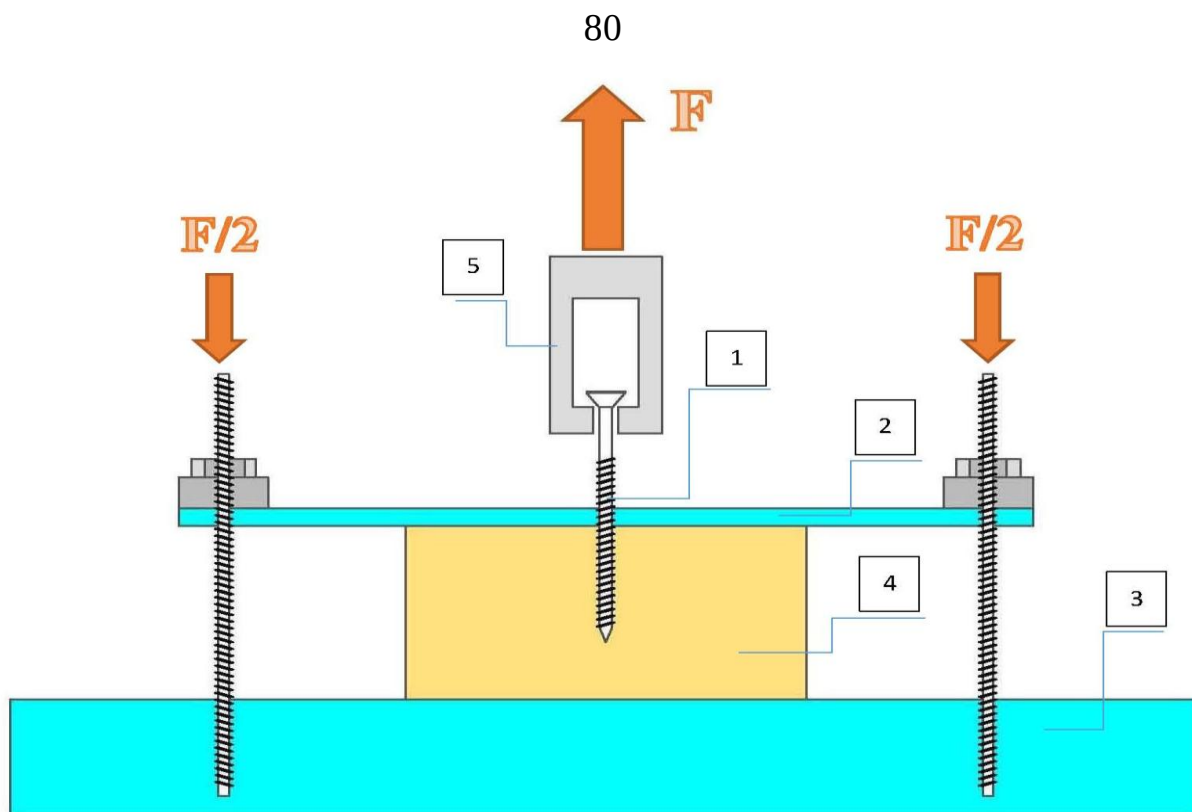


Рис. 3.5. Испытание по определению сопротивления шурупа на выдергивание: 1— шуруп; 2— крепеж образца; 3— испытательный стенд; 4— опытный деревянный образец; 5— захват испытательной машины

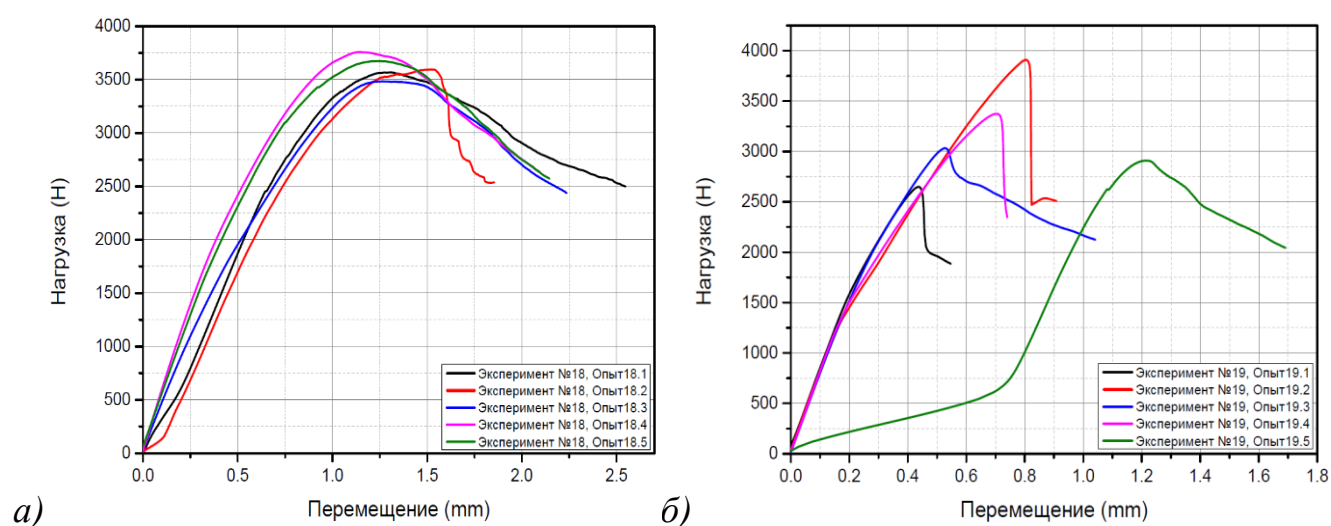


Рис. 3.6. Зависимость «нагрузка-перемещение» по определению несущей способности шурупов на выдергивание: *а*— из широкой стороны стеновой панели из CLT; *б*— из узкой стороны стеновой панели из CLT

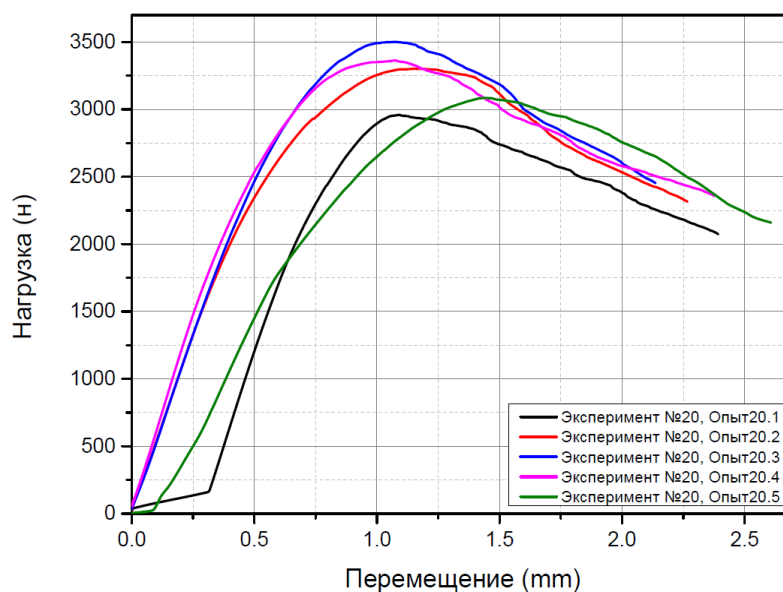


Рис. 3.7. Зависимость «нагрузка-перемещение» по определению несущей способности шурупов на выдергивание вдоль волокон *LVL*

Экспериментальный результат для каждого образца имеет небольшое отклонение по сравнению со средней величиной. Поэтому с учётом требования точности средняя величина должна быть принята равной фактической несущей способности. Экспериментальные результаты в соответствии с требованиями [80] с точностью 0,01 Н представлено в таблице. 3.4. Для расчётов и обработки результатов использовались программы *Microsoft Excel* , *Origin pro* [111], *IBM SPASS Statistics* [109] и *Mathcad* [110].

Таблица 3.4

Экспериментальные результаты определения несущей способности шурупа на выдергивание

Из широкой стороны <i>CLT</i>			Из узкой стороны <i>CLT</i>			Вдоль волокон <i>LVL</i>		
$F_{ax,test}$	$F_{ax,теку}$	$F_{ax,max}$	$F_{ax,test}$	$F_{ax,теку}$	$F_{ax,max}$	$F_{ax,test}$	$F_{ax,теку}$	$F_{ax,max}$
1583,81	3616,17	3616,17	1427,40	3175,54	3175,54	1873,64	3242,15	3242,15
$\omega_{CLT/LVL}$	-15,47%		$\omega_{CLT/LVL}$	-23,82%				

Примечания: $F_{ax,test}$ — фактическая несущая способность, Н; $F_{ax,max}$ — максимальная несущая способность, Н; $F_{ax,теку}$ — предел текучести материала, Н; $\omega_{CLT/LVL}$ — приращение $F_{ax,test,LVL}$ и $F_{ax,test,CLT}$;

$$\omega_{CLT / LVL} = \frac{F_{ax,test,CLT} - F_{ax,test,LVL}}{F_{ax,test,LVL}} \cdot 100\%$$

Из табл. 3.4 видно, что в зависимости от направления волокон и физико-механических характеристик деревянных элементов экспериментальные результаты определения несущей способности шурупов на выдергивание из широкой стороны стеновой панели из *CLT* выше из узкой стороны, а которых ниже, чем вдоль волокон *LVL*. При этом, в свою очередь, приведет к различию несущей способности соединения на металлических накладках, которые отдельно крепятся к стеновой панели и балке.

3.3. Экспериментальное исследование несущей способности односрезного шурупа на металлической накладке

3.3.1. Оборудование

Экспериментальные исследования проводились в механической лаборатории СПбГАСУ с использованием универсальной испытательной машины *INSTRON* 5969 (рис. 3.3, *a*), имеющей максимальный режим работы до 50 кН. Количество образцов на каждый вид испытаний составляло 5 шт. Температура в лаборатории 20 ± 1 °С, влажность материалов 13 %. Скорость нагружения при непрерывном увеличении нагрузки составляла 3 мм/мин.

3.3.2. Методика и результаты проведения эксперимента

Выполненный анализ состояния вопроса позволил сформулировать основные направления исследования, включая программу экспериментов.

Экспериментальные исследования были направлены на:

- определение несущей способности односрезного шурупа с металлической накладкой на широкой и узкой стороне стеновой панели из *CLT*;

- определение несущей способности односрезного шурупа под углом $\alpha = 45^\circ$ к волокнам с металлической накладкой на широкой стороне стеновой панели из *CLT*;

- определение несущей способности односрезного шурупа вдоль волокон *LVL*;

Параметры шурупа (рис. 3.3, б) для металлических накладок типа *SHERPA*-серии *XS* и *S* с точностью 0,1 мм, показаны в табл. 3.3. Испытание по определению несущей способности шурупа без укрепления МЗП на срез представлено на рис. 3.8. Виды разрушения соединения представлены на рис. 3.9 в соответствии с зависимостью «нагрузка-перемещение» (рис. 3.10-3.11).

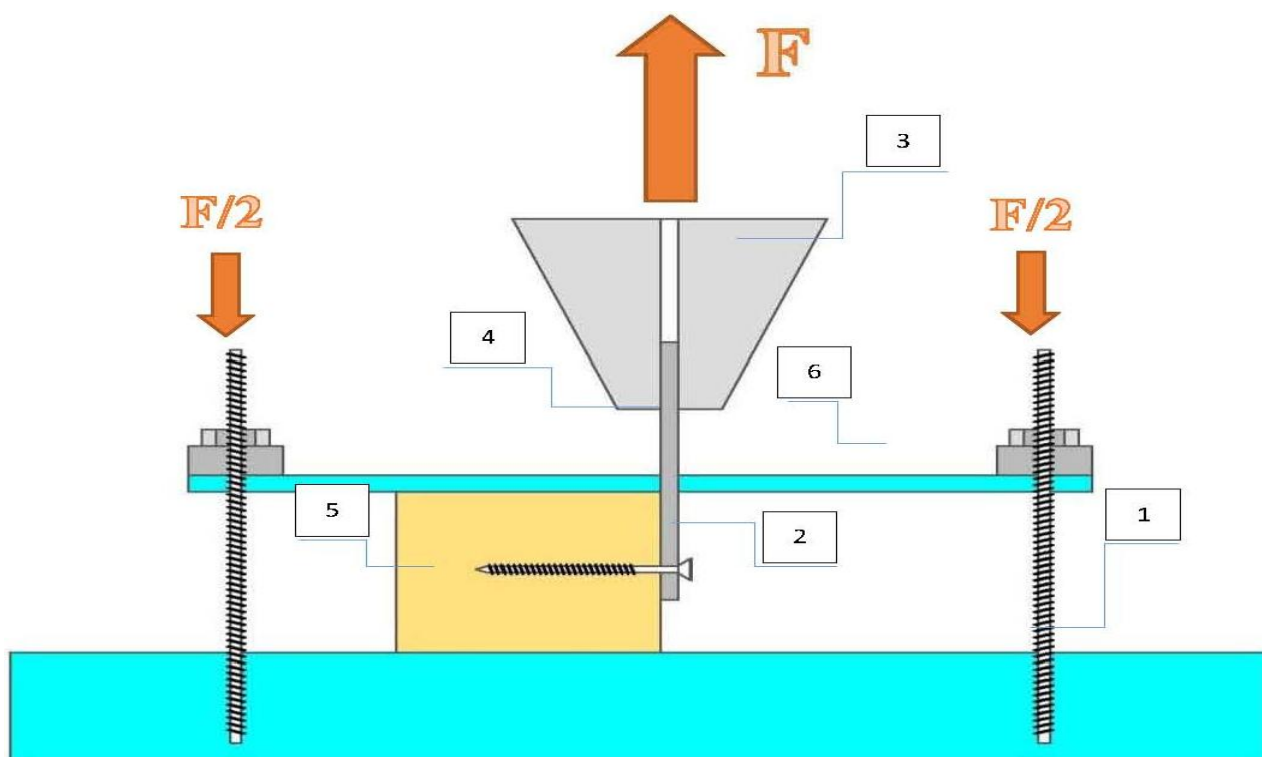


Рис. 3.8. Испытание по определению несущей способности шурупа без укрепления МЗП на срез: 1— испытательный стенд; 2— шуруп; 3— захват испытательной машины; 4— металлическая накладка; 5— опытный деревянный образец; 6— крепеж образца

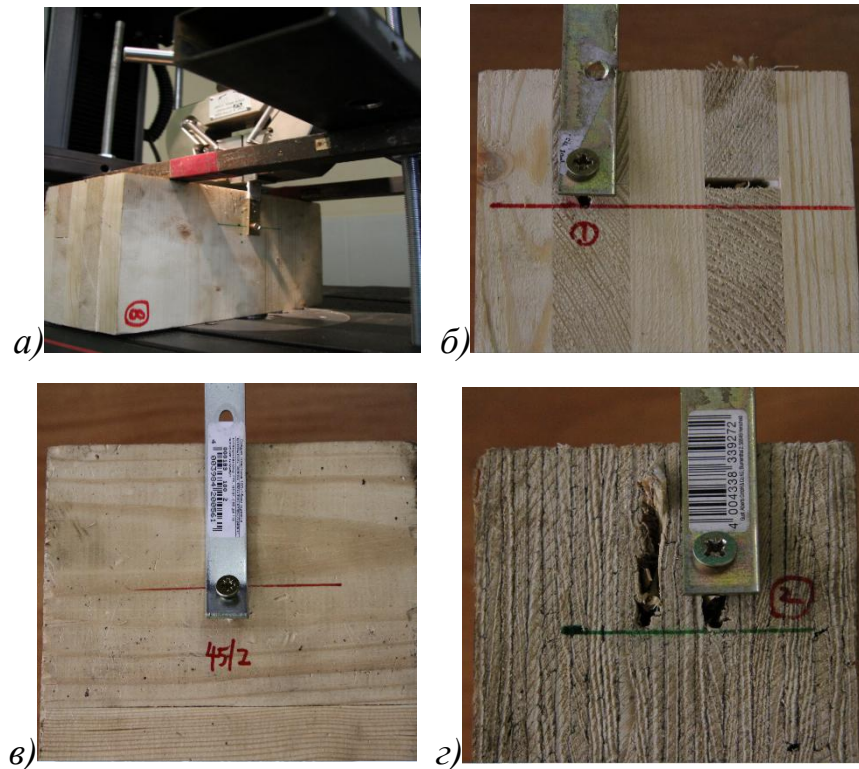


Рис. 3.9. Виды разрушения односрезного шурупа: *а*— на широкой стороне стеновой панели из *CLT*; *б*— на узкой стороне стеновой панели из *CLT*; *в*— под углом $\alpha = 45^\circ$ к волокнам на широкой стороне стеновой панели *CLT*; *г*— вдоль волокон *LVL*

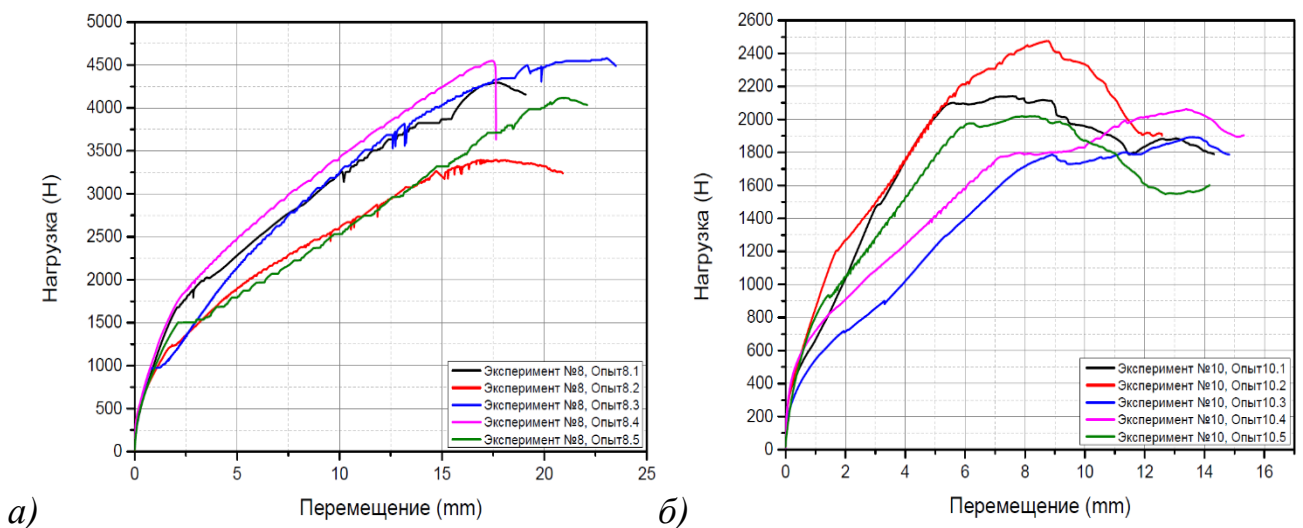


Рис. 3.10. Зависимость «нагрузка-перемещение» по определению несущей способности односрезного шурупа: *а*— на широкой стороне стеновой панели из *CLT*; *б*— на узкой стороне стеновой панели из *CLT*

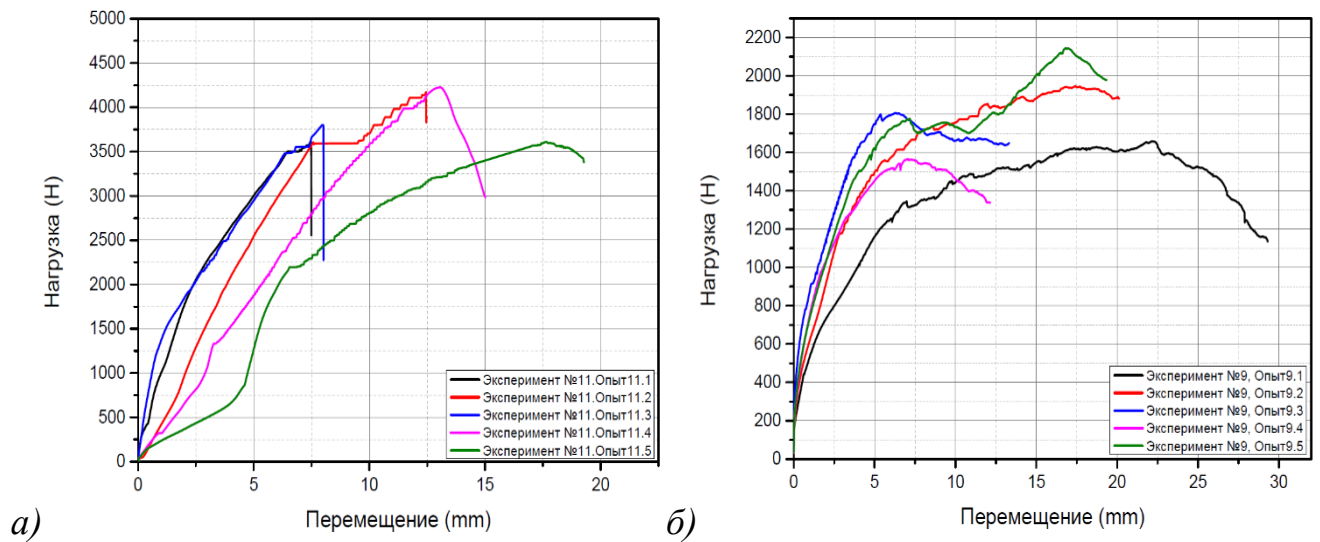


Рис. 3.11. Зависимость «нагрузка-перемещение» по определению несущей способности односрезного шурупа: *а*— под углом $\alpha = 45^\circ$ к волокнам на широкой стороне стеновой панели из *CLT*; *б*— вдоль волокон *LVL*

Экспериментальный результат для каждого образца имеет небольшое отклонение по сравнению со средней величиной прочности. Поэтому с учётом требования точности средняя величина должна быть принята равной фактической несущей способности односрезного шурупа. Определение фактического значения в соответствии с требованиями 80] с точностью 0,01 Н представлено в табл. 3.5. Для расчётов и обработки результатов использовались программы *Microsoft Excel*, *Origin pro*, *IBM SPASS Statistics* и *Mathcad*.

Таблица 3.5

Экспериментальные результаты определения несущей способности односрезного шурупа

На широкой стороне <i>CLT</i>			На узкой стороне <i>CLT</i>			Вдоль волокон <i>LVL</i>			Под углом $\alpha = 45^\circ$ к волокнам на широкой стороне <i>CLT</i>		
$F_{ax,test}$	$F_{ax,max}$	$F_{ax,теку}$	$F_{ax,test}$	$F_{ax,max}$	$F_{ax,теку}$	$F_{ax,test}$	$F_{ax,max}$	$F_{ax,теку}$	$F_{ax,test}$	$F_{ax,max}$	$F_{ax,теку}$
1638,31	4188,21	2866,00	1641,76	2118,14	2049,15	1294,13	1824,70	1511,60	1925,66	3883,80	3644,75
$\omega_{CLT/LVL}$	26,60%		$\omega_{CLT/LVL}$	26,86%					$\omega_{CLT/LVL}$	48,80%	

Примечания: $\omega_{CLT/LVL}$ — приращение $F_{v,test,LVL}$ и $F_{v,test,CLT}$; $\omega_{CLT/LVL} = \frac{F_{v,test,CLT} - F_{v,test,LVL}}{F_{v,test,LVL}} \cdot 100\%$

Из табл. 3.5 видно, что аналогично выводу в разделе. 3.2, направление волокон образцов и физико-механические характеристики наиболее влияют на несущую способность односрезного шурупа на металлической накладке в деревянных элементах из *CLT* и *LVL*. При угле $\alpha=45^\circ$ между осью шурупа и направлением волокон получается максимальное значение на срез несущей способности. Таким образом, с использованием наклонных шурупов можно повысить несущую способность соединения.

3.4. Экспериментальное исследование несущей способности односрезного шурупа на металлической накладке с укреплением металлической зубчатой пластиной

3.4.1. Оборудование

Экспериментальные исследования проводились в механической лаборатории СПбГАСУ с использованием универсальной испытательной машины *INSTRON* 5969 (рис. 3.3, *a*), имеющей максимальный режим работы до 50 кН. Количество образцов на каждый вид испытаний составляло 5 шт. Температура в лаборатории $20\pm 1^\circ\text{C}$, влажность материалов 13 %. Скорость нагружения при непрерывном увеличении нагрузки составляла 3 мм/мин.

3.4.2. Методика и результаты проведения эксперимента

Выполненный анализ состояния вопроса позволил сформулировать основные направления исследования, включая программу экспериментов.

Экспериментальные исследования были направлены на:

- определение несущей способности односрезного шурупа с укреплением

МЗП на широкой и узкой стороне стеновой панели из *CLT*;

- определение несущей способности односрезного шурупа с укреплением МЗП вдоль волокон *LVL*;

Параметры шурупа (рис. 3.3, б) из металлических накладок типа *SHERPA*-серии *XS* и *S* с точностью 0,1 мм, показаны в табл. 3.3. Испытание по определению несущей способности шурупа с укреплением МЗП на срез представлено на рис. 3.12. Виды разрушения соединения даны на рис. 3.13 в соответствии с зависимостью «нагрузка-перемещение» (рис. 3.14 – 3.15).

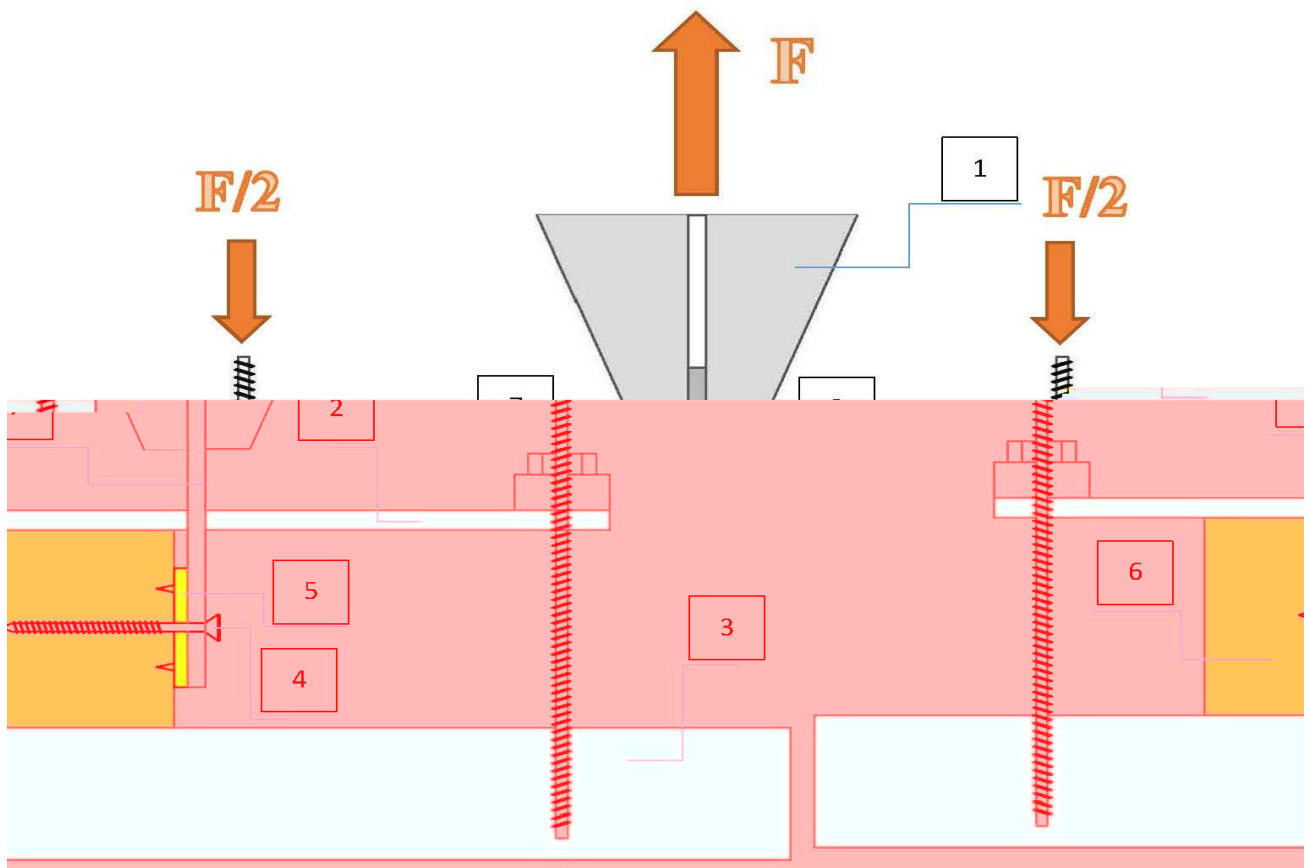


Рис. 3.12. Испытание по определению несущей способности шурупа с укреплением МЗП на срез: 1— захват испытательной машины; 2— крепеж образца; 3— испытательный стенд; 4— шуруп; 5— металлическая зубчатая пластина; 6— опытный деревянный образец; 7— металлическая накладка

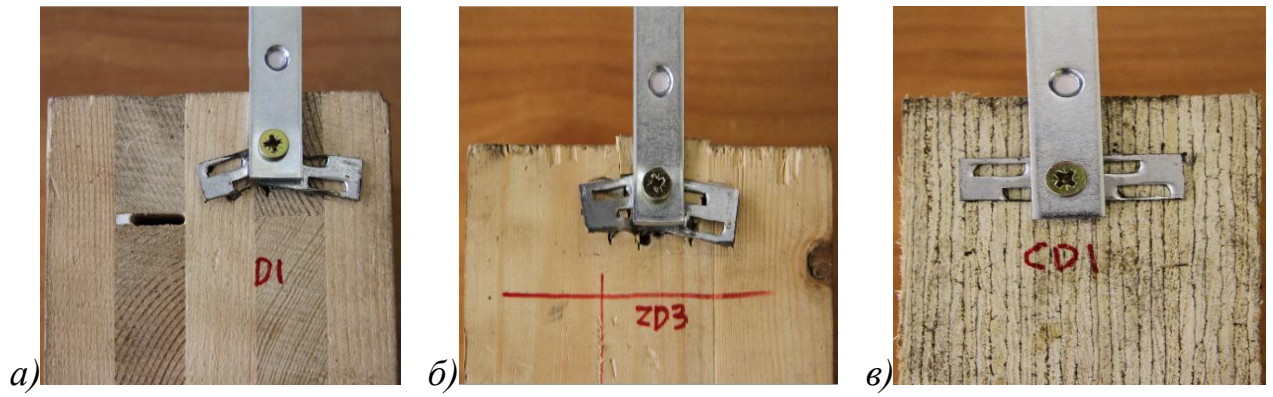


Рис. 3.13. Виды разрушения односрезного шурупа с укреплением МЗП: *а*— на узкой стороне стеновой панели из *CLT*; *б*— на широкой стороне стеновой панели из *CLT*; *в*— вдоль волокон *LVL*

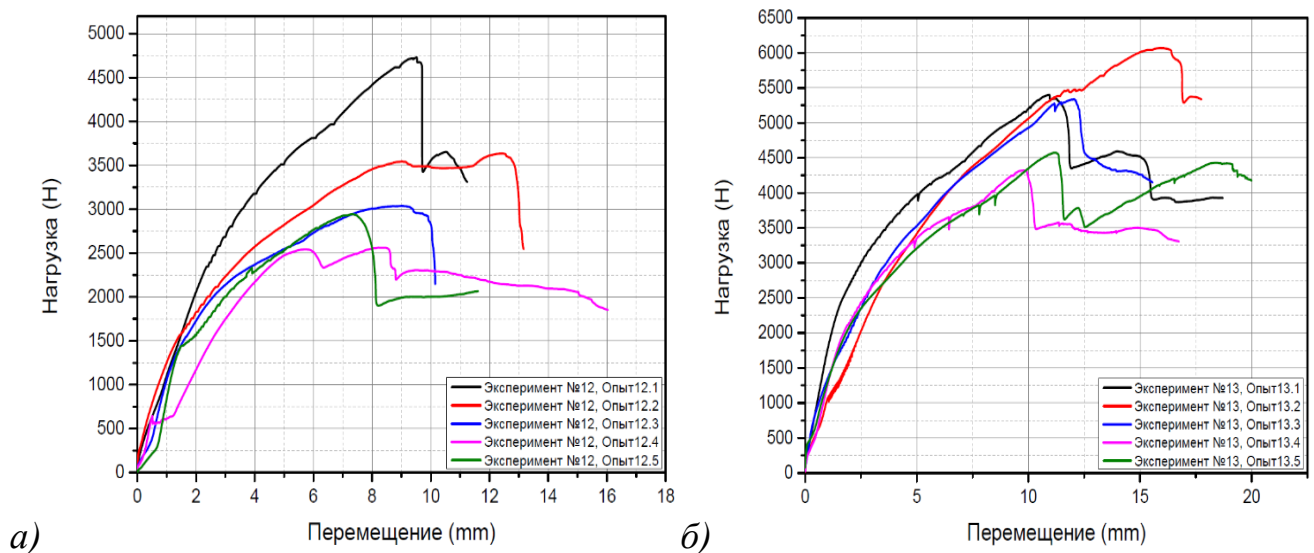


Рис. 3.14. Зависимость «нагрузка-перемещение» по определению несущей способности односрезного шурупа с укреплением МЗП: *а*— на широкой стороне стеновой панели из *CLT*; *б*— на узкой стороне стеновой панели из *CLT*

Таблица 3.6

Экспериментальные результаты определения несущей способности односрезного шурупа с укреплением МЗП

На широкой стороне <i>CLT</i>			На узкой стороне <i>CLT</i>			Вдоль волокон <i>LVL</i>		
$F_{v,test}$	$F_{v,max}$	$F_{v,teky}$	$F_{v,test}$	$F_{v,max}$	$F_{v,teky}$	$F_{v,test}$	$F_{v,max}$	$F_{v,teky}$
1868,96	5140,03	3991,04	1716,01	3381,11	2826,34	1609,01	2735,74	2688,40
$\omega_{CLT/LVL}$	16,16%		$\omega_{CLT/LVL}$	6,65%				

Примечания: $\omega_{CLT/LVL}$ — приращение $F_{v,test,LVL}$ и $F_{v,test,CLT}$; $\omega_{CLT/LVL} = \frac{F_{v,test,CLT} - F_{v,test,LVL}}{F_{v,test,LVL}} \cdot 100\%$

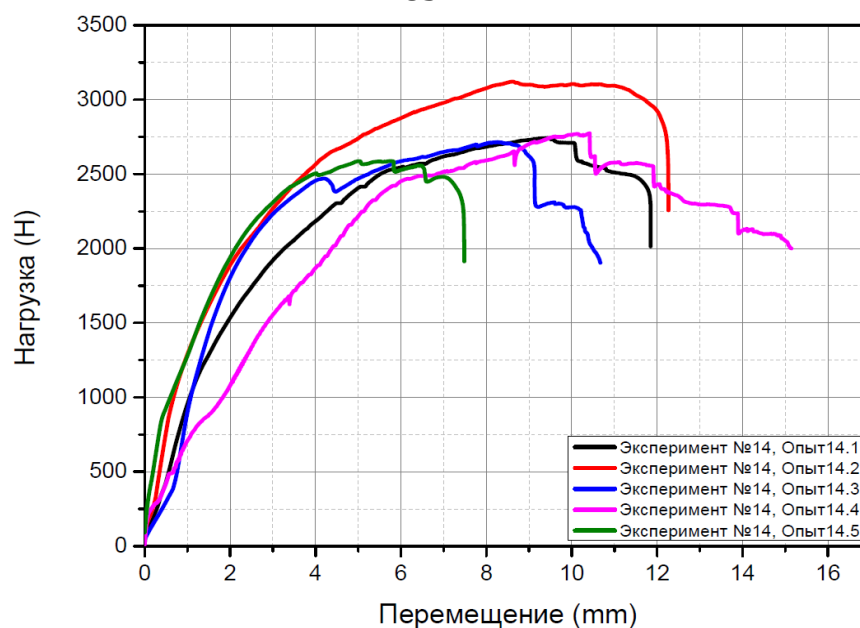


Рис. 3.15. Зависимость «нагрузка-перемещение» по определению несущей способности односрезного шурупа с укреплением МЗП вдоль волокон *LVL*

Экспериментальный результат для каждого образца имеет небольшое отклонение по сравнению со средней величиной. Поэтому с учётом требования точности средняя величина должна быть принята равной фактической несущей способности односрезного шурупа с укреплением МЗП. Определение экспериментальных результатов в соответствии с требованиями [80] с точностью 0,01 Н представлено в табл. 3.6. Для расчётов и обработки результатов использовались программы *Microsoft Excel*, *Origin pro* и *IBM SPASS Statistics*, *Mathcad*.

Из табл. 2.9 видно, что в зависимости от угла между осью шурупа и волокнами, физико-механических и геометрических характеристик деревянных материалов с укреплением МЗП можно повысить несущую способность соединения и надёжность, сократить себестоимость изготовления.

3.5. Экспериментальное исследование несущей способности соединения элементов деревянных конструкций на металлических накладках без укрепления металлической зубчатой пластиной по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез

3.5.1. Оборудование

Экспериментальные исследования проводились в механической лаборатории СПбГАСУ с использованием универсальной испытательной машины *INSTRON* 5969 (рис. 3.3, *a*), имеющей максимальный режим работы до 50 кН. Количество образцов на каждый вид испытаний составляло 3 шт. Температура в лаборатории 20 ± 1 °С, влажность материалов 13 %. Скорость нагружения при непрерывном увеличении нагрузки составляла 2 мм/мин.

3.5.2. Методика эксперимента

Выполненный анализ состояния вопроса позволил сформулировать основные направления исследования, включая программу экспериментов.

Экспериментальные исследования были направлены на определение несущей способности соединения на металлических накладках по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез:

- в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT*;
- в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL*;

Расположение соединения на металлических накладках в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* и *LVL* представлено на рис. 3.16-3.17. Установка опытных деревянных образцов на экспериментальном стенде и проведение испытаний показаны на рис. 3.18-3.19.

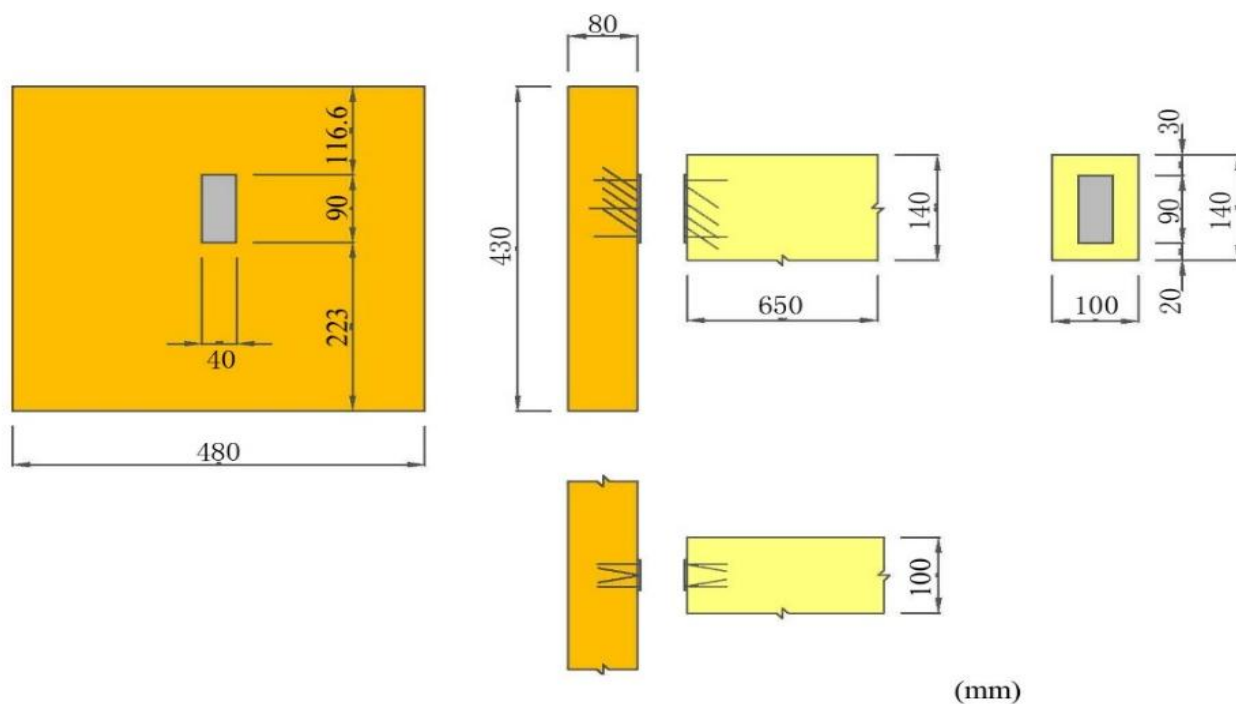


Рис. 3.16. Расположение соединения на металлических накладках в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT*

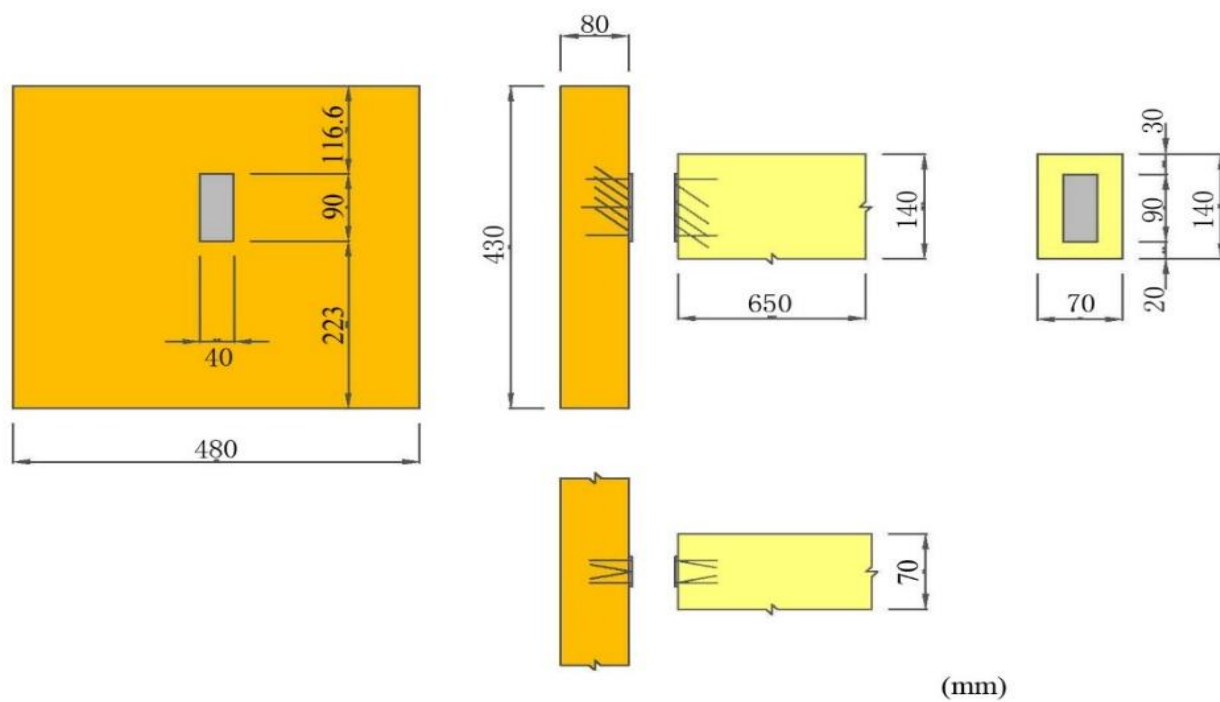


Рис. 3.17. Расположение соединения на металлических накладках в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL*

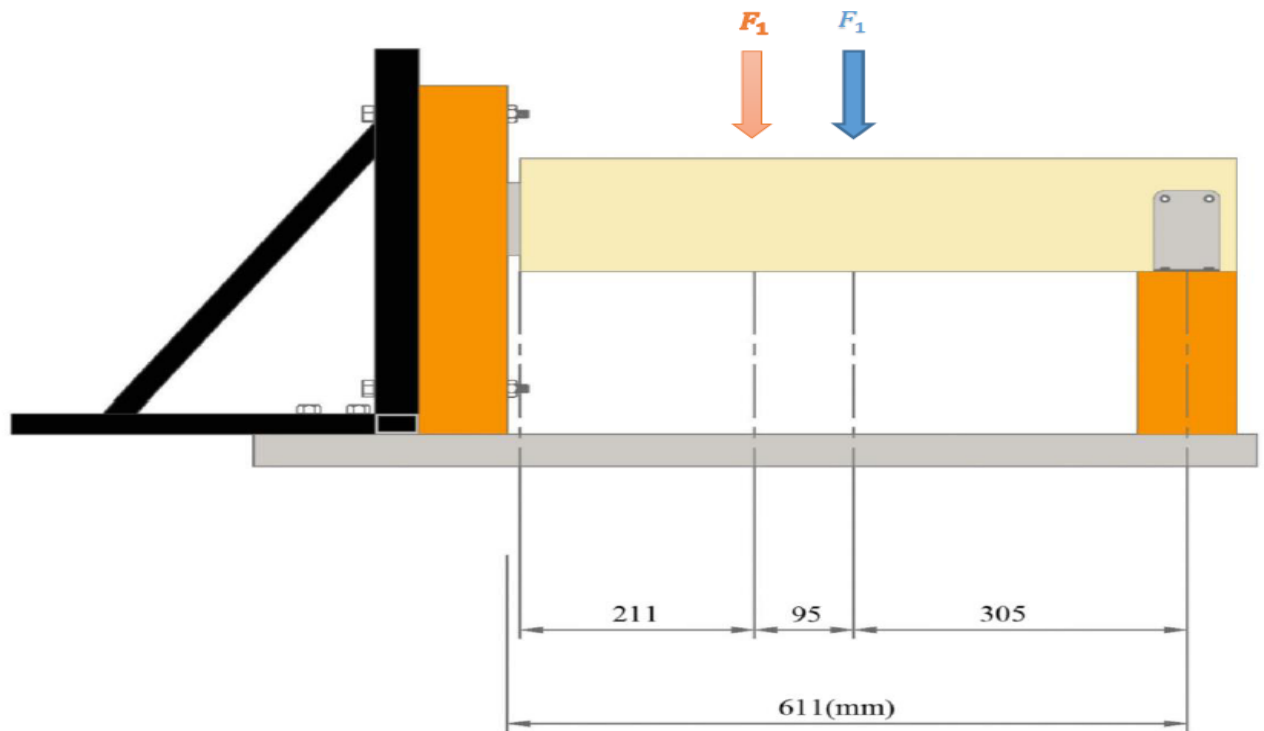


Рис. 3.18. Установка опытных деревянных образцов на экспериментальном стенде

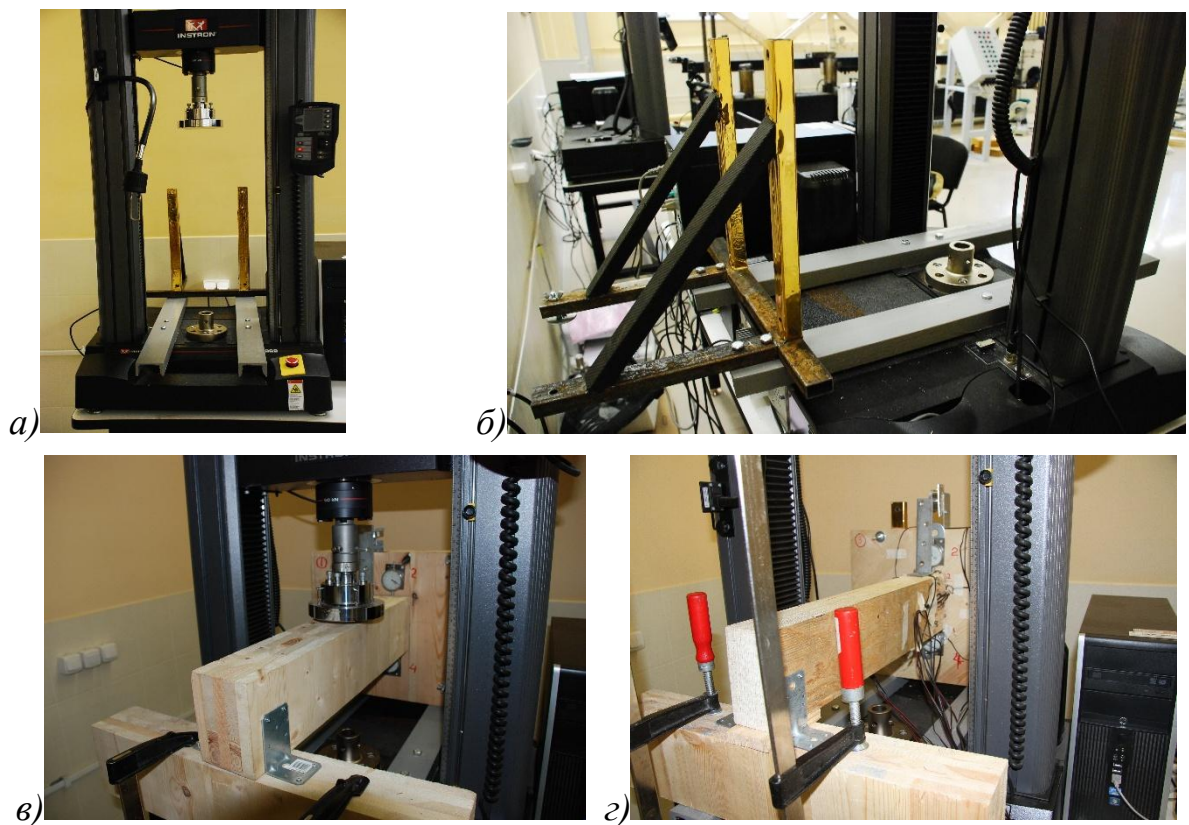


Рис. 3.19. Проведение испытаний: а)-б) экспериментальный стенд и металлическая установка для крепления деревянных опытных образцов; в— для стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT*; з— для стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL*

3.5.3. Режимы нагружения

Нагружение деревянных опытных образцов должно быть проведено по схеме, приведенной на рис 3.20. Нагружение образцов соединения выполняют в следующей последовательности в соответствии с [24, 62, 63, 64]

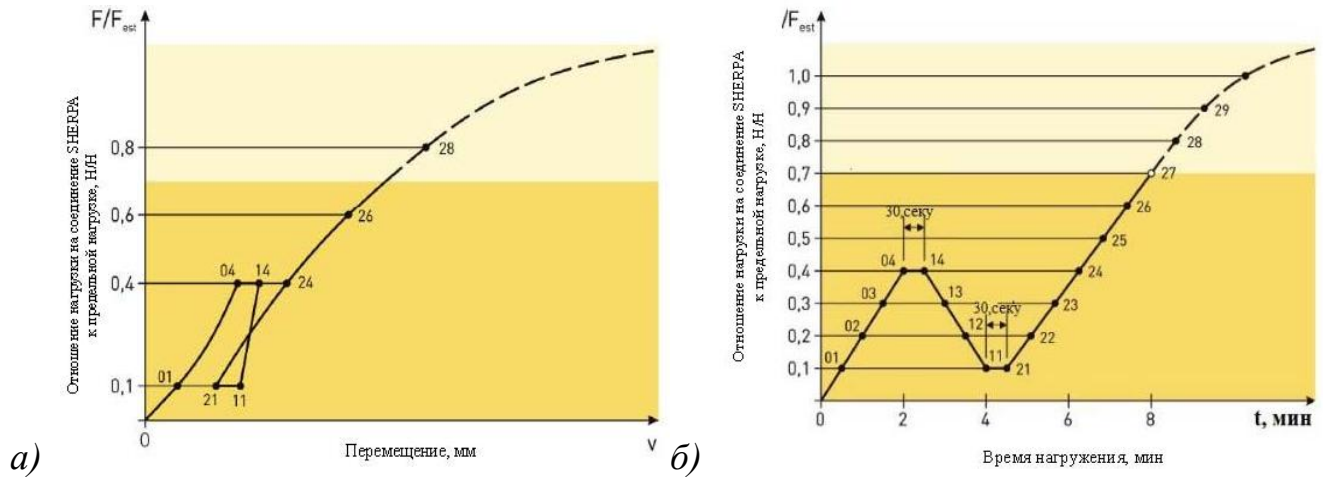


Рис. 3.20. а— зависимость «нагрузка-перемещение»; б— режимы нагружения

3.5.4. Результаты проведения эксперимента

Виды разрушения соединения в гнезде деревянных под шурупы представлены на рис. 3.21. Виды разрушения соединения элементов деревянных конструкций и пластические деформации металлических накладок представлены на рис. 3.22-3.23.

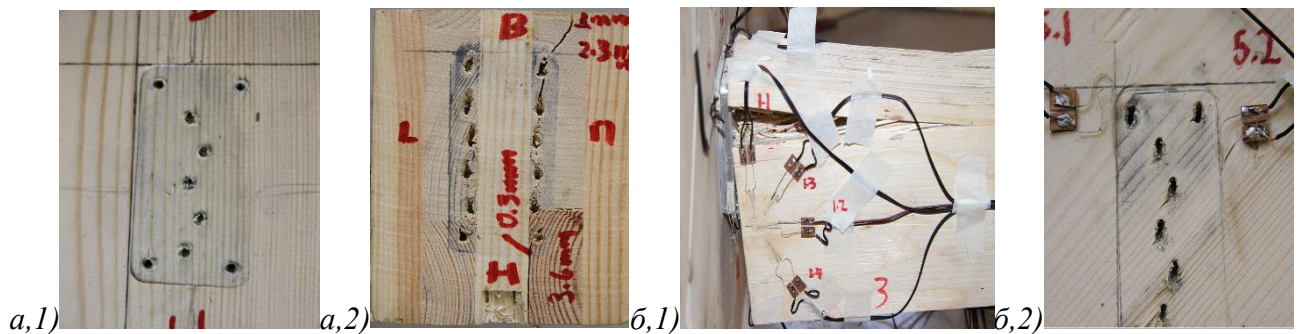


Рис. 3.21. Виды разрушения соединения в гнезде деревянных под шурупы: а, 1-а, 2) для стеновой панели из CLT и балки из CLT; б, 1-б, 2) для стеновой панели из CLT и балки из LVL

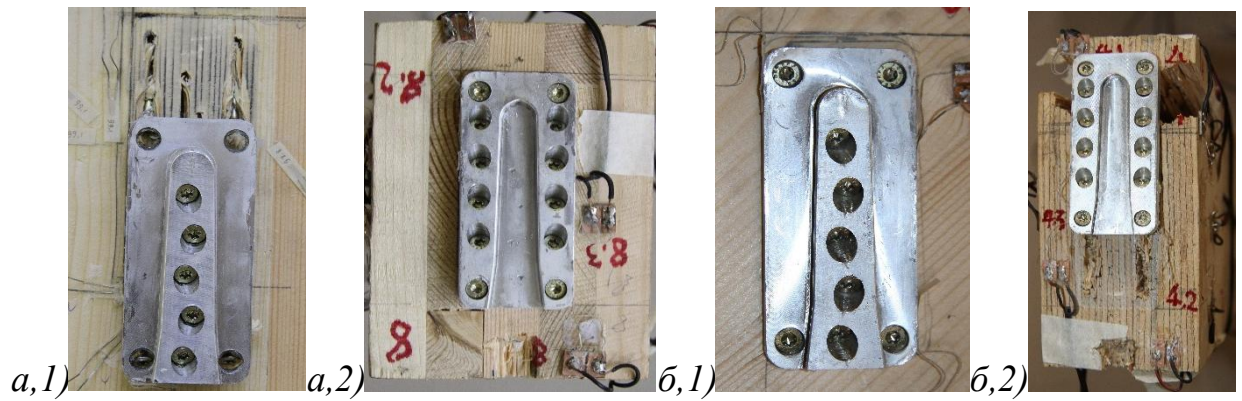


Рис. 3.22. Виды разрушения соединения деревянных конструкций: *а,1-а,2)* для стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT*; *б,1-б,2)* стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL*

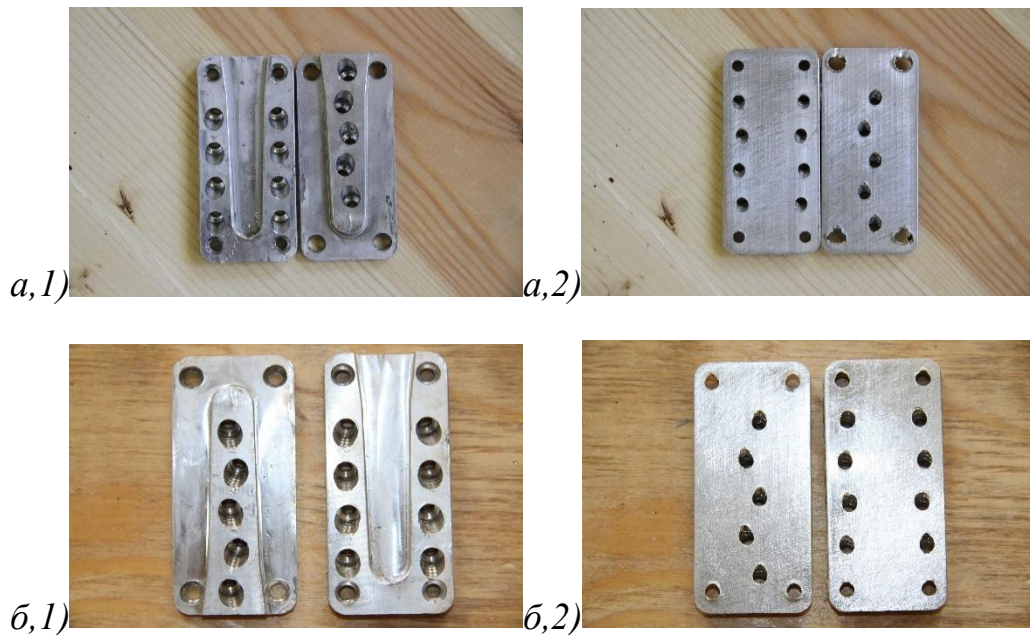


Рис. 3.23. Виды разрушения металлических накладок: *а,1-а,2)* для стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT*; *б,1-б,2)* для стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL*

Для расчётов и обработки результатов использовались программы *Microsoft Excel*, *Origin pro*, *IBM SPASS Statistics* и *Mathcad*. Экспериментальные результаты с точностью 0,11 Н представлены в табл. 3.7 в соответствии с зависимостью «нагрузка-перемещение» (рис. 3.24). В этом разделе были проведены 3

эксперимента (№. 1, 2 и 3), обозначения которых показаны в Приложении А.

Таблица 3.7.

Экспериментальные результаты определения несущей способности соединения на металлических накладках по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез

Эксперимент №.1			Эксперимент №.3			Эксперимент №.2		
$F_{v,test}$	$F_{v,теку}$	$F_{v,max}$	$F_{v,test}$	$F_{v,теку}$	$F_{v,max}$	$F_{v,test}$	$F_{v,теку}$	$F_{v,max}$
38377,45	5201,18	5220,61	37112,56	42084,32	46401,48	31164,43	36200,52	44076,96
$\omega_{CLT/LVL}$	19,09%							

Примечания: $\omega_{CLT/LVL}$ — приращение $F_{v,test,LVL}$ и $F_{v,test,CLT}$; $\omega_{CLT/LVL} = \frac{F_{v,test,CLT} - F_{v,test,LVL}}{F_{v,test,LVL}} \cdot 100\%$

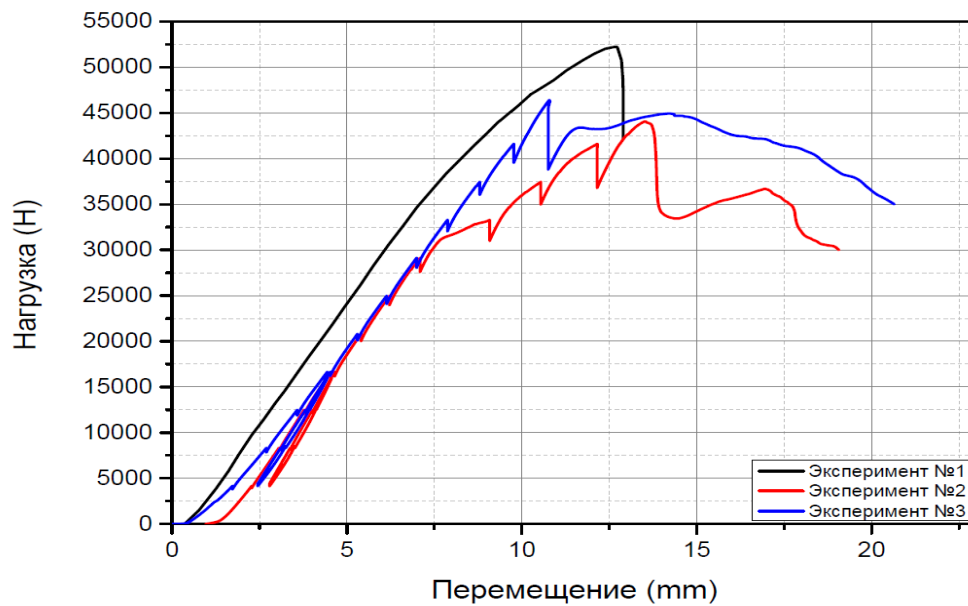


Рис. 3.24. Зависимость «нагрузка-перемещение» соединения на металлических накладках по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез: красная кривая— для балки из *LVL*; чёрная кривая— для балки из *CLT*; синяя кривая— для балки из *CLT*

Из рис. 3.24 видно, что экспериментальные результаты в конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* выше, чем балки из *LVL*. Она зависит от расположения, количества, несущей способности шурупа на выдергивание и срез в деревянных элементах под углом к волокнам в соответствии с данными из раздела. 3.3-3.4.

3.6. Экспериментальное исследование несущей способности соединения на металлических накладках с укреплением металлической зубчатой пластиной по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез

3.6.1. Оборудование

Экспериментальные исследования проводились в механической лаборатории СПбГАСУ с использованием универсальной испытательной машины *INSTRON* 5989 (см. 3.26), имеющей максимальный режим работы до 600, кН. Количество образцов испытаний составляло 2 шт. Температура в лаборатории 20 ± 1 °С, влажность материалов 13 %. Скорость нагружения при непрерывном увеличении нагрузки составляла 2 мм/мин. Режимы нагружения проведены в соответствии с разделом. 3.6.4.

3.6.2. Методика и результаты проведения эксперимента

Выполненный анализ состояния вопроса позволил сформулировать основные направления исследования, включая программу экспериментов.

Экспериментальные исследования были направлены на определение несущей способности соединения на металлических накладках с укреплением МЗП:

- в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез;
- в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL* по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез;

Расположение соединения на металлических накладках с укреплением МЗП в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* и *LVL* представлены на рис. 3.25-3.26. Установка опытных деревянных образцов на

экспериментальном стенде и проведение испытаний даны на рис. 3.27-3.28.

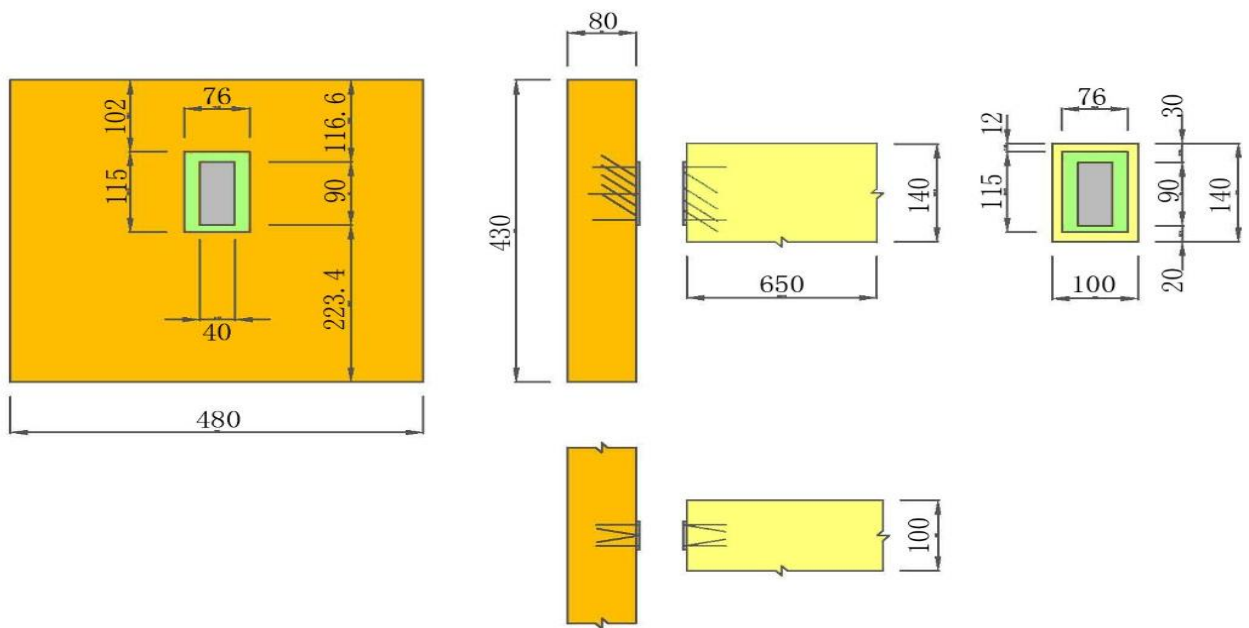


Рис. 3.25. Расположение соединения на металлических накладках в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* с укреплением МЗП (установка МЗП на зелёной зоне)

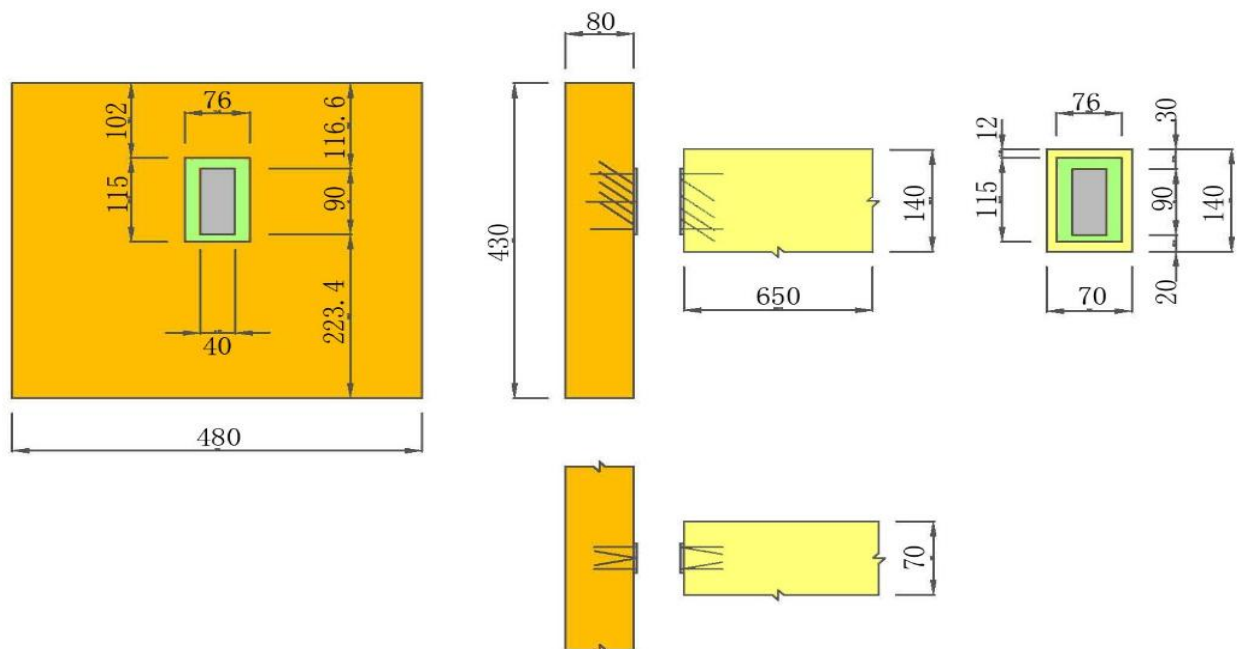


Рис. 3.26. Расположение соединения в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL* с укреплением МЗП

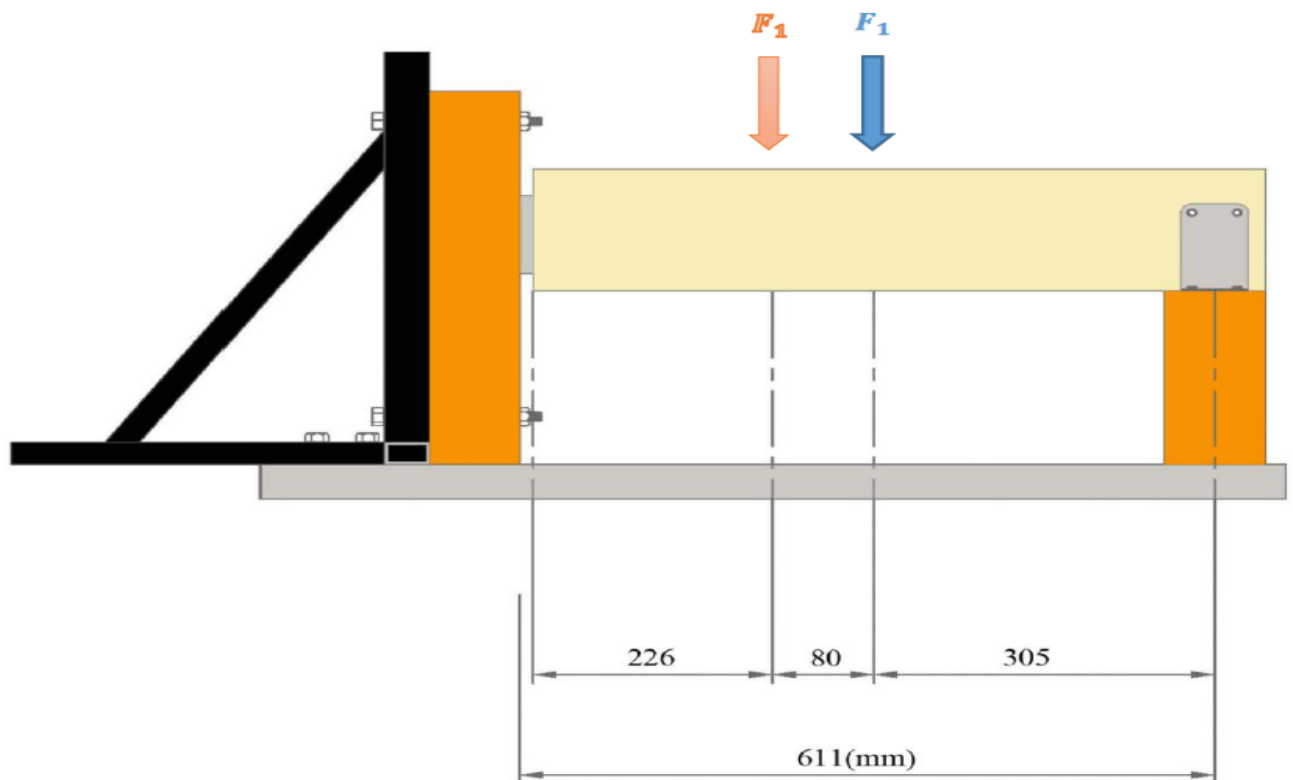


Рис. 3.27. Установка деревянных опытных образцов на экспериментальном стенде

Виды разрушения соединения, МЗП, металлических накладок и деревянных элементов на рис. 3.29-3.31 в соответствии с зависимостью «нагрузка-перемещение» (рис. 3.32).

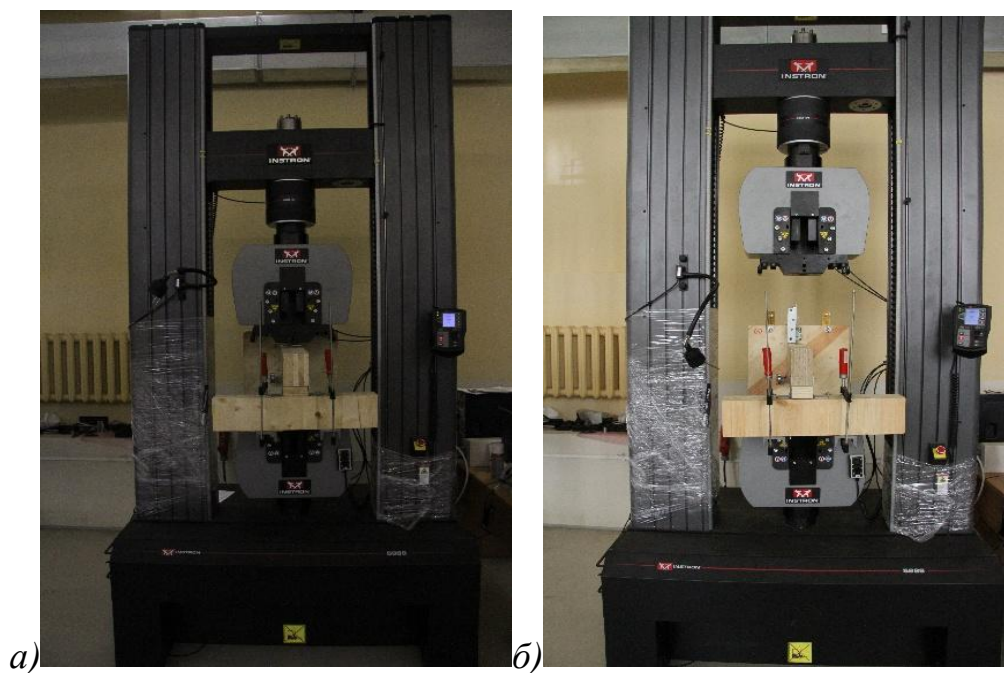


Рис. 3.28. Проведение испытаний: *а*— для стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT*; *б*— для стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL*

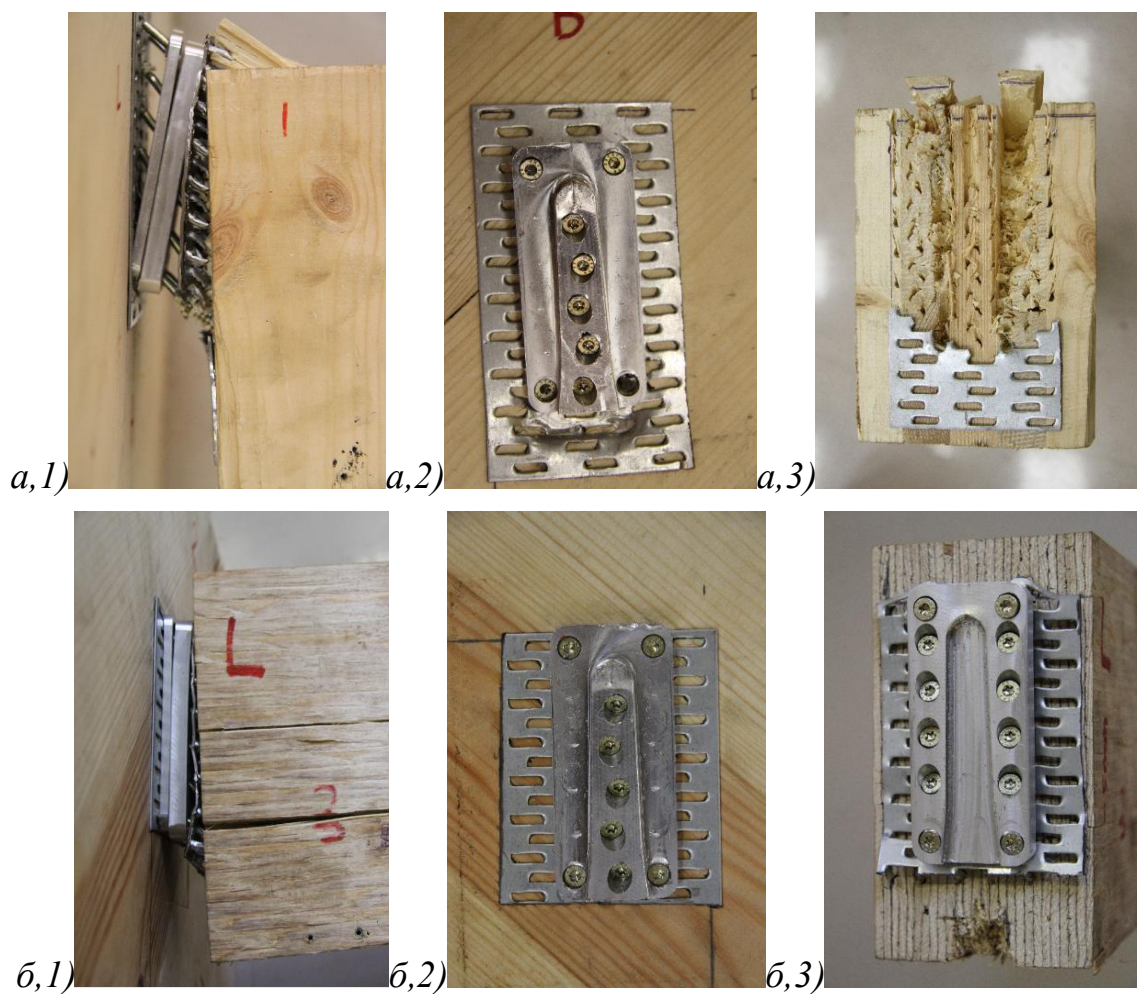


Рис. 3.29. Виды разрушения соединения на металлических накладках: *a,1)-a,3)* для стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT*; *б,1)-б,3)* для стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL*.

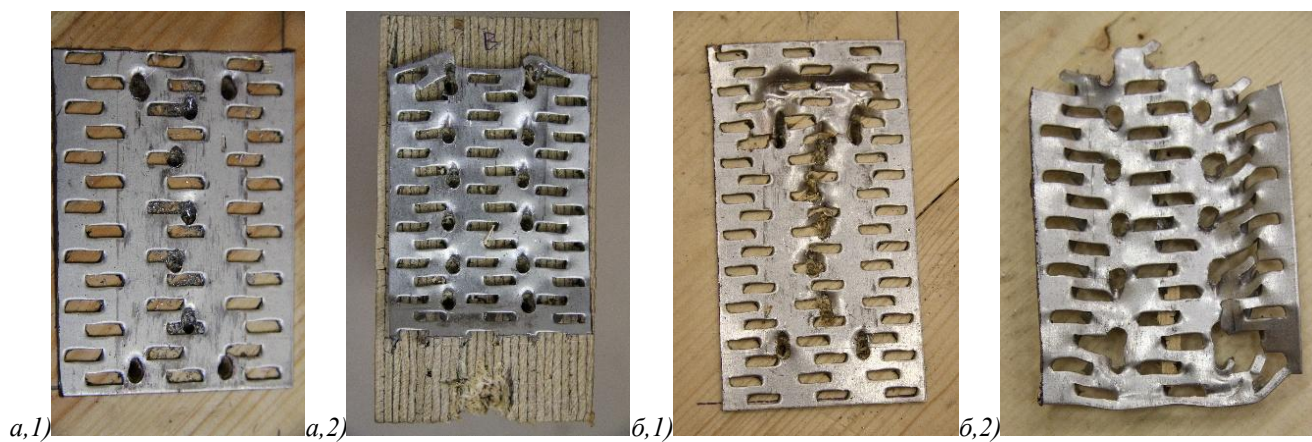


Рис. 3.30. Виды разрушения МЗП: *a,1-a,2)* для стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT*; *б,1 – б,2)* для стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL*

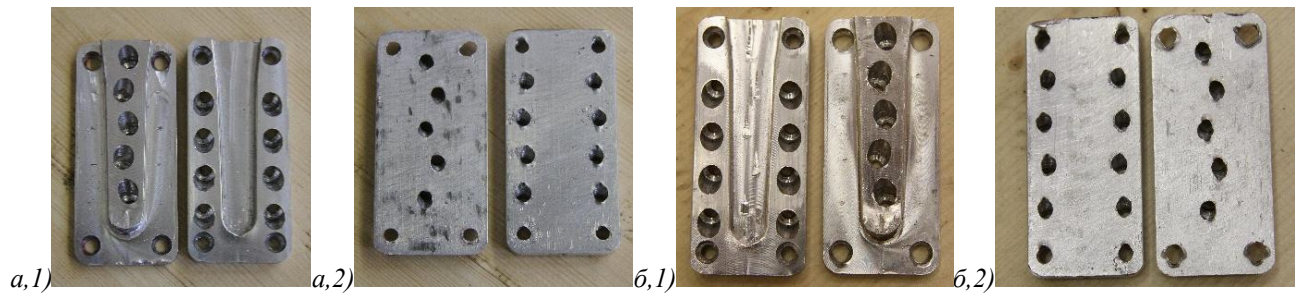


Рис. 3.31. Виды разрушения металлических накладок: *а, 1-а, 2)* для стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT*; *б, 1- б, 2)* для стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL*

Таблица 3.8

Экспериментальные результаты определения несущей способности соединения на металлических накладках с креплением МЗП

Для балки из <i>CLT</i>			Для балки из <i>LVL</i>		
$F_{v,test}$	$F_{v,теку}$	$F_{v,max}$	$F_{v,test}$	$F_{v,теку}$	$F_{v,max}$
46230,50	50082,45	57303,59	40882,69	45479,46	51989,80
$\omega_{CLT/LVL}$	13,08%				

Примечания: $\omega_{CLT/LVL}$ — приращение $F_{v,test,LVL}$ и $F_{v,test,CLT}$; ; $\omega_{CLT / LVL} = \frac{F_{v,test,CLT} - F_{v,test,LVL}}{F_{v,test,LVL}} \cdot 100\%$

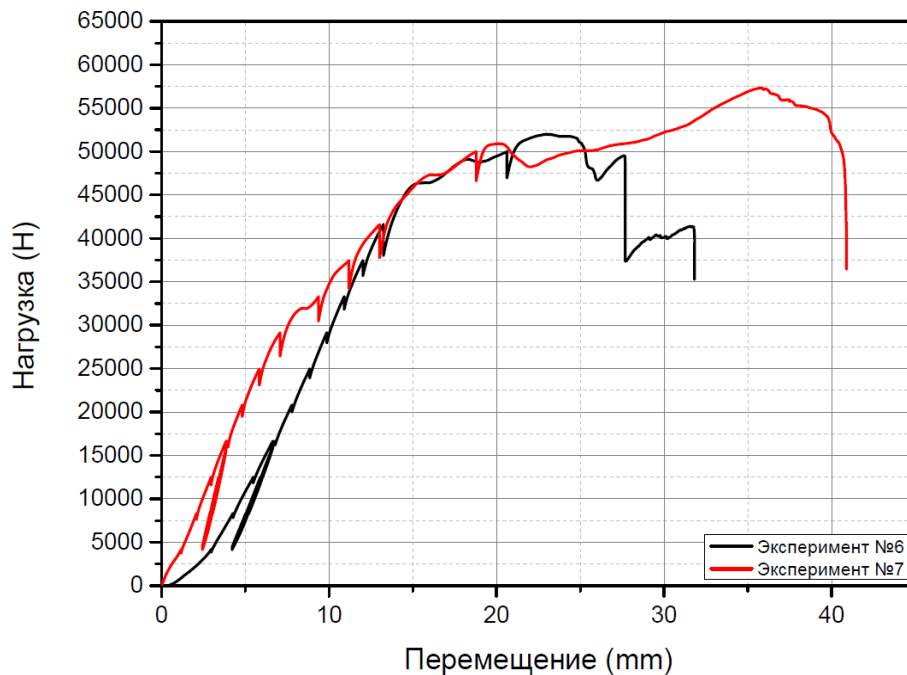


Рис. 3.32. Зависимость «нагрузка-перемещение» по определению несущей способности соединения на металлических накладках с укреплением МЗП в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT*: красная линия— с балкой из *CLT*; чёрная линия— с балкой из *LVL*

Из рис. 3.33 видно, что по аналогии с разделом 3.6 экспериментальные результаты для балки из *CLT* выше, чем балки из *LVL*. Это зависит от сопротивления шурупа на выдергивание и срез под углом к волокнам. Таким образом, с использованием МЗП можно повысить несущую способность соединения.

3.7. Экспериментальное исследование несущей способности соединения элементов деревянных конструкций на металлических накладках по сопротивлению шурупов на выдергивание

3.7.1. Оборудование

Экспериментальные исследования проводились в механической лаборатории СПбГАСУ с использованием универсальной испытательной машины *INSTRON* 5989 (см. 3.26), имеющей максимальный режим работы до 600, кН. Количество образцов испытаний составляло 2 шт. Температура в лаборатории 20 ± 1 °С, влажность материалов 13 %. Скорость нагружения при непрерывном увеличении нагрузки составляла 2 мм/мин.

3.7.2. Методика и результаты проведения эксперимента

Выполненный анализ состояния вопроса позволил сформулировать основные направления исследования, включая программу экспериментов.

Экспериментальные исследования были направлены на определение несущей способности соединения на металлических накладках по сопротивлению шурупов на выдергивание:

- в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT*;
- в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL*;

Проведение испытаний соединения на металлических накладках по сопротивлению шурупов на выдергивание в деревянных конструкциях даны на рис. 3.35 в соответствии с видами разрушения соединения (рис. 3.33).

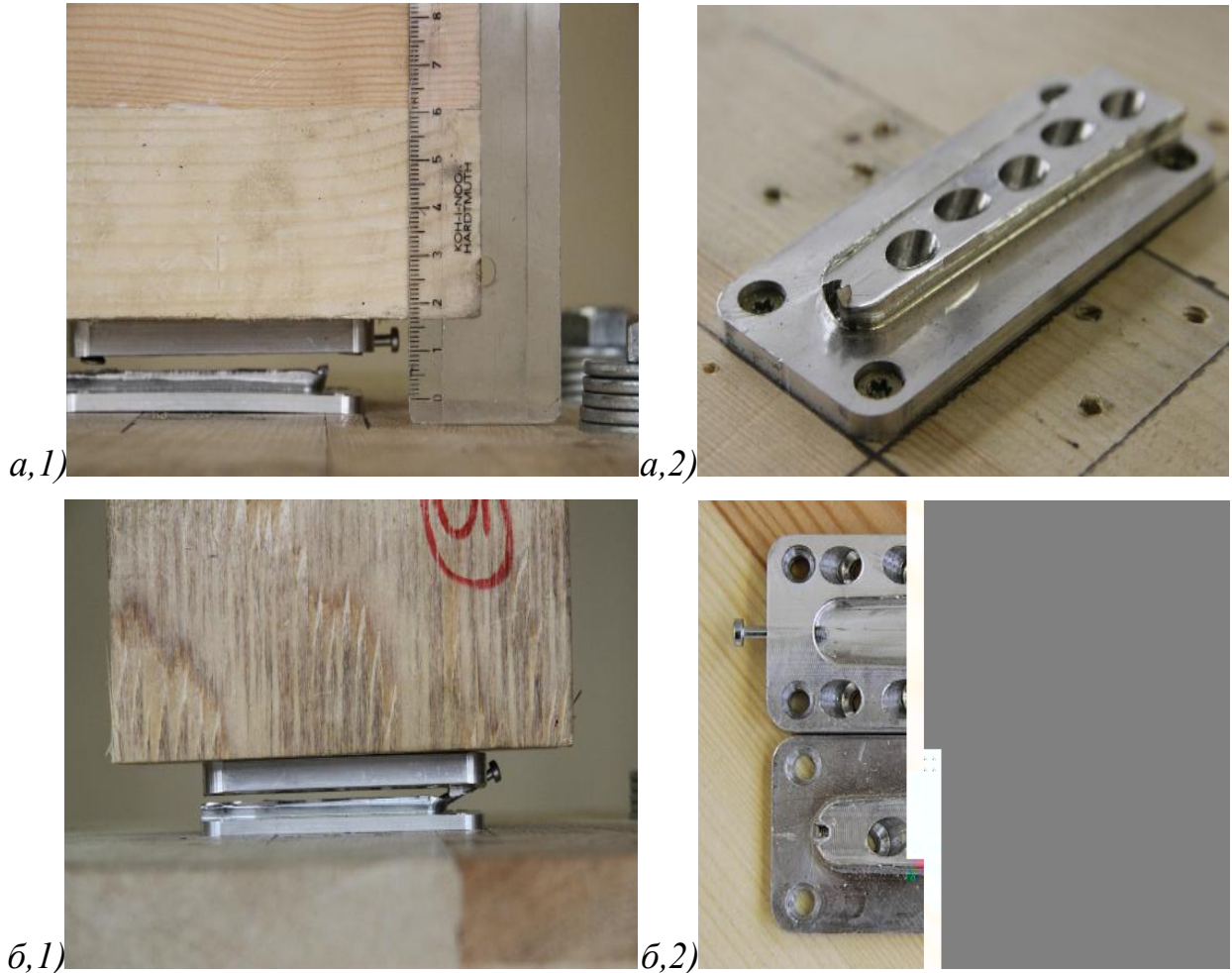


Рис. 3.33. Виды разрушения соединения на металлических накладках в деревянных конструкциях: *a,1)-a,2)* стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT*; *б,1)-б,2)* стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL*

Для расчётов и обработки результатов использовались программы *Microsoft Excel*, *Origin pro*, *IBM SPASS Statistics* и *Mathcad*. Экспериментальные результаты представлены в табл. 3.9 в соответствии с зависимостью «нагрузка-перемещение» (рис. 3.34).

Экспериментальные результаты определения несущей способности соединения на металлических накладках по сопротивлению шурупов на выдергивание

На балке из <i>CLT</i> для эксперимента №.5			На балке из <i>LVL</i> для эксперимента №.4		
$F_{ax,test}$	$F_{ax,теку}$	$F_{ax,max}$	$F_{ax,test}$	$F_{ax,теку}$	$F_{ax,max}$
11258,00	18370,61	18373,45	12714,60	16201,53	17601,23
$\omega_{LVL/CLT}$	12,94%				

Примечания: $\omega_{LVL/CLT}$ — приращение $F_{ax,test,LVL}$ и $F_{ax,test,CLT}$; $\omega_{LVL/CLT} = \frac{F_{ax,test,LVL} - F_{ax,test,CLT}}{F_{ax,test,CLT}} \cdot 100\%$

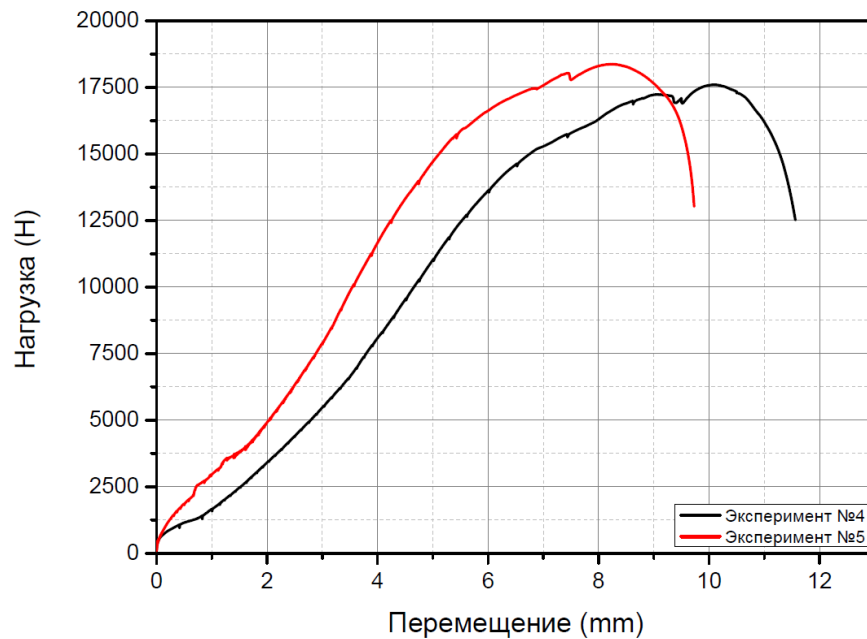


Рис. 3.34. Зависимость «нагрузка-перемещение» соединения на металлических накладках по сопротивлению шурупов на выдергивание в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT*: красная линия— с балкой из *CLT*; чёрная линия— с балкой из *LVL*

Из табл. 3.9 видно, что экспериментальные результаты в конструкции стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* ниже на 12,94%, чем стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL*. Материал алюминий для металлических накладок типа *SHERPA* использован как *EN 6082* [94], а его прочность может быть определена в соответствии с *BS EN 755-2:2008* [89]. С учётом контактной площади между

выступами двух металлических накладок несущая способность металлических накладок на растяжение составляет 6824,68 Н. В свою очередь, контактная площадь выступов и прочность металлических накладок на растяжение наиболее влияют на надёжность и жесткость соединения в целом.

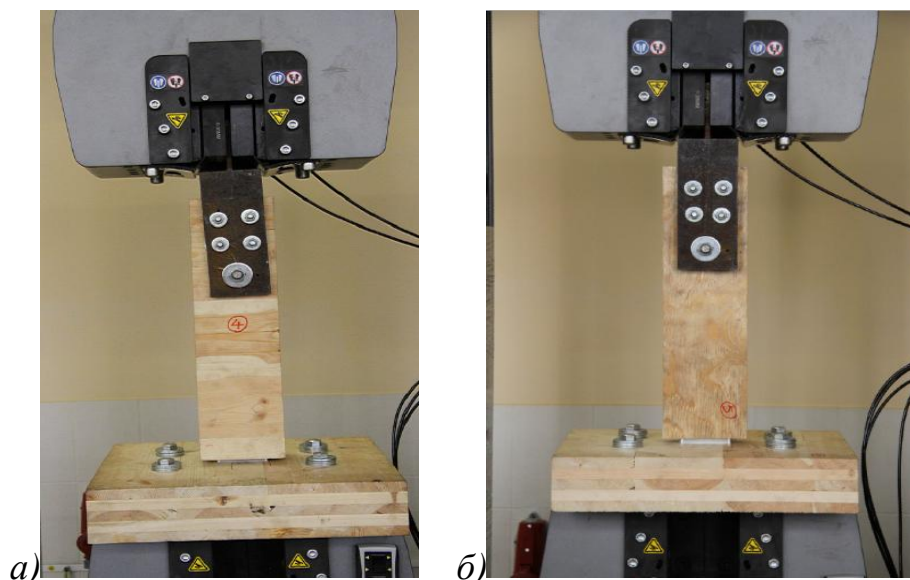


Рис. 3.33. Проведение испытаний соединения в конструкциях: *а*— стеновой панели и балки из *CLT*; *б*— стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL*

3.8. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния деревянных элементов с металлическими накладками

3.8.1. Оборудование

Измерены деформация и напряжения с использованием тензометрических преобразователей с базой 3 мм и номинальным сопротивлением 99,6 Ом. Измерения сигналов датчиков производились на измерительно-вычислительном комплексе (ИВК) *Tokyo Sokki Kenkyujo Co*, который приведен на рис. 3.36, *а*. С целью получения экспериментальных результатов, испытания проводились в механической лаборатории СПбГАСУ с использованием универсальной

испытательной машины *INSTRON 5969*, имеющей максимальный режим работы до 50 кН (рис. 3.36, б). Количество образцов испытаний составляло 3 шт. Температура в лаборатории 20 ± 1 °С, влажность материалов 13 %. Скорость нагружения при непрерывном увеличении нагрузки составляла 2 мм/мин.

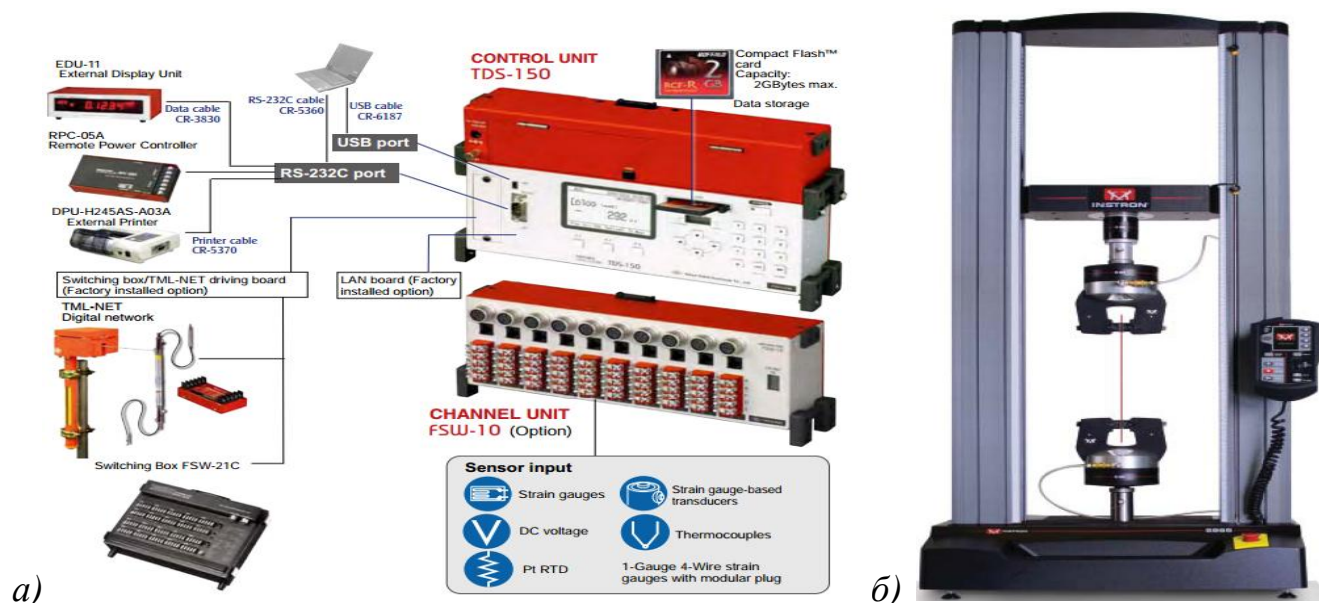


Рис.3.36. Схема экспериментальных инструментов:

а— измерительно-вычислительный комплекс (ИБК) *Tokyo Sokki Kenkyujo Co*;

б— универсальная испытательная машина *INSTRON 5969*

3.8.2. Методика и результаты проведения эксперимента

Выполненный анализ состояния вопроса позволил сформулировать основные направления исследования, включая программу экспериментов.

Экспериментальные исследования были направлены на:

- определение максимального нормального тензора деформации;
- определение минимального нормального тензора деформации;
- определение максимального нормального главного напряжения;
- определение минимального главного напряжения;

- определение минимального напряжения сдвига;
- определение максимальной деформации сдвига;
- определение угла α между осью тензодатчика и направлением главных деформаций;
- определение зависимости тензора деформации от главного напряжения;
- сравнение распределения тензора напряжения и деформации в балке из *CLT* и *LVL*;
- сравнение распределения тензора напряжения и деформации на металлических накладках;

3.8.3. Установка тензодатчиков

Для определения деформаций и напряжений соединения используются розетки, составленные из отдельных тензодатчиков под углами 0° , 45° , 90° к волокнам. Применение такого вида расстановки тензодатчиков позволяет определить вектор главных деформаций. Расположение тензодатчиков на элементах деревянных конструкций стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* и *LVL* даны на рис. 3.37-3.38.

С использованием данных уравнений из табл. 2.3 в разделе. 2 максимальные, минимальные деформации, деформации сдвига и углы между направлениями измерений и максимальной деформации участка около крепежа в стеновой панели из *CLT* даны в табл. 3. Аналогичные результаты для алюминиевой накладки, которая крепится к стеновой панели из *CLT* представлены в табл. 3.11. Сравнение деформаций и напряжений в балке из *CLT* и *LVL* при нагружении до 40 кН даны в

табл. 3.12 в соответствии с деформациями и напряжениями на металлических накладках (табл. 3.13).

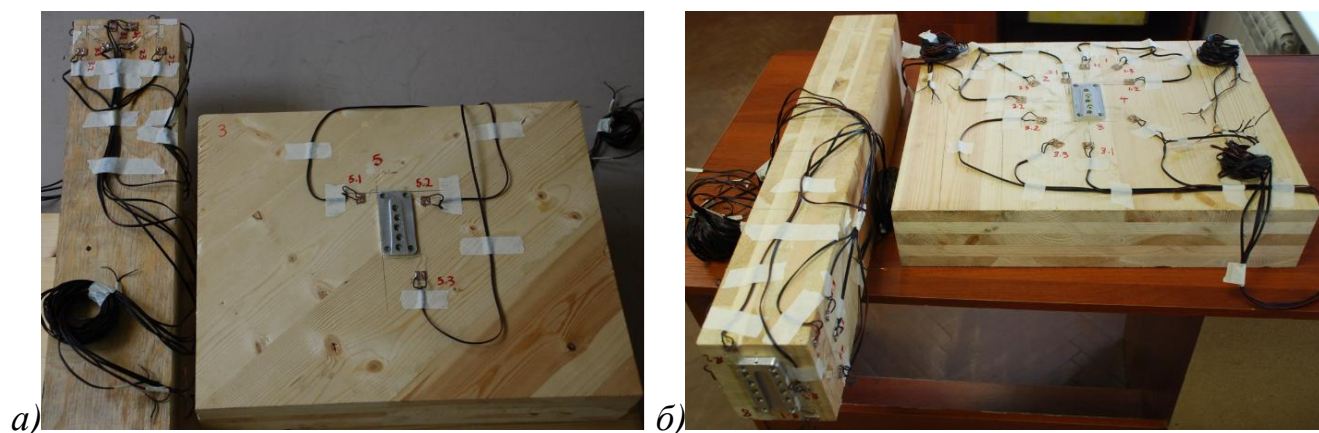


Рис. 3.37. Расположение тензорезисторов на элементах деревянных конструкций:

a— стеновой панели и балки из *CLT*; *б*— стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL*

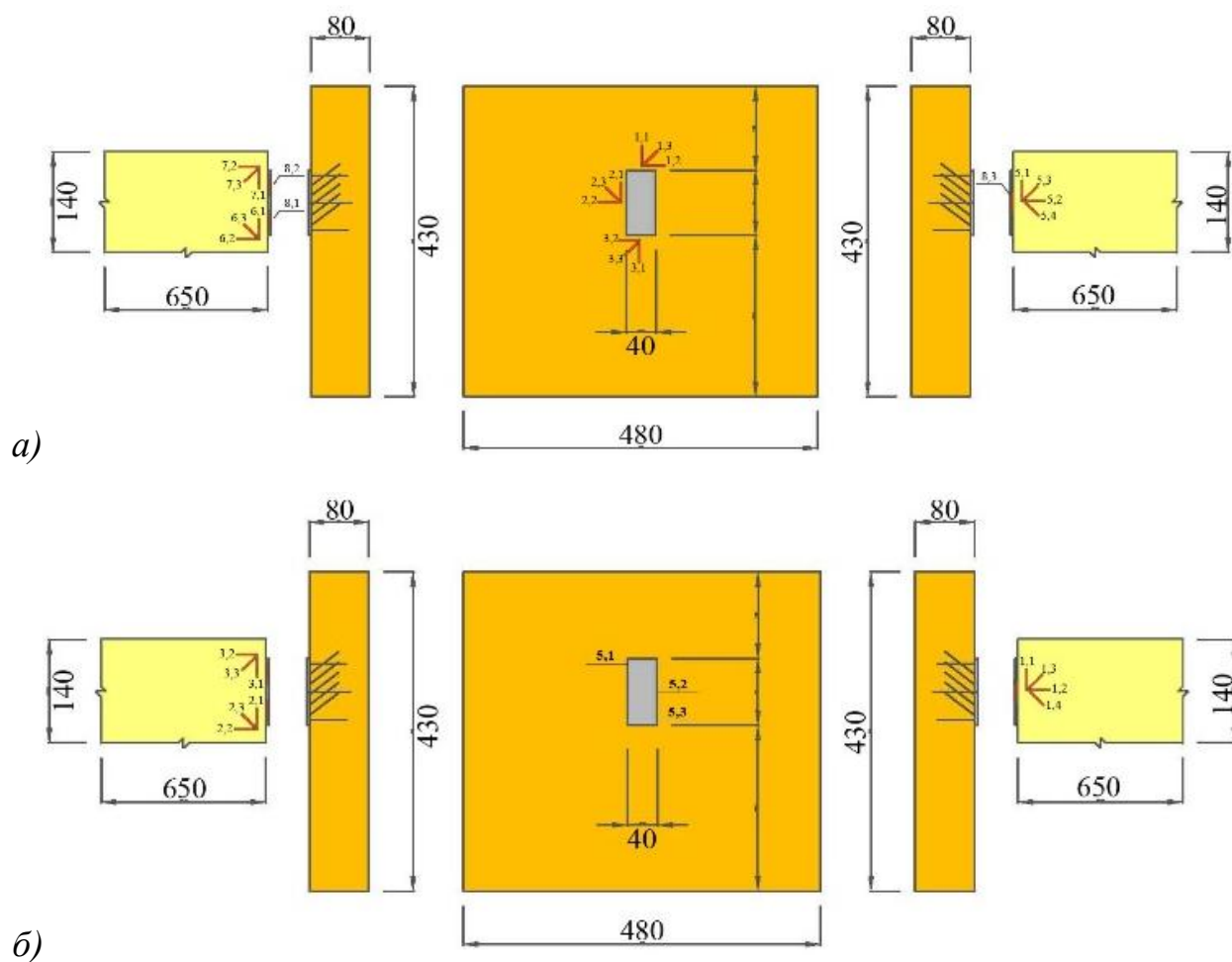


Рис. 3.38. Расположение тензодатчиков на элементах деревянных конструкций: *a*— стеновой панели и балки из *CLT*; *б*— стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL*

Напряжение и деформация на стеновой панели из CLT

Расположение	Верхний пояс	Средний пояс	Нижний пояс
Шифр	П1-CLT	C2-CLT	C3-CLT
$\varepsilon_{\max}$, 10^{-6} мм/мм	1349,00	-164,07	1626,00
$\varepsilon_{\min}$, 10^{-6} мм/мм	620,22	-2965,00	-1433,00
$\tau_{\max}$, 10^{-6} мм/мм	1047,00	1632,00	1031,00
$\sigma_{\max}$, МПа	20,41	-18,79	12,31
$\sigma_{\min}$, МПа	15,39	-38,10	-8,80
$\tau_{\max}$, 10^{-6} мм/мм;	3,61	5,63	3,56
$\sigma_{\max}$, МПа	1349,00	-164,07	1626,00
α	83,71	54,66	66,06

Из табл. 3.10 видно, что вдоль направления главной деформации возникает относительно высокое растягивающее напряжение на верхнем и нижнем поясе стеновой панели из CLT, а на среднем поясе сжимающее напряжение. При этом, в свою очередь, будет приводить к расслоению в середине стеновой панели из CLT около металлических накладок.

Таблица 3.11

Напряжение и деформация на металлической накладке, которая крепится к стеновой панели из CLT

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

Из табл. 3.11 видно, что на верхнем поясе алюминиевой накладки возникает растягивающее напряжение, а на среднем и нижнем поясе сжимающее напряжение.

Из табл. 3.12 видно, что верхний и средний пояс балки возникает растягивающее напряжение, а нижний пояс сжимающее напряжение. После сравнения результатов видно, что при нагружении до 40 кН балка из LVL подвергается напряжениями более высоким, чем балка из CLT. В данной

диссертационной работе установлено, что несущая способность соединения на металлических накладках по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез при балке из *CLT* составляет 38377,45 Н, выше на 23,15%, чем при балке из *LVL* (31164,43 кН). Следовательно, экспериментальные результаты с удовлетворительной точностью описывают предложенную расчётную методику в соответствии с литературой [54].

Таблица 3.12

Сравнение экспериментальных результатов определения напряжения и деформации 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
$\varepsilon_{\max}$, 10^{-6} мм/мм	530,36	1650,00	837,43	2611,00	358,61	47,59
$\varepsilon_{\min}$, 10^{-6} мм/мм	-147,36	-40,47	-507,43	-270,61	-1489,00	-1619,00
$\tau_{\max}$, 10^{-6} МПа	288,29	864,07	682,25	1453,00	776,05	881,71
$\sigma_{\max}$, МПа	5,82	20,47	7,64	31,21	-3,90	-8,54
$\sigma_{\min}$, МПа	1,15	8,81	-1,64	11,34	-16,64	-20,03
$\tau_{\max}$, 10^{-6} МПа	0,99	2,98	2,35	5,01	2,68	3,04
$\sigma_{\max}$, МПа	1,13	0,98	0,09	1,11	0,48	0,54
α	64,74	55,92	5,04	63,37	27,39	30,65
σ_x	9,051	13,573	0	0	-9,051	-13,573
$\omega(100\%)$	55,52%	-33,69%	1	1	132,08%	58,93%

Примечание: h — высота поперечного сечения балки, мм; $h=140$, мм;

σ_x — напряжение вдоль балки в соответствии с [50], МПа; $\sigma_x = \frac{M \cdot y}{J_z}$;

M — изгибающий момент, $H \cdot мм$; ω — приращение; $\omega = \frac{\sigma_x - \sigma_{\max}}{\sigma_{\max}} \cdot 100\%$;

J_z — момент инерции поперечного сечения, $мм^4$; 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;

y — координата, определяющая вертикальное положение в поперечном сечении, мм;

Таблица 3.13

Сравнение экспериментальных результатов определения напряжения и деформации 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
$\varepsilon_{\max}$, 10^{-6} мм/мм;	-195,00	1385,00	755,00	465,00	-92,00	-259,00
$\sigma_{\max}$, МПа;	-13,65	96,95	52,85	32,55	-6,44	-18,13

Из табл. 3.13 видно, что на верхнем и нижнем поясе металлической накладки, которая крепится к балке из *CLT*, возникает сжимающее напряжение, на среднем поясе растягивающее, а также на верхнем и среднем поясе то же, самое в балке из *LVL* возникает растягивающее напряжение, а на нижнем поясе сжимающее. По аналогии с результатами из табл. 3.13 деформации и напряжения в балке из *LVL* выше, чем в балке из *CLT*.

3.9. Выводы по главе

1. Плотность деревянных опытных образцов из *CLT* составила 495 кг/м³ и образцов из *LVL* 560 кг/м³;
2. В результате испытания определения несущая способность шурупа на выдергивание можно сделать вывод о том, что в зависимости от направления волокон и физико-механических характеристик деревянных элементов экспериментальные результаты на выдергивание шурупов на широкой стороне стеновой панели *CLT* выше, чем на узкой стороне, ниже, чем вдоль волокон *LVL*. В свою очередь, приведет к различию несущей способности соединения на металлических накладках, которые отдельно крепятся к стеновой панели и балке;
3. На основании экспериментальных результатов определения несущей способности односрезного шурупа с металлической накладкой в деревянных элементах из *CLT* и *LVL* можно сделать вывод о том, что направление волокон и физико-механические характеристики деревянных элементов наиболее влияют на несущую способность соединения. С использованием наклонных шурупов можно повысить несущую способность соединения;

4. Экспериментально получены новые опытные данные определения несущей способности односрезного шурупа на металлической накладке с укреплением МЗП в деревянных элементах из *CLT* и *LVL*. Показано, что в зависимости от угла между осью шурупа и волокнами, физико-механических и геометрических характеристик деревянных материалов с укреплением МЗП можно повысить несущую способность соединения;

5. В результате экспериментов по определению несущей способности соединения на металлических накладках в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* и *LVL* по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез можно сделать вывод о том, что несущая способность соединения на металлических накладках для комбинации стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* выше, чем балки из *LVL*. Она зависит от расположения, количества, сопротивления шурупа на выдергивание и срез в деревянных элементах под углом к волокнам;

6. В зависимости от экспериментальных результатов определения несущей способности соединения на металлических накладках без укрепления и с МЗП по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез можно сделать вывод о том, что несущая способность соединения на металлических накладках в комбинации стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* выше, чем балки из *LVL*;

7. Экспериментально получены результаты несущей способности соединения на металлических накладках по сопротивлению шурупов на выдергивание в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* и *LVL*. Показано, что несущая способность соединения по сопротивлению шурупов на выдергивание в комбинации стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* ниже на

12,94%, чем в комбинации стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL*. Контактная площадь на растяжение, и прочность металлических накладок на сжатие наиболее влияют на надёжность и жесткость соединения в целом;

8. Результаты испытания по определению напряженно-деформированного состояния металлических накладок и деревянных элементов из *CLT* и *LVL* на основе механики упругости с использованием тензодатчиков с удовлетворительной точностью описывают предложенную расчётную методику;

ГЛАВА 4. СРАВНЕНИЕ РАСЧЁТНЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ С ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМИ ДАННЫМИ

Проведение сравнительного анализа может оценить достоверность и степень соответствия между экспериментальными результатами и предложенными математическими моделями. Для обеспечения корректности сопоставления обоих результатов были проведено построение трехмерных моделей и статические расчёты напряженно-деформированного состояния соединения на металлических накладках по МКЭ с использованием программы *Ansys 15.0* [107, 108].

4.1. Сравнение результатов экспериментального и аналитического исследования несущей способности шурупа на основе различных норм и моделей

4.1.1. На выдергивание из деревянных элементов из поперечно-клеёной древесины и бруса из клееного шпона

В разделах. 2.2 и 3.3 отдельно были проведены аналитические и экспериментальные исследования несущей способности шурупа на выдергивание в зависимости от плотности материалов, эффективной длины и наружного диаметра резьбы шурупа. Сравнение экспериментальных и расчётных результатов определения несущей способности шурупа на выдергивание по различным нормам и научным исследованиям показаны в табл. 4.1 в соответствии с графиками на рис. 4.1- 4.2.

Для того, чтобы получить оптимальную формулу, отличие между экспериментальными и расчётными данными является минимальным. Из рис. 4.1 и 4.2 видно, что расчётные результаты по модели от *Frese* для *CLT* и по модели от нормы *SIA 265:2003* для *LVL* достаточно близки к экспериментальным. На основе большинства научных экспериментальных исследований автор рекомендует, что при расчёте несущей способности шурупа на выдергивание из деревянных элементов из *CLT* и *LVL* можно принять модель от *Frese* и модель от нормы *SIA 265:2003* в практике.

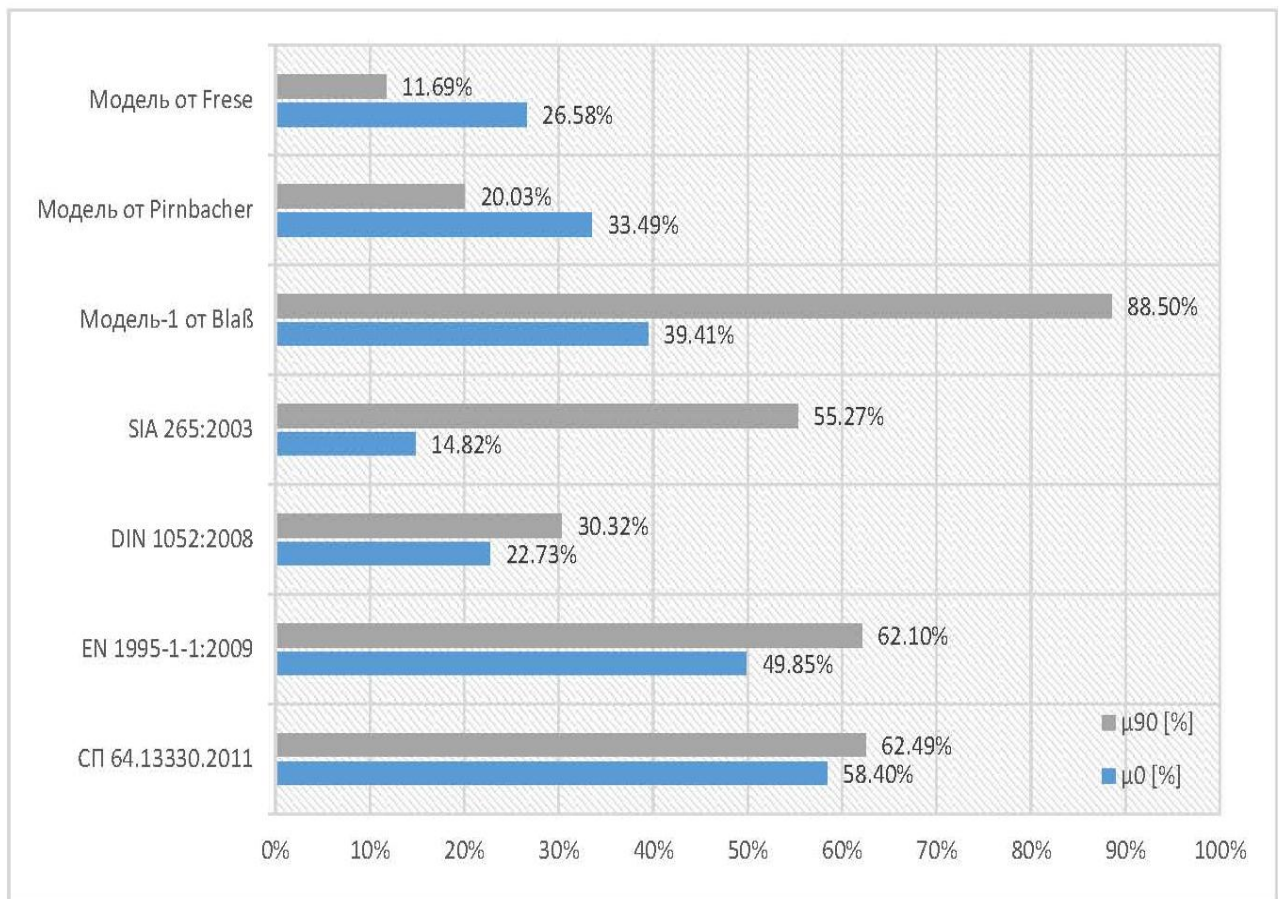


Рис. 4.1. Сравнение экспериментальных и расчётных результатов определения несущей способности шурупа на выдергивание из деревянных элементов из поперечной клееной древесины

Сравнение экспериментальных и расчётных результатов определения несущей способности шурупа на выдергивание

Наименование	$F_{ax,0, Rk, clt}$, Н	ω_0 , %	$F_{ax,90, Rk, clt}$, Н	ω_{90} , %	$F_{ax,0, Rk, lvl}$, Н	ω_0 , %
$F_{ax, test}$, Н	1427	—	1583	—	1874	—
СП 64.13330.2011	594	58 %	594	62 %	594	68 %
ÖNORM EN 1995-1-1:2009	2139	50 %	2566	62 %	2361	26 %
DIN 1052:2008	1103	23 %	1103	30 %	1411	25 %
SIA 265:2003	1639	15 %	2458	55 %	1854	1 %
Модель от <i>H. J. Blaß</i>	1990	39 %	2984	89 %	1990	6 %
Модель от <i>Pirnbacher</i>	949,349	33%	1266	20%	1074	43%
Модель от <i>Frese</i>	1048	27 %	1398	12 %	1186	37 %

Примечание: $F_{ax,0, Rk}$ — несущая способность шурупа на выдергивание вдоль волокон, Н; $F_{ax,90, Rk}$ — то же поперек волокон, Н; $\omega_{0/90}$ — приращение; $\omega_{0/90} = \frac{F_{ax,0,Rk} - F_{ax,test}}{F_{ax,test}} \cdot 100\%$

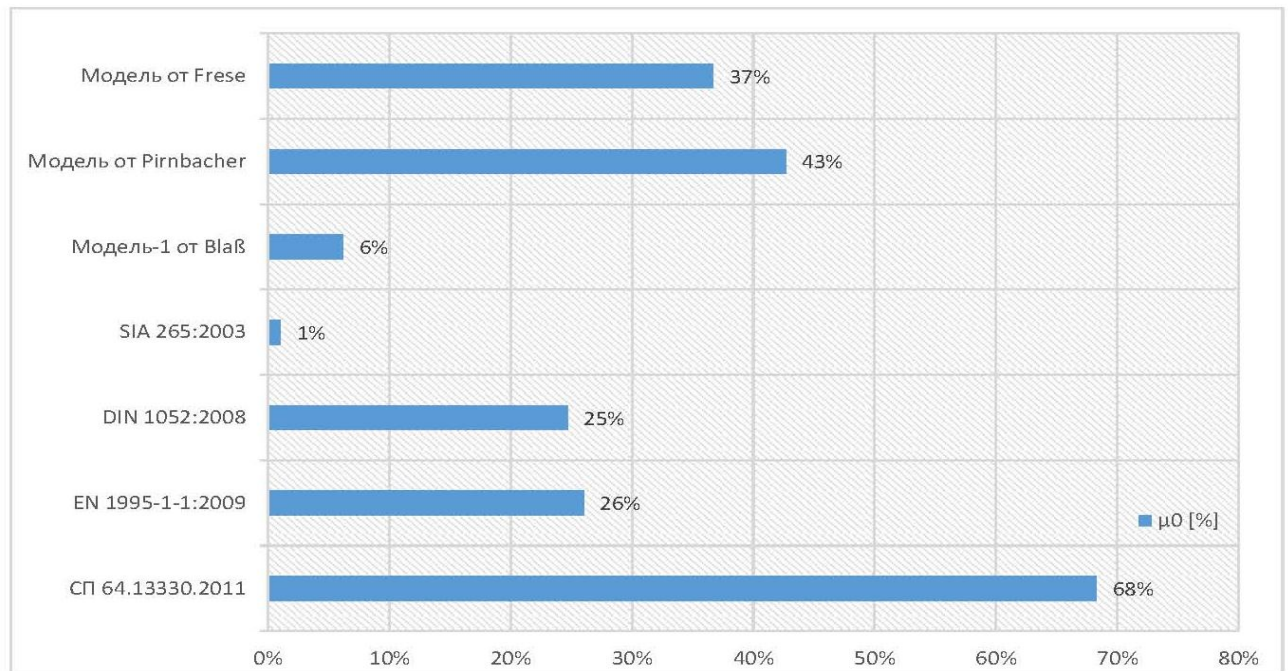


Рис. 4.2. Сравнение экспериментальных и расчётных результатов определения несущей способности шурупа на выдергивание из деревянных элементов из LVL

4.1.2. На срез в деревянных элементах из поперечно-клеёной древесины и бруса из клееного шпона с металлическими накладками

В разделе. 2.3 и 3.4 отдельно были проведены аналитические и

экспериментальные исследования несущей способности односрезного шурупа в соединениях деревянных элементов из *CLT* и *LVL* на металлической накладке. В соответствии с формулами из табл. 2.1 и 2.2 видно, что каждая прочность при смятии в гнезде древесины под шурупы имеет соответствующее сопротивление шурупа при изгибе по различным нормам и научным исследованиям. Такое сочетание основано на местной специфике и оптимизация выполнена в Приложении Б. Толщина металлической накладки выше, чем 0,5 диаметра шурупа, поэтому с учётом требования [68] в практике должна применяться модель односрезного шурупа с толстой металлической накладкой. С использованием предложенных уравнений из раздела. 2.3 сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности односрезного шурупа с толстой металлической пластиной в деревянных элементах из *CLT* и *LVL* представлено на рис. 4.3-4.10.

Из рис. 4.3- 4.6 видно, что с использованием предложенных уравнений для определения прочности шурупа при изгибе и прочности при смятии в гнезде древесины под шурупы в соответствии с *DIN 7998* и СП 64. 13330. 2011 расчетные результаты в деревянных элементах из *CLT* по модели от *Blass. Hans Joachim u Laskewitz Bernd* близки к экспериментальным (отклонение не более 1%). Следовательно, видно, что при расчёте несущей способности односрезного шурупа в деревянных элементах из *CLT* можно принять нормы *DIN 1052:2004*, СП 64. 13330. 2011 с моделью *Blass. Hans Joachim u Laskewitz Bernd* в практике . Из рис. 4.7-4.10 по аналогичной методике автор рекомендует в деревянных элементах из

LVL использовать в практике нормы *DIN 1052:2004*, СП 64. 13330. 2011 с моделью *Blass. Hans Joachim u Laskewitz Bernd*.

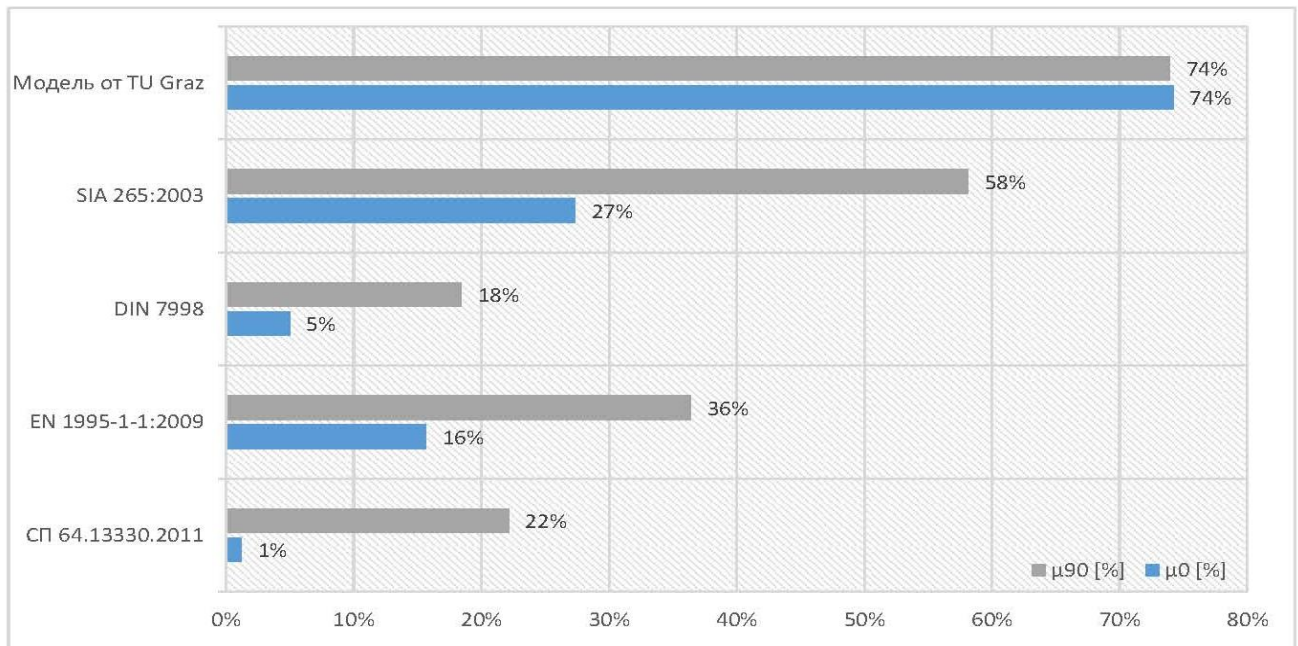


Рис. 4.3. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности шурупа при изгибе в деревянных элементах из *CLT* в соответствии с моделью от *Blass. Hans Joachim u Laskewitz. Bernd*

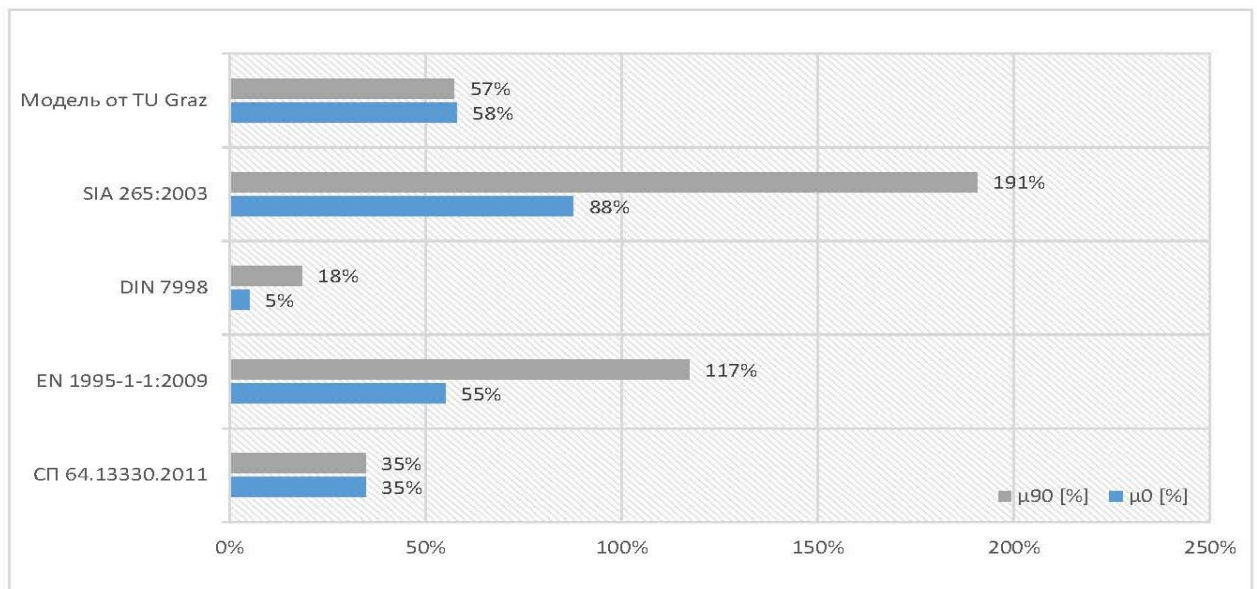


Рис. 4.4. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности шурупа при изгибе в деревянных элементах из *CLT* в соответствии с китайской моделью

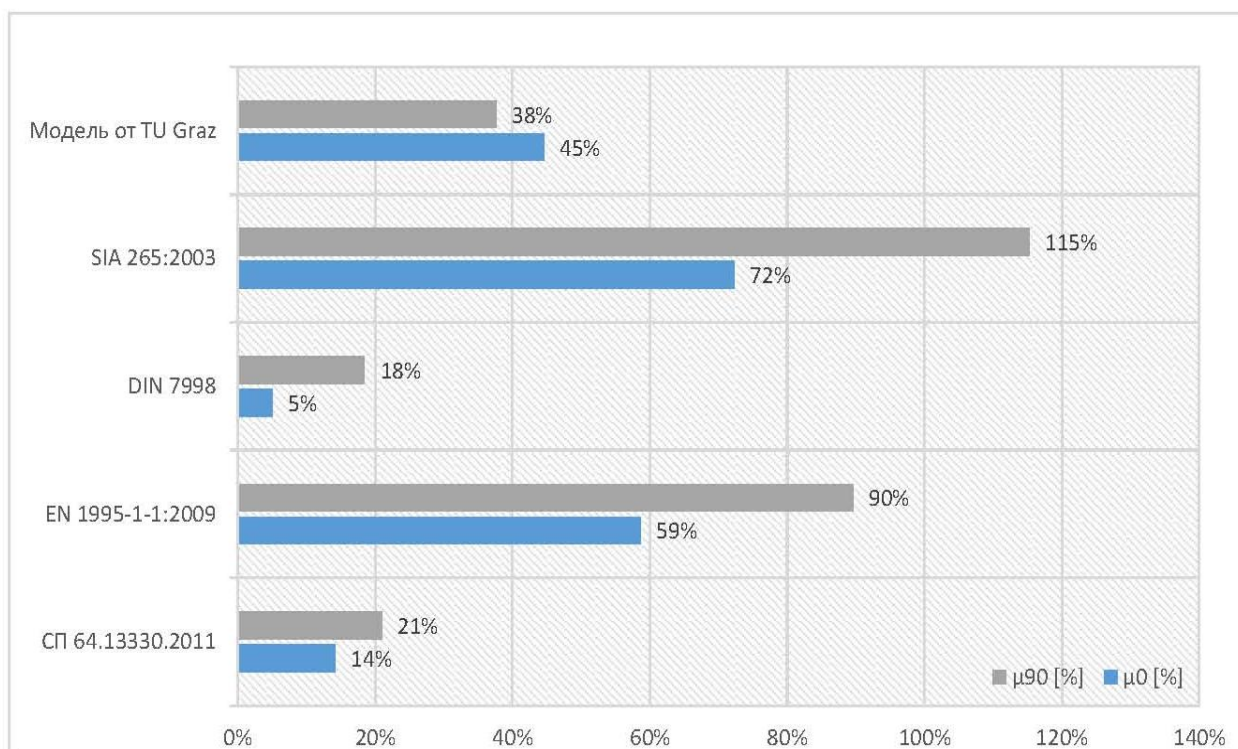


Рис. 4.5. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности шурупа при изгибе в деревянных элементах из *CLT* в соответствии с *EN 1995-1-1:2009*

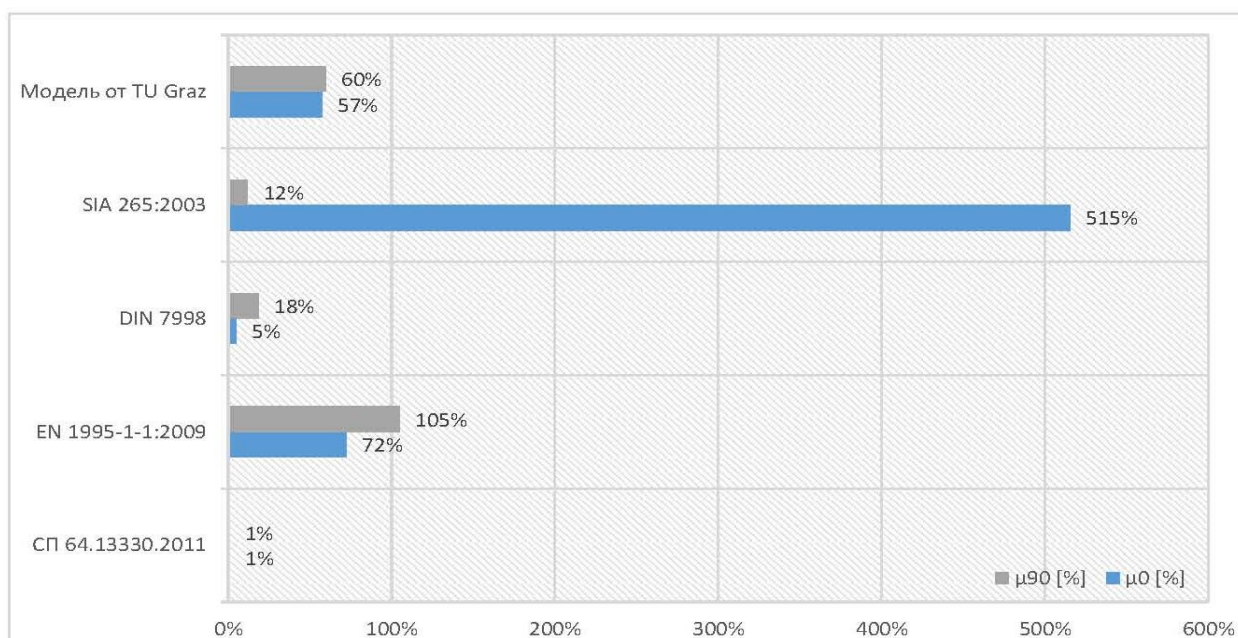


Рис. 4.6. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности шурупа при изгибе в деревянных элементах из *CLT* в соответствии с моделью от В. В. Пуртова и А. В. Павлика

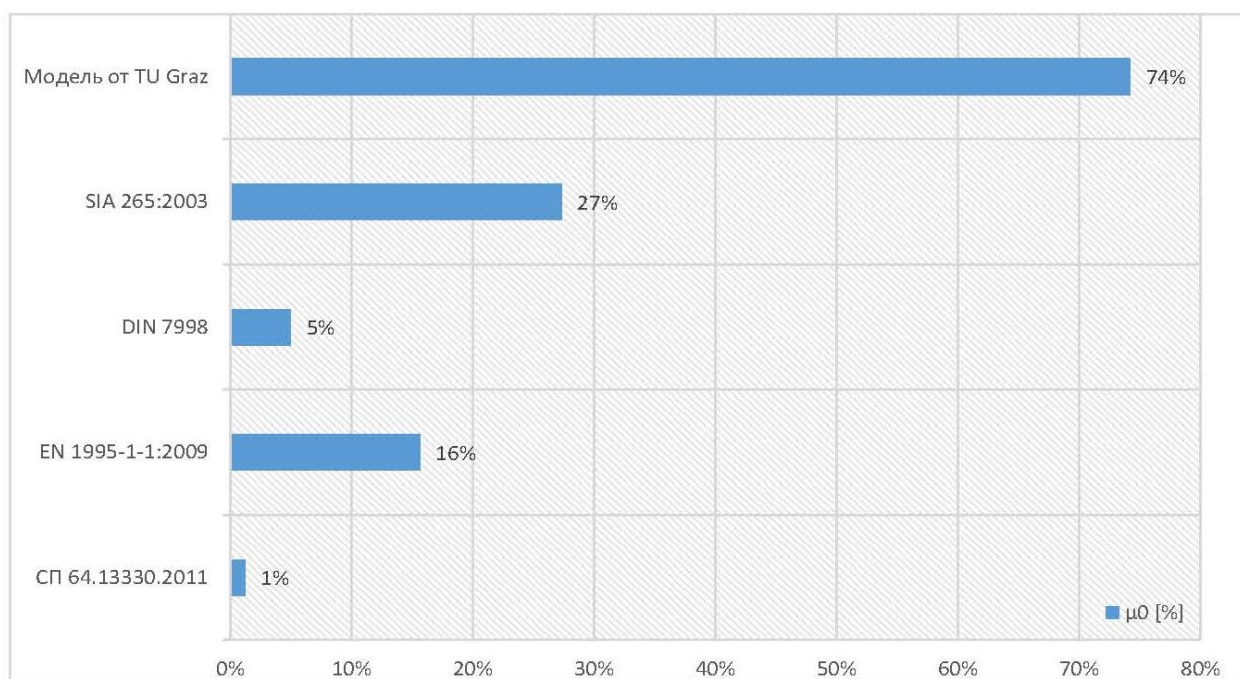


Рис. 4.7. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности шурупа при изгибе в деревянных элементах из *LVL* в соответствии с моделью от *Blass. Hans Joachim u Laskewitz. Bernd*

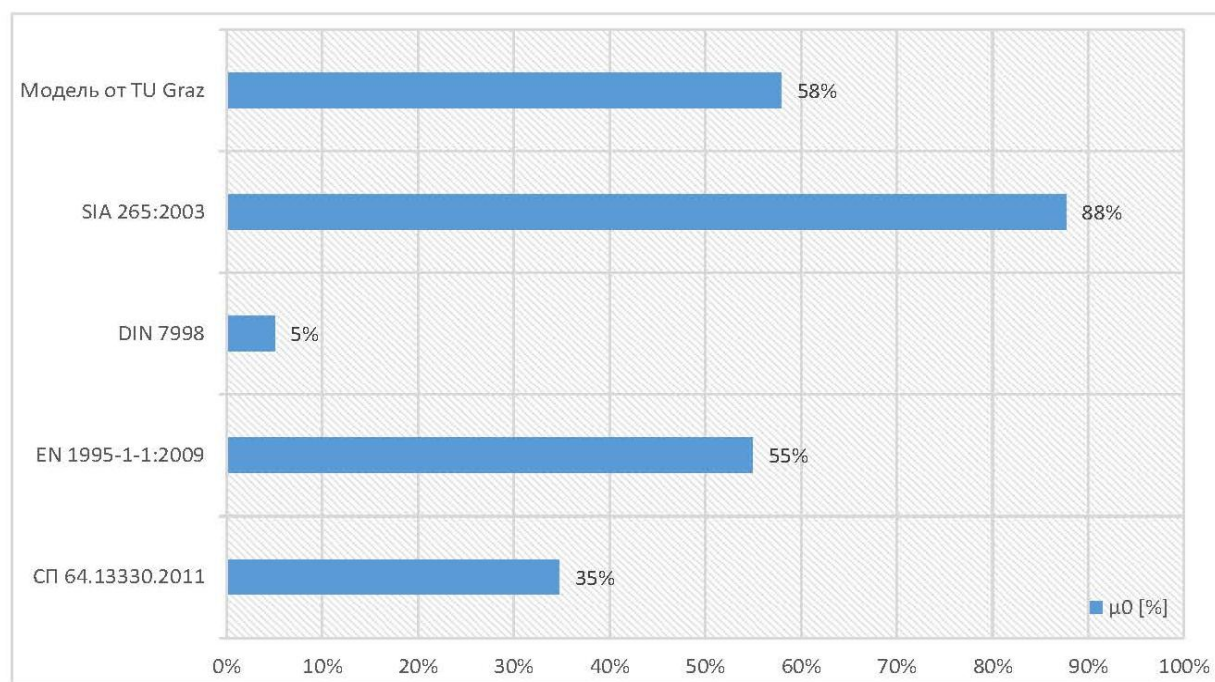


Рис. 4.8. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности шурупа при изгибе в деревянных элементах из *LVL* в соответствии с китайской моделью

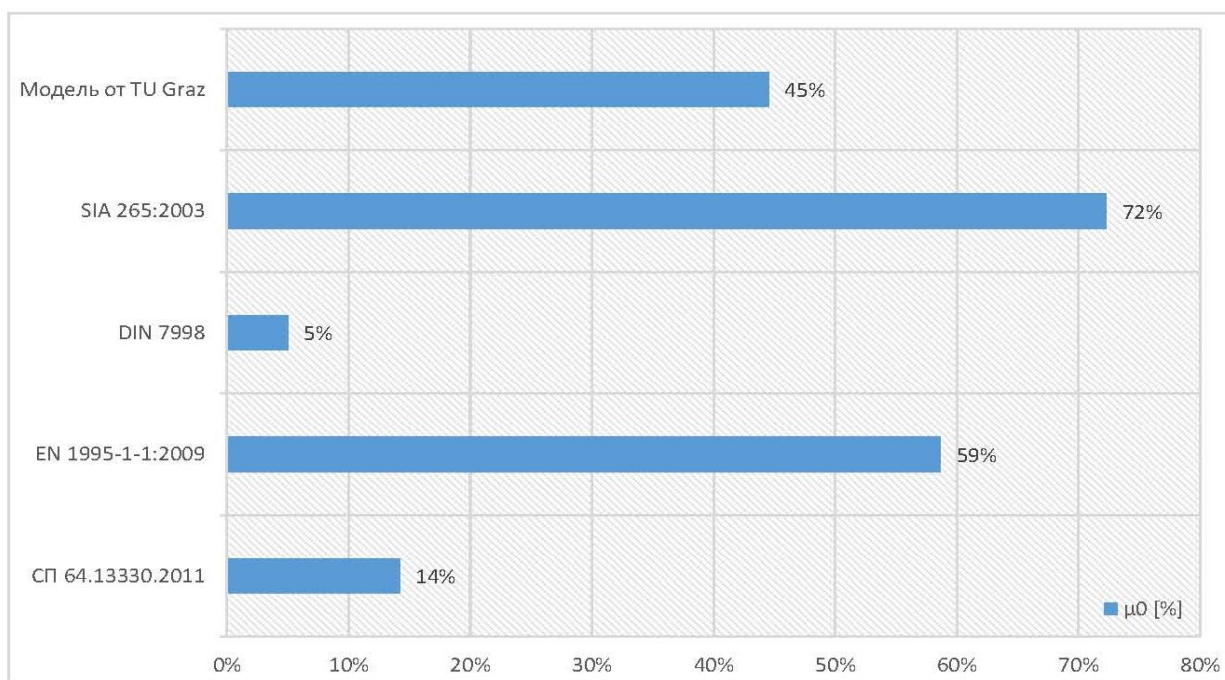


Рис. 4.9. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности шурупа при изгибе в деревянных элементах из *LVL* в соответствии с *EN 1995-1-1-2009*

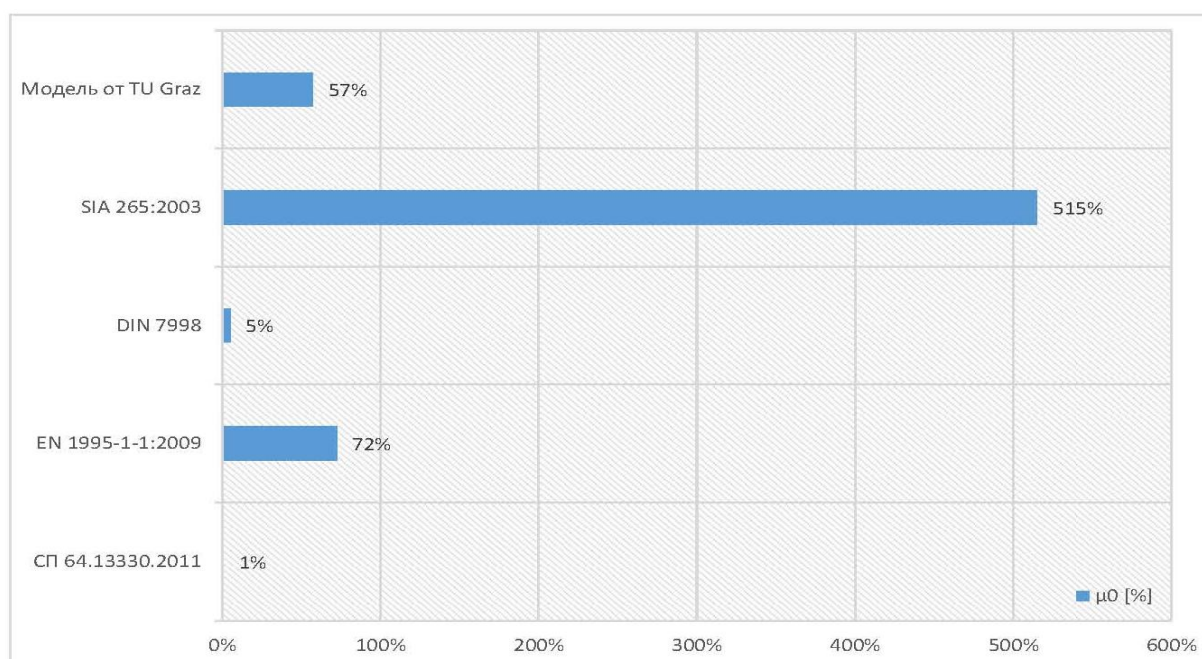


Рис. 4.10. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности шурупа при изгибе в деревянных элементах из *LVL* в соответствии с моделью от В. В. Пуртова и А. В. Павлика

4.2. Сравнение результатов экспериментального и аналитического исследования несущей способности односрезного шурупа на металлической накладке с укреплением металлической зубчатой пластиной

В разделе. 2.4 и 3.5 отдельно были проведены аналитическое и экспериментальное исследования несущей способности односрезного шурупа в соединениях деревянных элементов из *CLT* и *LVL* с укреплением МЗП с металлической накладкой. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов представлены в табл. 4.2 и 4.3.

Таблица 4.2

Сравнение расчётных результатов определения несущей способности односрезного шурупа без укрепления и с МЗП

Деревянный элемент из панели- <i>CLT</i>						Деревянный элемент из <i>LVL</i>		
На узкой стороне			На широкой стороне			Вдоль волокон		
F_p	$F_{МЗП,р}$	η_0	F_p	$F_{МЗП,р}$	η_{90}	F_p	$F_{МЗП,р}$	η_0
1047,18	1540,00	47,06%	1538,32	1861,22	20,99%	1240,33	1633,46	31,70%
Среднее приращение, %						33,25%		

Таблица 4.3

Сравнение экспериментальных результатов определения несущей способности односрезного шурупа без укрепления и с МЗП

Деревянный элемент из панели- <i>CLT</i>						Деревянный элемент из <i>LVL</i>		
На узкой стороне			На широкой стороне			Вдоль волокон		
F_{ϕ}	$F_{МЗП, \phi}$	η_0	F_{ϕ}	$F_{МЗП, \phi}$	η_{90}	F_{ϕ}	$F_{МЗП, \phi}$	η_0
1641,76	1716,012	4,52%	1638,31	1868,96	14,08%	1294,13	1609,01	24,33%
Среднее приращение, %						14,31%		

Примечание: $F_{p/\phi}$ — расчётная и фактическая несущая способность односрезного шурупа без укрепления МЗП, Н; $F_{МЗП,р/\phi}$ — то же с укреплением МЗП, Н; $\mu_{0/90}$ — приращение; $\mu_{0/90} = \frac{F_{МЗП,р/\phi} - F_{p/\phi}}{F_{p/\phi}} \cdot 100\%$

Из табл. 4.2 видно, что с использованием уравнений из раздела. 2.4 расчётная несущая способность шурупов с укреплением МЗП на срез выше минимально на 20,99%, максимально на 47,06% и средняя на 33,25%. Из табл. 4.3 показано, что с помощью МЗП фактическая несущая способность возрастает минимально на 4,52%, максимально на 24,33% и в среднем на 14,31%. Экспериментальные результаты

выше, чем расчётные, а отличие между обоими средними приращениями зависит от конфигурации МЗП и угла оси шурупа к направлению волокон. В свою очередь, по регулированию расположения и геометрической формы зубьев в МЗП можно осуществить повышение несущей способности соединения до требуемого уровня.

Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности односрезного шурупа с укреплением МЗП в деревянных элементах из *CLT* и *LVL* представлено на рис. 4.11-4.13.

Из рис. 4.11-4.13 видно, что расчётные результаты в соответствии с предложенными уравнениями из раздела. 2.4 достаточно близки к экспериментальным из раздела. 3.5. Следовательно, автор рекомендует, что результаты аналитических исследований могут быть использованы при расчёте несущей способности соединения.

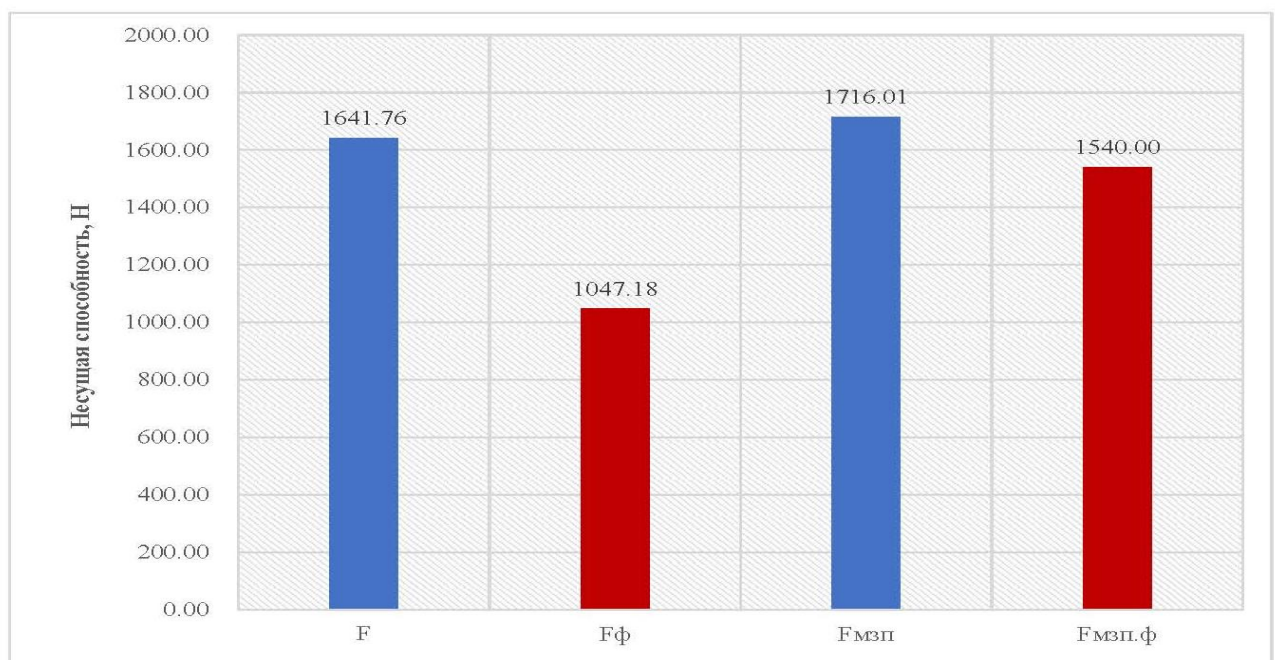


Рис. 4.11. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности односрезного шурупа с укреплением МЗП на узкой стороны стеновой панели из *CLT*

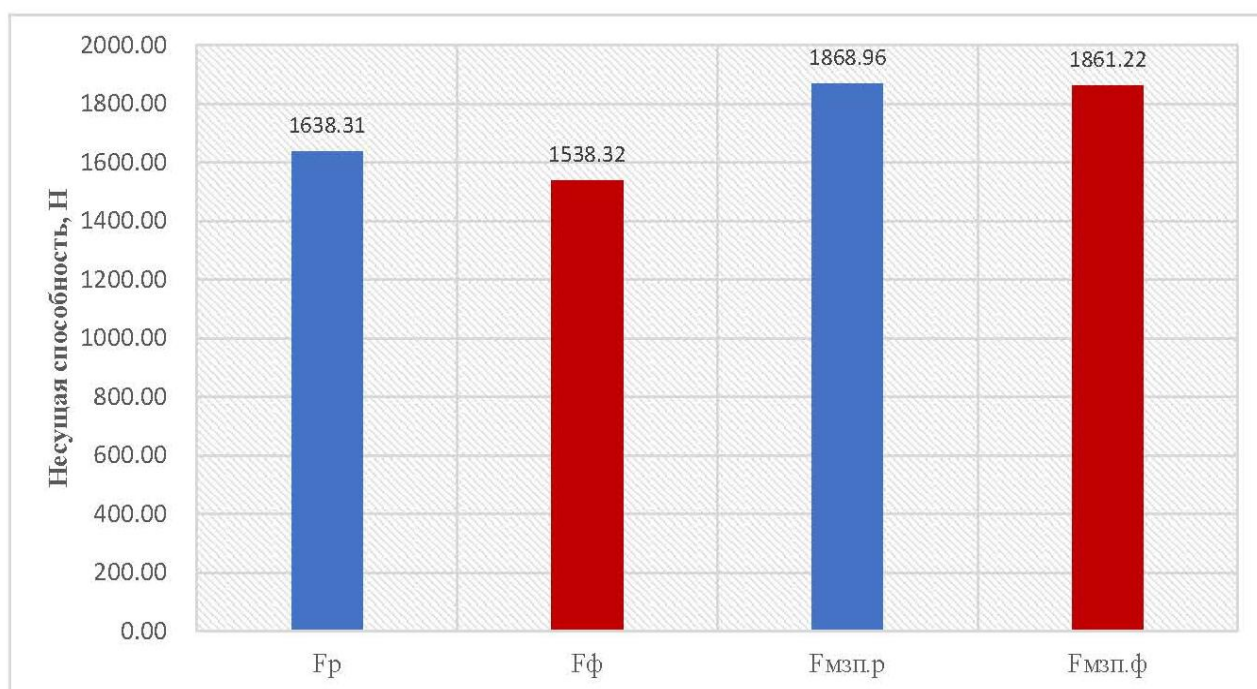


Рис. 4.12. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности односрезного шурупа с укреплением МЗП на широкой стороне стеновой панели из *CLT*

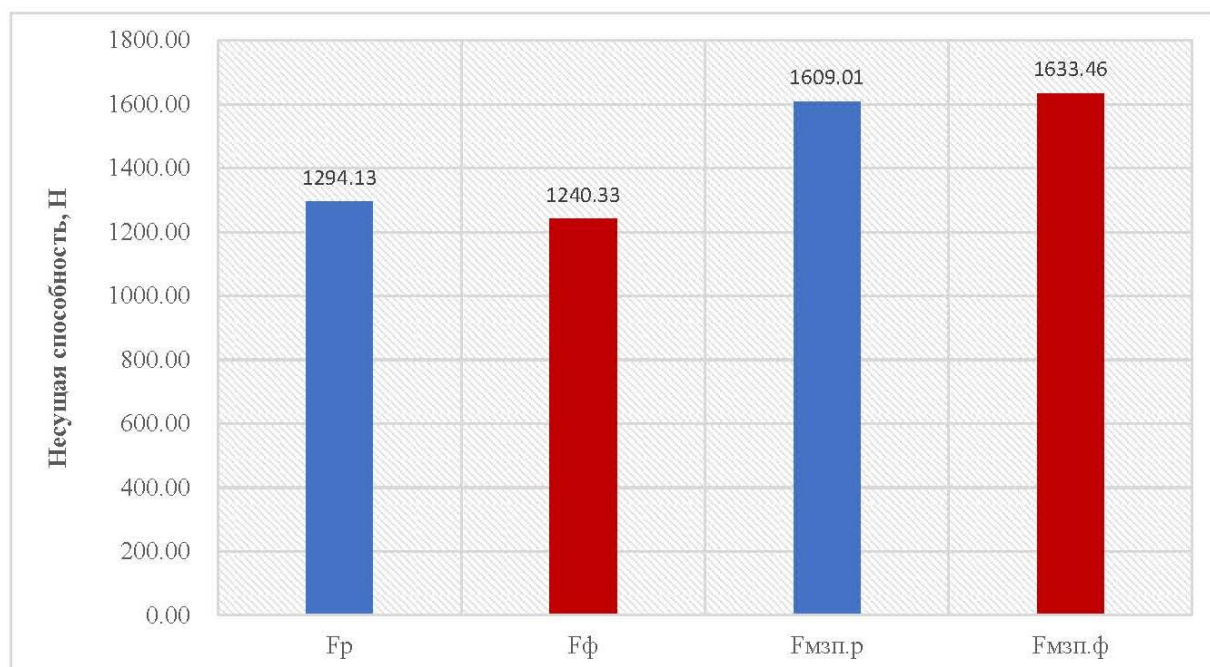


Рис. 4.13. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности односрезного шурупа с укреплением МЗП вдоль волокон *LVL*

4.3. Сравнение результатов экспериментального и аналитического исследования несущей способности соединения элементов деревянных конструкций на металлических накладках без укрепления металлической зубчатой пластиной по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез

В разделе. 2.5 и 3.6 отдельно были проведены аналитическое и экспериментальное исследование несущей способности соединения на металлических накладках в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* и *LVL* по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез. Сравнение расчётных результатов определения несущей способности соединения на основе предложенных уравнений из раздела. 2.5 и экспериментальных представлены в табл. 4.4 в соответствии с графиком на рис. 4.14.

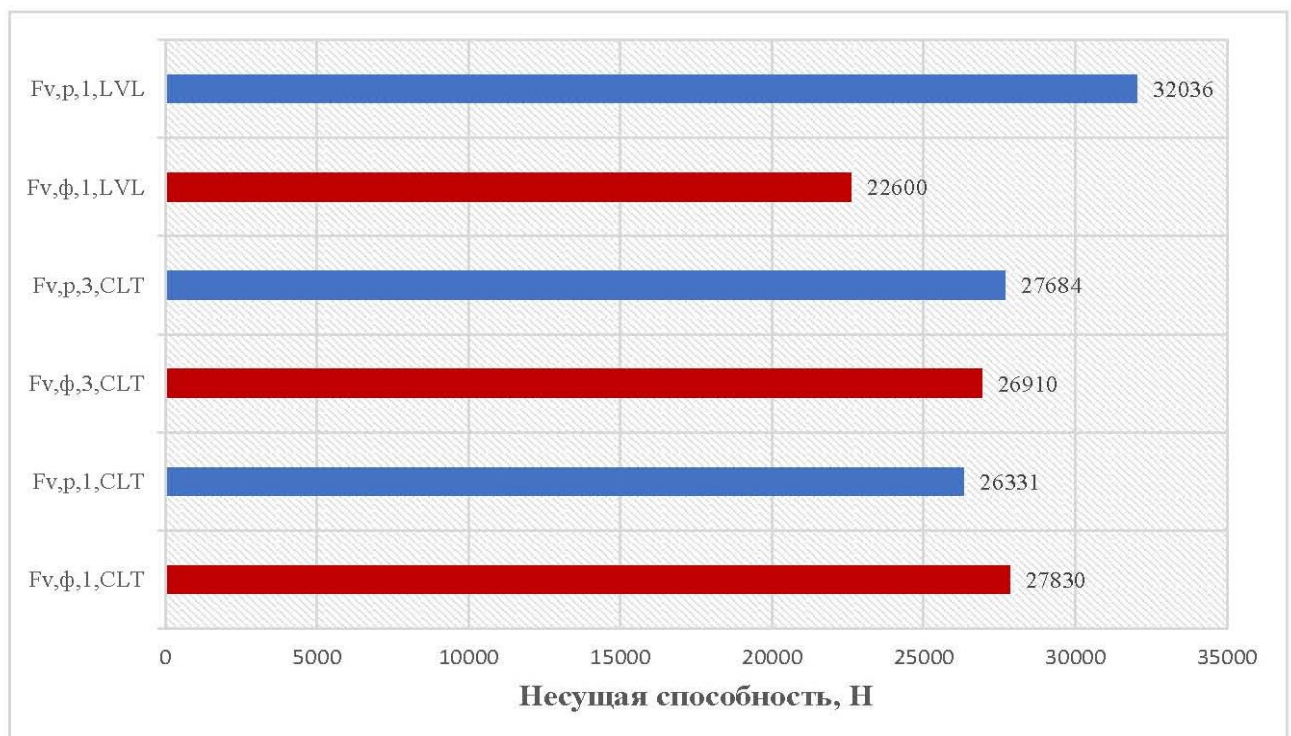


Рис. 4.14. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности соединения по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез

Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности соединения

На широкой стороне панели из <i>CLT</i> для эксперимента №.1			На узкой стороне панели из <i>CLT</i> для эксперимента №.3			Вдоль волокон балки из <i>LVL</i> для эксперимента №.2		
$F_{v,\phi,1,CLT}$	$F_{v,p,1,CLT}$	μ_1	$F_{v,\phi,3,CLT}$	$F_{v,p,3,CLT}$	μ_3	$F_{v,\phi,1,LVL}$	$F_{v,p,1,LVL}$	μ_1
27830	26331	5,69%	26910	27684	-2,80%	22600	32036	-29,45%

Примечания: $F_{v,\phi,n,CLT}$ — фактическая несущая способность, Н; $F_{v,p,n,CLT}$ — расчётная несущая способность, Н; μ_n —

приращение $F_{v,\phi,n,CLT}$ и $F_{v,p,n,CLT}$; $\mu_n = \frac{F_{v,\phi,n,CLT} - F_{v,p,n,CLT}}{F_{v,p,n,CLT}} \cdot 100\%$; n — номер эксперимента

Из табл. 4.4 видно, что расчётные результаты ниже экспериментальных на 5,69%. Предложенные формулы с удовлетворительной точностью описывают действительную работу конструкции. В свою очередь, погрешность для оценки фактической несущей способности соединения в реальном проектировании имеет достаточную точность и безопасность. Поэтому автор рекомендует, что предложенный аналитический алгоритм в соответствии с разделом 2.5 может применять в практике.

4.4. Сравнение результатов экспериментального и аналитического исследования несущей способности соединения элементов деревянных конструкций на металлических накладках с металлической зубчатой пластиной по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез

В разделе 2.6 и 3.7 отдельно были проведены аналитическое и экспериментальное исследование несущей способности соединения на металлических накладках с укреплением МЗП в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* и *LVL* по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез. Сравнение расчётных результатов на основе предложенного

аналитического алгоритма из раздела. 2.6 и экспериментальных представлены в табл. 4.5 в соответствии с графиком на рис. 4.15.

Таблица 4.5

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

На широкой стороне панели из CLT для эксперимента №.7			На узкой стороне панели из CLT для эксперимента №.7			Вдоль волокон балки из LVL для эксперимента №.6		
$F_{v,\phi,7,CLT,МЗП}$	$F_{v,p,7,CLT,МЗП}$	μ_7	$F_{v,\phi,7,CLT,МЗП}$	$F_{v,p,7,CLT,МЗП}$	μ_7	$F_{v,\phi,6,LVL,МЗП}$	$F_{v,p,6,LVL,МЗП}$	μ_6
33520	29234	14,66%	33520	31556	6,22%	29640	36764	-19,38%

Примечания:

$F_{v,\phi,n,CLT,МЗП}$ - фактическая несущая способность соединения с укреплением МЗП, Н;

$F_{v,p,n,CLT,МЗП}$ — расчётная несущая способность соединения с укреплением МЗП, Н;

μ_n — приращение $F_{v,\phi,n,CLT,МЗП}$ и $F_{v,p,n,CLT,МЗП}$; $\mu_n = \frac{F_{v,\phi,n,CLT,МЗП} - F_{v,p,n,CLT,МЗП}}{F_{v,p,n,CLT,МЗП}} \cdot 100\%$;

n — номер эксперимента

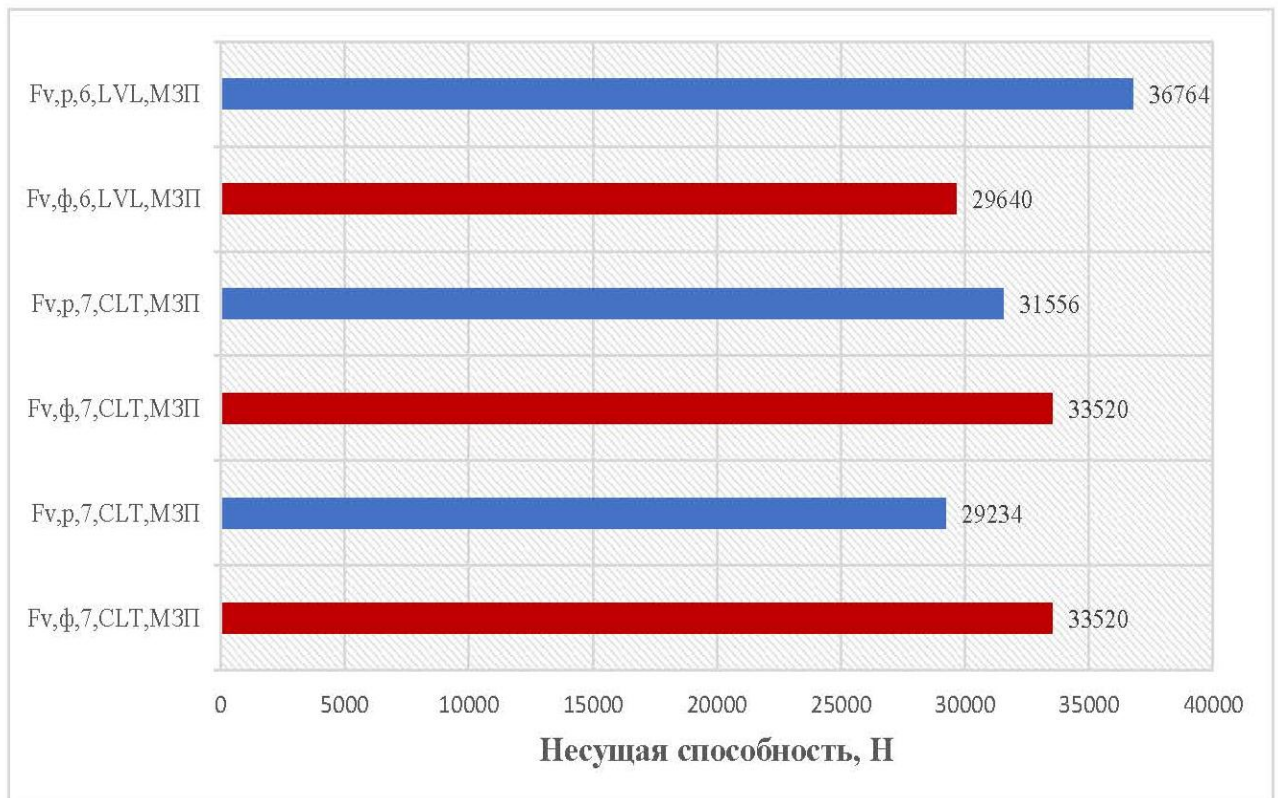


Рис. 4.15. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности соединения на металлических накладках с укреплением МЗП

Из таблицы. 4.15 видно, что по аналогии с разделами. 2.5 и 3.6 расчётные

результатов ниже на 14,66%, чем экспериментальные. Несущая способность соединения на металлических накладках с укреплением МЗП с использованием балки из *CLT* выше, чем балки из *LVL*.

Для обоснования и подтверждения эффективности методики расчёта соединения с применением МЗП, сравнение расчётных и экспериментальных результатов несущей способности соединения на металлических накладках без укрепления и с МЗП в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* и *LVL* по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез представлены в табл. 4.6 и 4.7 в соответствии с графиками на рис. 4.16 и 4.17.

Таблица 4.6

Сравнение расчётных результатов определения несущей способности соединения на металлических накладках без укрепления и с МЗП

На широкой стороне панели из <i>CLT</i> для эксперимента №.7			На узкой стороне панели из <i>CLT</i> для эксперимента №.7			Вдоль волокон балки из <i>LVL</i> для эксперимента №.6		
$F_{v,p,90,CLT,МЗП}$	$F_{v,p,90,CLT}$	μ_7	$F_{v,p,0,CLT,МЗП}$	$F_{v,p,0,CLT}$	μ_7	$F_{v,p,0,LVL,МЗП}$	$F_{v,p,0,LVL}$	μ_6
29234	26331	11,03%	31556	27684	13,99%	36764	32036	14,76%

Примечания:

$F_{v,p,90,CLT,МЗП}$ — расчётная несущая способность соединения с укреплением МЗП, Н;

$F_{v,p,90,CLT}$ — то же без МЗП, Н;

μ — приращение $F_{v,p,90,CLT,МЗП}$ и $F_{v,p,90,CLT}$; $\mu_n = \frac{F_{v,p,n,CLT,МЗП} - F_{v,p,n,CLT}}{F_{v,p,n,CLT}} \cdot 100\%$;

α — угол между осью шурупа и волокнами

Таблица 4.7

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

На широкой стороне панели из <i>CLT</i> для эксперимента №.7			На узкой стороне панели из <i>CLT</i> для эксперимента №.7			Вдоль волокон балки из <i>LVL</i> для эксперимента №.6		
$F_{v,\phi,90,CLT,МЗП}$	$F_{v,\phi,90,CLT}$	μ_7	$F_{v,\phi,0,CLT,МЗП}$	$F_{v,\phi,0,CLT}$	μ_7	$F_{v,\phi,0,LVL,МЗП}$	$F_{v,\phi,0,LVL}$	μ_6
33520	27830	20,45%	33520	26910	24,56%	29640	22600	31,15%

Примечания:

$F_{v,\phi,90,CLT,МЗП}$ — фактическая несущая способность соединения с укреплением МЗП, Н;

$F_{v,\phi,90,CLT}$ —то же без МЗП, Н;

μ — приращение $F_{v,\phi,90,CLT,МЗП}$ и $F_{v,\phi,90,CLT}$; $\mu_n = \frac{F_{v,\phi,n,CLT,МЗП} - F_{v,\phi,n,CLT}}{F_{v,\phi,n,CLT}} \cdot 100\%$;

α — угол между осью шурупа и волокнами

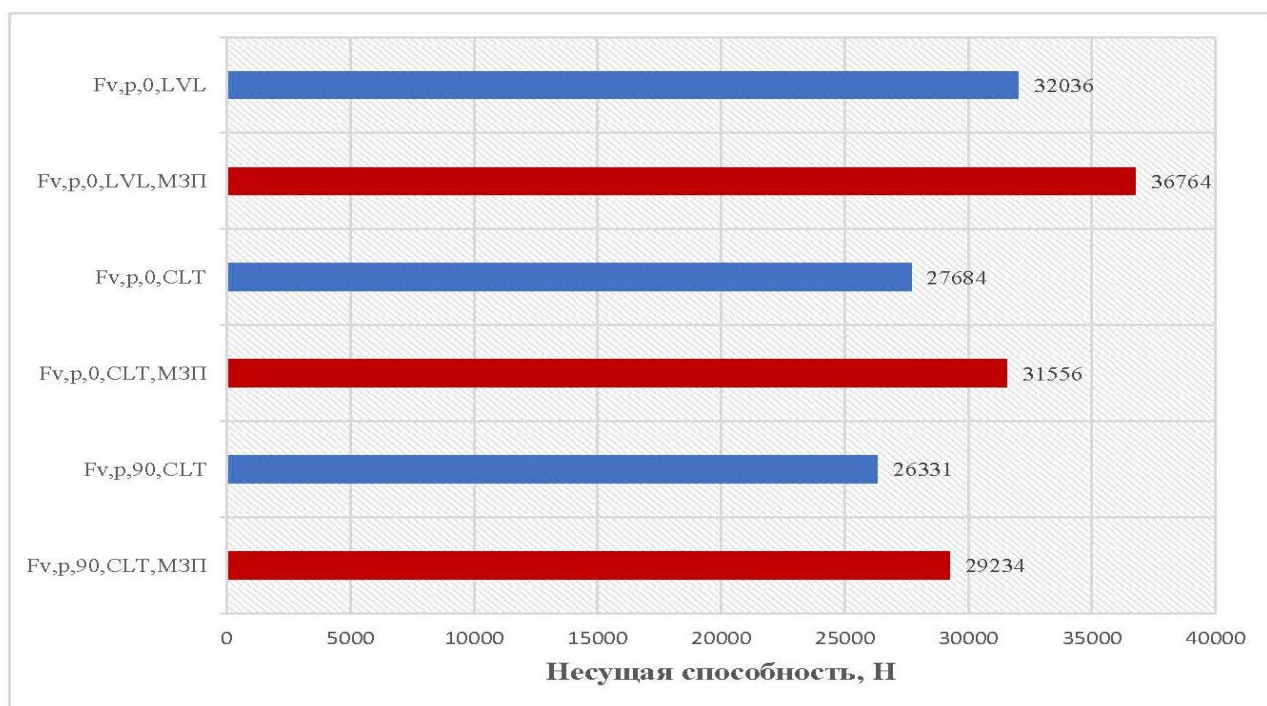


Рис. 4.16. Сравнение расчётных результатов определения несущей способности соединения на металлических накладках без укрепления и с МЗП

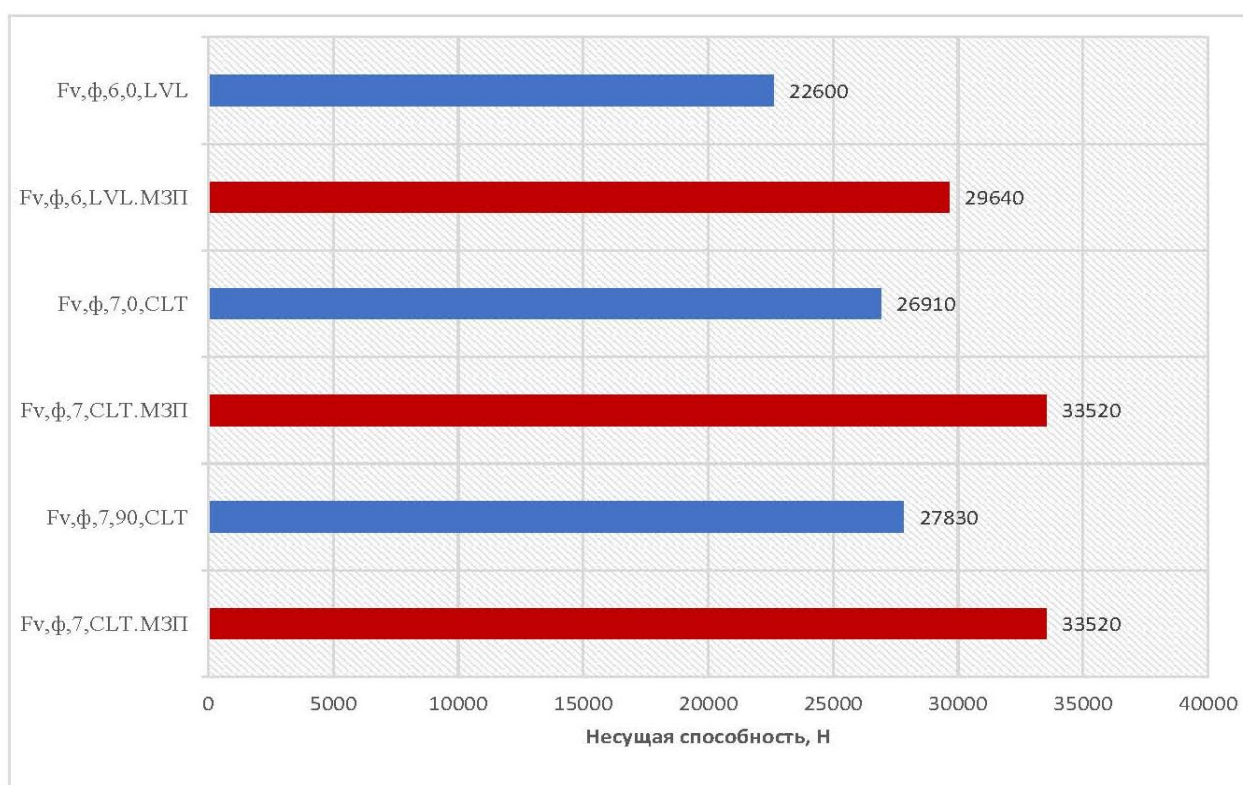


Рис. 4.17. Сравнение экспериментальных результатов определения несущей способности соединения на металлических накладках без укрепления и с МЗП

Из табл. 4.6 и 4.7 видно, что расчётная несущая способность соединения на металлических накладках с укреплением МЗП выше минимально на 11,03%, а фактическая несущая способность с укреплением МЗП возрастает минимально на 20.45% и максимально на 31.35%. Этим подтверждается, что применение МЗП позволяет эффективно повысить несущую способность соединения. Поэтому при конструировании в деревянных домостроениях инженеры и архитекторы могут использовать предложенный аналитический алгоритм, чтобы эффективно и экономично использовать соединения.

4.5. Сравнение результатов экспериментального и аналитического исследования несущей способности соединения на металлических накладках по сопротивлению шурупов на выдергивание

В разделе. 2.7 и 3.8 отдельно были проведены аналитическое и экспериментальное исследование несущей способности соединения на металлических накладках по сопротивлению шурупов на выдергивание в деревянных конструкциях стеновой панели из CLT и балки из *CLT* и *LVL*. Металлические накладки изготавливают из алюминиевого материала—*EN 6082* [104], а прочность материала определяется по *BS EN 755-2:2008* [89]. С учётом контактной площади при сжатии между выступами двух металлических накладок несущая способность соединения на растяжение составляет 6824,68 Н. На основе предложенного аналитического алгоритма из раздела. 2.7 сравнение расчётных и экспериментальных результатов представлено в табл. 4.8 в соответствии с графиком на рис. 4.18.

Из табл. 4.8 видно, что расчётные результаты определения несущей способности соединения на металлических накладках, которое крепится к стеновой панели из *CLT*, выше на минимально 103,14%, чем несущая способность на растяжение алюминиевых накладок, а экспериментальные результаты выше на минимально 64,96%, чем-то же. Расчётные результаты определения несущей способности соединения по сопротивлению шурупов на выдергивание из деревянных элементов из *LVL* выше на минимально 256,59%, чем несущая способность на растяжение алюминиевых накладок, а экспериментальные результаты выше на минимально 86,30%, чем-то же. С другой стороны, в соединениях на металлических накладках появилось отчётливое пластичное разрушение, потому что прочность металлических накладок не удовлетворяет условию сопротивления на выдергивание шурупов в соединениях деревянных конструкций в целом. Для того, чтобы повысить несущую способность соединения и усовершенствовать конструкцию, необходимо выбрать наиболее рациональный материал.

Таблица 4.8

Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности соединения на металлических накладках по сопротивлению шурупов на выдергивание

Параметр	На широкой стороне <i>CLT</i>	На узкой стороне <i>CLT</i>	Вдоль волокон балки из <i>LVL</i>	Алюминиевые накладки
F_p	14430,48	13863,91	24336,00	6824,681
ω_p	111,45%	103,14%	256,59%	-
F_ϕ	-	11258,00	12714,59	-
ω_ϕ	-	64,96%	86,30%	-

Примечания: F_p — расчётная несущая способность соединения на выдергивание, Н; F_ϕ — фактическая несущая способность соединения на выдергивание, Н; ω_p — приращение F_p и $F_{алю}$; $\omega_p = \frac{F_p - F_{алю}}{F_{алю}} \cdot 100\%$; ω_ϕ — приращение F_ϕ и

$$F_{алю}; \omega_\phi = \frac{F_\phi - F_{алю}}{F_{алю}} \cdot 100\%$$

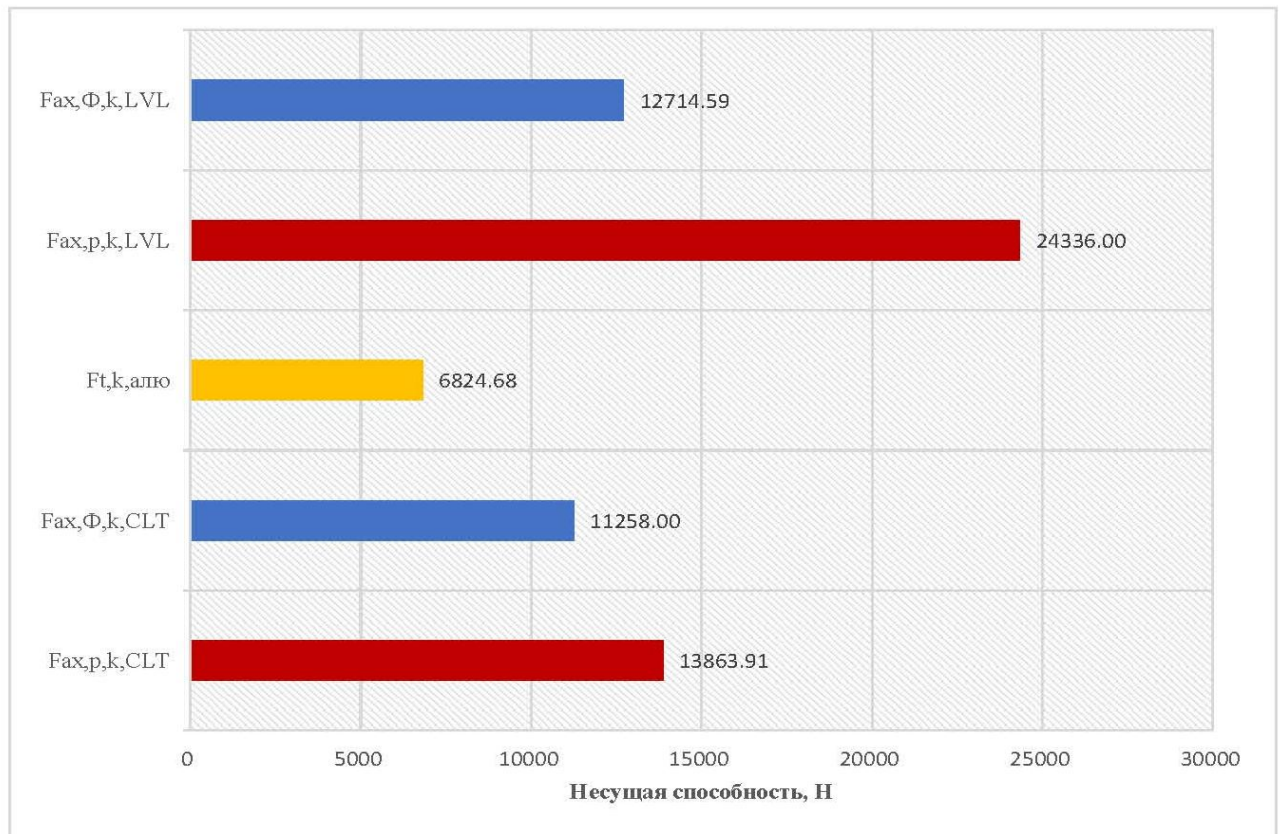


Рис. 4.18. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности соединения на металлических накладках по сопротивлению шурупов на выдергивание

4.6. Сравнение результатов аналитического исследования коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки

В разделе. 2.8 автором был предложен аналитический алгоритм на основе экспериментального исследования из раздела. 3.6-3.7 по определению коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки для нахождения несущей способности соединения на металлических накладках в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* и *LVL*. В научном исследовании [42] несущая способность соединения на металлических накладках по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез равна 15000 Н и коэффициент

влияния эксцентриситета приложения нагрузки в соответствии с физико-механическими и геометрическими характеристиками деревянных элементов составляет 0,5. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности соединения без укрепления и с МЗП с учётом коэффициентов влияния эксцентриситета приложения нагрузки представлены в табл. 4.9 и 4.10 в соответствии с графиками (рис. 4.19 и 4.20).

Таблица 4.9

Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности соединения на металлических накладках без укрепления МЗП с учётом коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки

Параметр	$F_{v,k,оф}$	$F_{v,k,90,p,CLT}$	$F_{v,k,0,p,CLT}$	$F_{v,k,ф,CLT,1}$	$F_{v,k,ф,CLT,3}$	$F_{v,k,p,LVL}$	$F_{v,k,ф,LVL}$
$F_{v,k}$	15000	26331	27684	27830	26910	32036	22600
μ	-	75,54%	84,56%	85,53%	79,40%	113,57%	50,67%
ω	0,5	0,41	0,40	0,41	0,36	0,42	0,41
$F_{v,k}'$	7500	10795	11073	11322	9753	13455	9303
μ'	-	43,94%	47,65%	50,97%	30,05%	79,40%	24,05%

Примечания: $F_{v,k}$ — несущая способность соединения на металлических накладках по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез без коэффициента, Н; $F_{v,k}'$ — то же с учётом коэффициента, Н; μ — приращение $F_{p/ф}$ и $F_{v,k,оф}$;

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

Таблица 4.10

Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности соединения на металлических накладках с укреплением МЗП с учётом коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки

Параметр	$F_{v,k,оф,МЗП}$	$F_{v,k,90,p,CLT,МЗП}$	$F_{v,k,0,p,CLT,МЗП}$	$F_{v,k,ф,CLT,7,МЗП}$	$F_{v,k,p,LVL,МЗП}$	$F_{v,k,ф,LVL,6,МЗП}$
$F_{v,k}$	15000	29234	31556	33520	36764	29640
μ	-	94,89%	110,37%	123,47%	145,09%	97,60%
ω	0,5	0,39	0,38	0,40	0,40	0,36
$F_{v,k}'$	7500	11401	11991	13408	14705	10670
μ'	-	52,02%	59,88%	78,77%	96,07%	42,27%

Примечания: $F_{v,k}$ — несущая способность соединения на металлических накладках по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез без коэффициента, Н; $F_{v,k}'$ — то же с учётом коэффициента, Н; μ — приращение $F_{p/ф}$ и $F_{v,k,оф}$;

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

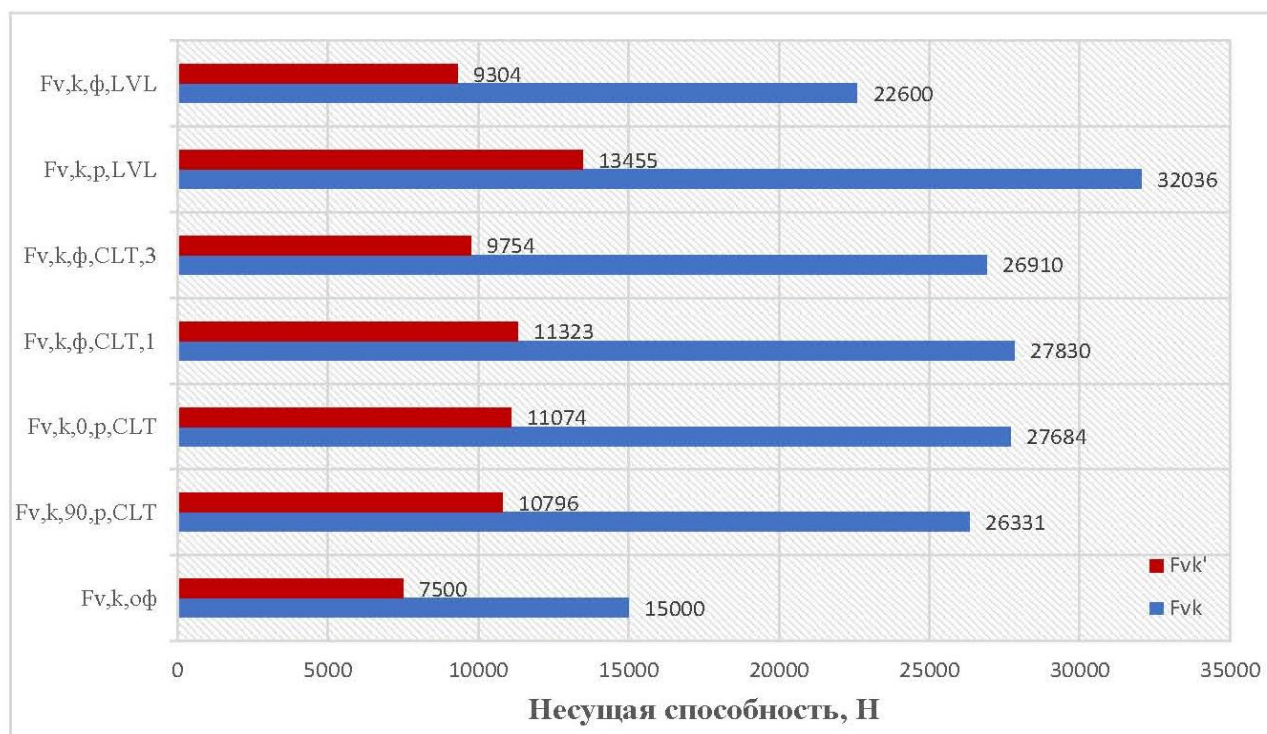


Рис. 4.19. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности соединения на металлических накладках без укрепления МЗП с учётом коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки

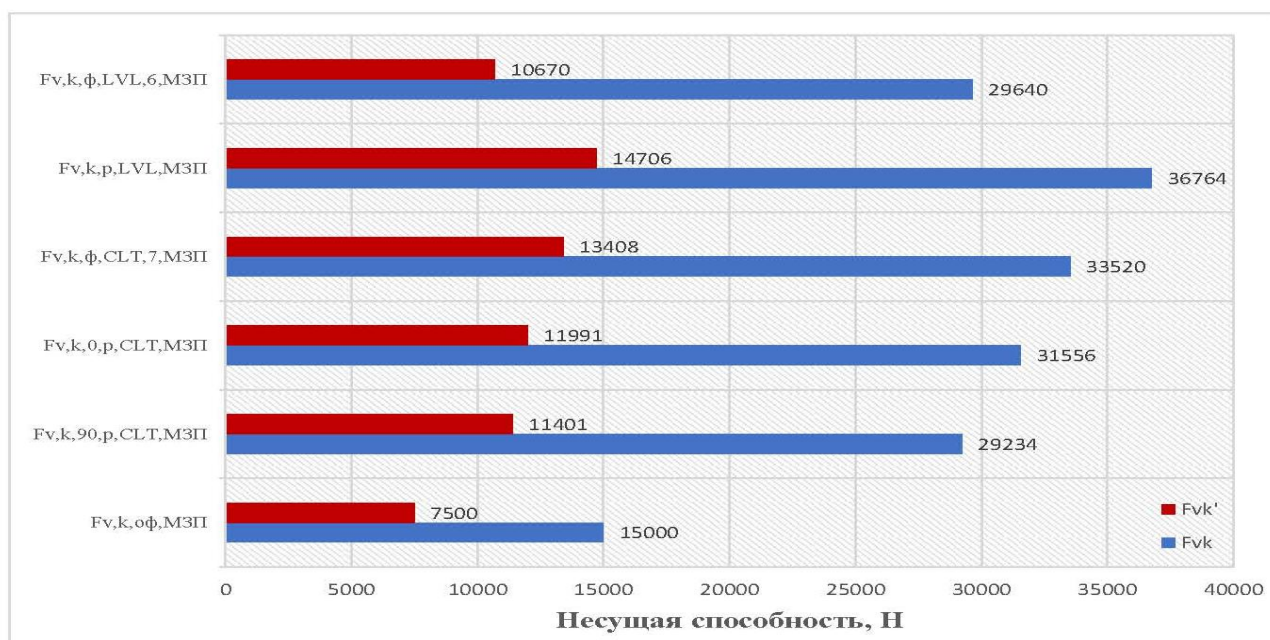


Рис. 4.19. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения несущей способности соединения на металлических накладках с укреплением МЗП с учётом коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки

Из табл. 4.9 и 4.10 видно, что коэффициент влияния эксцентриситета приложения нагрузки, определяемый по предложенным уравнениям из раздела. 2.6, достаточно близок к данному коэффициенту 0,5, показанному в [42]. 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 деревянных материалов при расчётах. 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;
- предложен новый аналитический алгоритм;

Из табл. 4.9 видно, что расчётные и экспериментальные результаты выше на максимально 113,57% и минимально 50,67%, чем нормативное значение 15000 Н, а после умножения на коэффициент влияния эксцентриситета приложения нагрузки выше на максимально 79,40% и минимально 24,05%, чем то же 7518 Н. Сравнительный анализ показывает, что предложенный аналитический алгоритм расчёта коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки может обеспечить достоверность и повысить надёжность конструирования.

4.7. Моделирование и расчёт несущей способности соединения на металлических накладках по МКЭ

4.7.1. Общие положения

С целью проверки экспериментальных и аналитических результатов из раздела. 2.9 и 3.9, используется метод конечных элементов (МКЭ). В разделе. 3.9 определились минимальные напряжения сдвига, максимальные деформаций сдвига, угол между осью тензодатчика и направлением главных деформаций с использованием тензометрических преобразователей. С применением программы *Ansys 15.0* [107, 108] после выполнения трехмерного моделирования двух металлических накладок с использованием программы *Solidworks Simulation 2014* [112] и аналитического расчёта вычислено напряжение *vonMises*, перемещение, главное напряжение и деформация. Вопрос соответствия между расчётной моделью и реальностью представляется актуальным на основе вышепоказанного.

При расчётах соединения на металлических накладках особое внимание уделяется контактными зонам между выступами двух металлических накладок, в которых воспринимаются значительные усилия, обуславливающие пластическое разрушение. По существу, для выяснения расположения локального напряжения расчёт несущей способности крепежа, часть из которого отдельно крепится к торцевой поверхности стеновой панели из CLT и балки из CLT и LVL, был разделен на два типа: определение несущей способности крепежа при приложении нагрузки вдоль направления вставки без учёта влияния эксцентриситета приложения нагрузки, Н; определение несущей способности крепежа при приложении нагрузки

вдоль направления вставки с учётом влияния эксцентриситета приложения нагрузки, H ;

4.7.2. Определение прочностных характеристик опытных деревянных образцов

В разделе. 3.2 были определена нормативная плотности деревянных опытных образцов из *CLT* и *LVL*. Для проверки достоверности полученных результатов автором проведено исследование физико-механических характеристик деревянных элементов из *CLT* в соответствии с руководствами, разработанными с различными компаниями, представленные в табл. 4.11.

Таблица 4.11

Физико-механические характеристики деревянных элементов из *CLT*

Компания	<i>Binderholz</i>	<i>KLH</i>	<i>LENO</i>	<i>MM</i>	<i>NODIC</i>	<i>Norica timber</i>	СП 64.13330.2011
E_{90} , МПа	11000	12000	10590	11600	11700	11600	10000
E_0 , МПа	-	1200	7330	-	9000	-	-
G_{90} , МПа	690	690	410	650	731	690	500
G_0 , МПа	-	250	3670	250	563	-	-
ρ_k , кг/м ³	470	480	350	480	515	420	495
Порода древесины	Сосна	Сосна	Сосна	Сосна	Сосна	Сосна	Сосна

Из табл. 4.11 видно, что модуль упругости деревянных мате́риалов из *CLT* выше, чем *LVL* в соответствии с СНиП 64. 13330.2011 и полученная плотность *CLT* соответствует с известным нормативным значением.

После выполнения трехмерной модели соединения на металлических накладках для каждого элемента назначали физические и механические характеристики материалов в соответствии с *EN AW 6082* [104]:

- модуль упругости $E=70000$ МПа;
- коэффициент Пуассона $\mu=0,33$;
- модуль жесткости $G=26400$ МПа;
- плотность $\rho=2,7$ г/см³;
- для куба алюминий с толщиной от 5 мм до 25 мм:
 - напряжение текучести минимально до 260 МПа;
 - напряжение на растяжение минимально до 310 МПа;

4.7.3. Моделирование и анализ результатов

Для того, чтобы повысить точность моделирования, при расчёте несущей способности соединения используется упрощенная методика, как: деревянными элементами из стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* и *LVL* можно пренебречь; с учётом типа крепления шурупов в гнездах металлические накладки должны быть зафиксированы креплением; на контактной зоне между выступами обоих металлических накладок при сжатии 319,48 МПа; в гнездах металлических накладок под шурупы воспринимается изгибающий момент (при приложении эквивалентного действующего усилия 44800 Н) на верхних и нижних гнездах.

Расположение мест приложения нагрузки и крепления соединения на металлических накладках представлено на рис. 4.20. С использованием автоматического построения сетки конкретные параметры сетки детализации даны в табл.4.12.

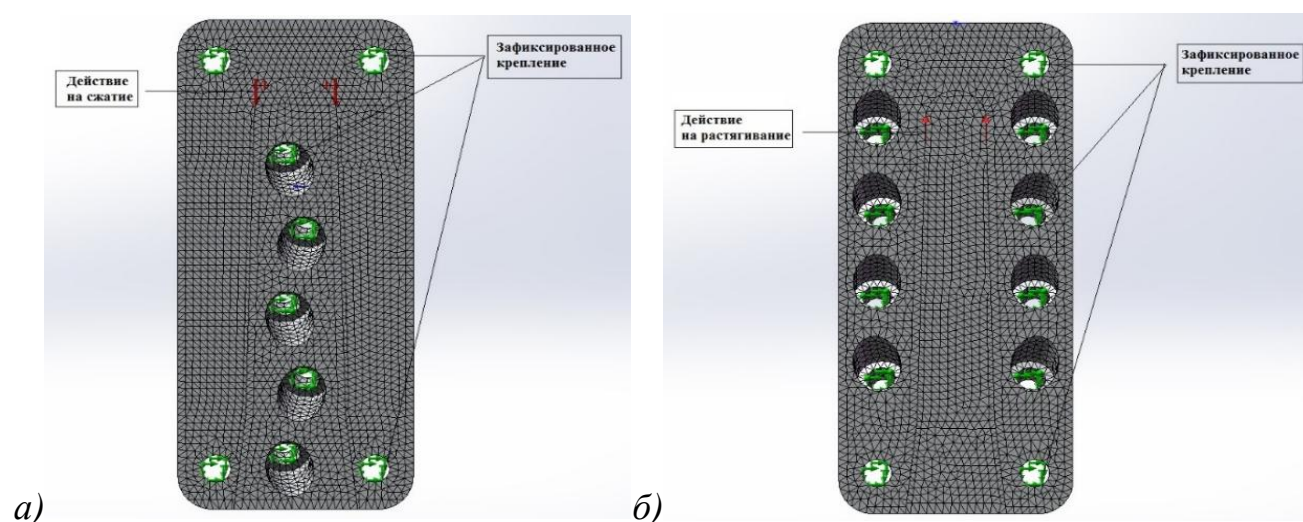


Рис. 4.20. Расположение мест приложения нагрузки и крепления для металлической накладки: *a*— на стеновой панели из *CLT*; *б*— на балке из *CLT* и *LVL*

Таблица 4.12

Параметры сетки детализации по МКЭ

Расположение металлической накладки	На стеновой панели из <i>CLT</i>	На балке из <i>CLT</i> или <i>LVL</i>
Тип сетки	Сетка на твердом теле	Сетка на твердом теле
Используемое разбиение	Стандартная сетка	Стандартная сетка
Точки Якобиана	5 точки	5 точки
Размер элемента	0,0064154 мм	1,45940 мм
Всего узлов	3607	4823
Всего элементов	1756	2469

Экспериментальные исследования по МКЭ с помощью программы *Ansys 15.0* были направлены на определение:

- напряжения *von Mises* (эквивалентное напряжение по фон Мизесу, исходя из соответствующей гипотезы прочности или критерия пластичности), МПа;
- максимальной деформации металлической накладки по пределу текучести материала, мм;
- главного напряжения, МПа и деформации, 10^{-6} мм/мм;
- максимального перемещения, мм;

По программе *Ansys 15.0* выполняется расчёт несущей способности крепежа под нагрузкой вдоль направления вставки без учёта влияния эксцентриситета приложения нагрузки, сравнение расчётных и экспериментальных результатов представлено в табл. 4.13 и 4.14. На рис. 4.21 показаны виды разрушения металлических накладок под нагрузкой вдоль направления вставки без учёта влияния эксцентриситета приложения нагрузки с использованием программы *Ansys 15.0*, а фактические представлены на рис. 4.22.

Таблица 4.13

Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения напряжений и деформаций металлической накладки на стеновой панели из *CLT*

Параметр	Единица	F	$F_{v010\ CLT}$	$F_{v030\ CLT}$	$F_{v020\ LVL}$	$F_{v060\ LVL0\ МЗП}$	$F_{v070\ CLT0\ МЗП}$
Экспериментальная несущая способность	Н	15000	27830	26910	22600	33520	29640
Максимальное напряжение (<i>vonMises</i>)	МПа	527,04	977,84	945,52	794,08	1177,8	1041,4
Максимальное перемещение	мм	0,0665	0,1233	0,1192	0,1001	0,1485	0,1313
Главное напряжение	МПа	296,81	550,68	532,47	447,19	663,27	586,49
Главная деформация	10^{-6} мм/мм	3470	6437	6224	5228	7753	6856

Таблица 4.14

Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения напряжений и деформаций металлической накладки на балке из *CLT* и *LVL*

Параметр	Единица	F	$F_{v1,\ CLT}$	$F_{v3,\ CLT}$	$F_{v2,\ LVL}$	$F_{v6,\ LVL,\ МЗП}$	$F_{v7,\ CLT,\ МЗП}$
Экспериментальная несущая способность	Н	15000	27830	26910	22600	33520	29640
Максимальное напряжение (<i>vonMises</i>)	МПа	352,59	654,18	632,55	531,24	787,93	696,72
Максимальное перемещение	мм	0,03736	0,07798	0,07541	0,06333	0,09393	0,08306
Главное напряжение	МПа	353,04	655,01	633,36	531,92	788,93	697,61
Главная деформация	10^{-6} мм/мм	4946	9176	8872	7451	11051	9772

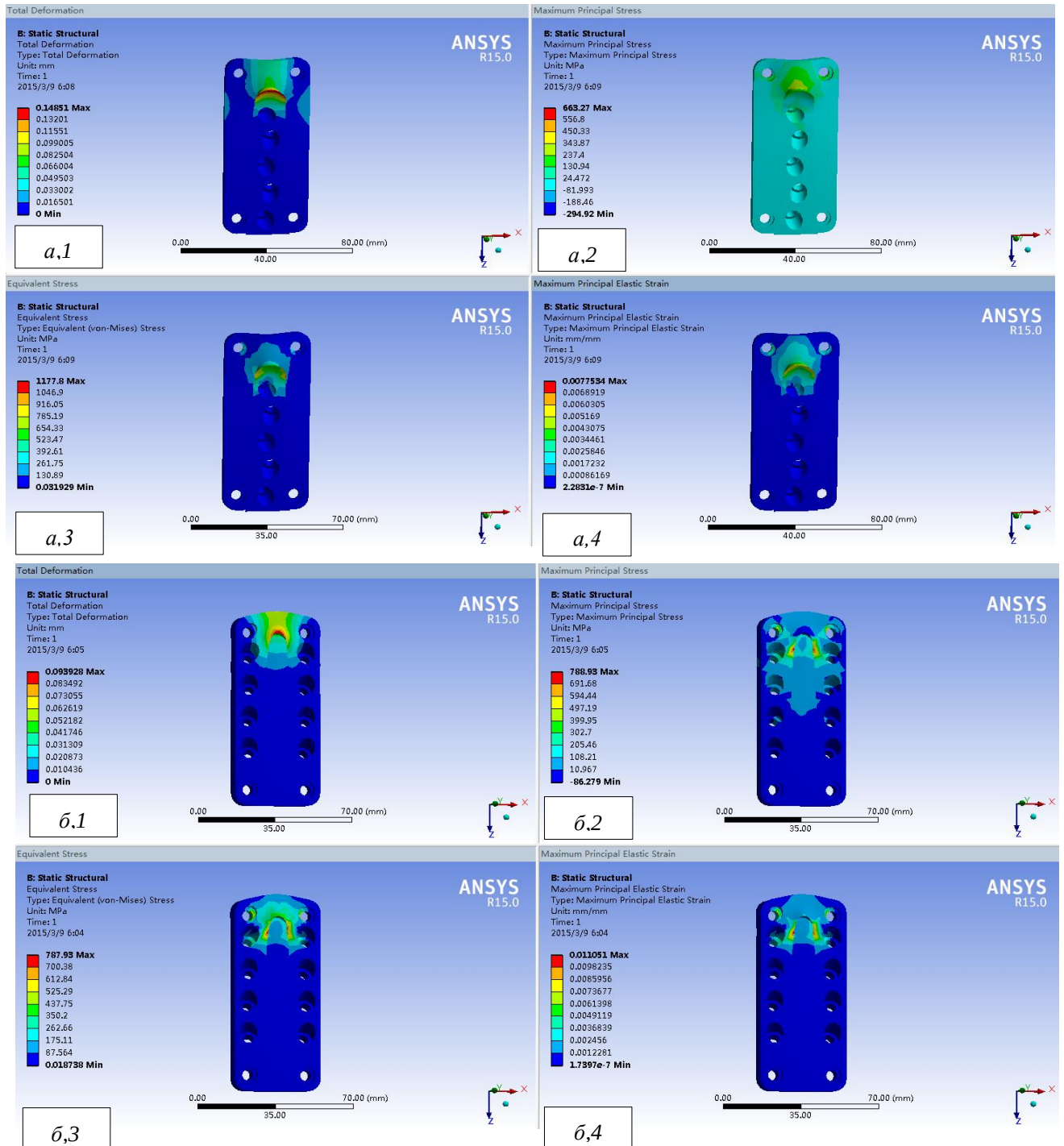


Рис. 4.21. Виды разрушения металлических накладок без учёта влияния эксцентриситета приложения нагрузки: *a, 1-4*) перемещение, напряжение в главном направлении, эквивалентных напряжений и деформация в главном направлении на металлической накладке в стеновой панели из CLT; *б, 1-4*) перемещение, напряжение в главном направлении, эквивалентных напряжений и деформация в главном направлении то же в балке из CLT и LVL

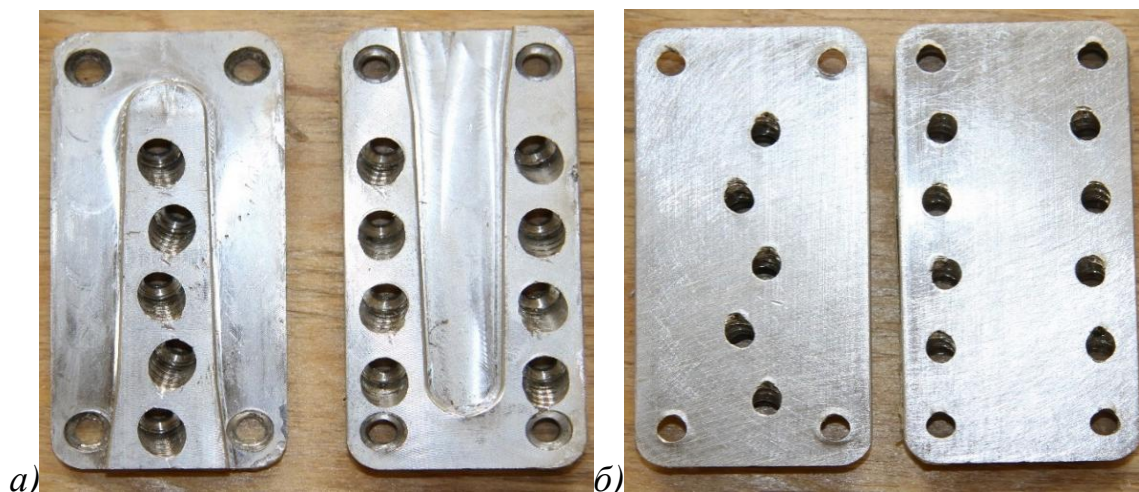


Рис. 4.22. Виды разрушения металлических накладок без учёта влияния эксцентриситета приложения нагрузки: *а*— на лицевой стороне; *б*— на обратной стороне

Из табл. 4.13 и 4.14 видно, что при сжатии на контактных участках между выступами двух накладок появилась отчётливая концентрация напряжений. При приложении нагрузки до 15000 Н максимальное напряжение 352,59 МПа выше на 35,61%, чем предел текучести материала 260 МПа. На рис. 4.21 и 4.22 видно, что без учёта влияния эксцентриситета приложения нагрузки на контактной зоне возникает отчётливое перемещение и одновременно на гнездах отверстия шурупов относительно небольшая деформация. По сравнению результатов можно сделать вывод о том, что расчётные результаты по МКЭ могут относительно полностью отражать и объяснить причину пластического разрушения металлических накладок по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез.

Поскольку в узловом соединения может возникнуть изгибающий момент, обуславливающий пластичное разрушение металлических накладок, автором было проведено численное исследование с учётом влияния эксцентриситета приложения нагрузки на металлические накладки по МКЭ. На рис. 4.23 показано расположение

мест приложения нагрузки и крепления соединения. Виды разрушения металлических накладок с учётом влияния эксцентриситета приложения нагрузки по программе *ansys 15.0* представлены на рис. 4.24, а экспериментальные представлены на рис. 4.25.

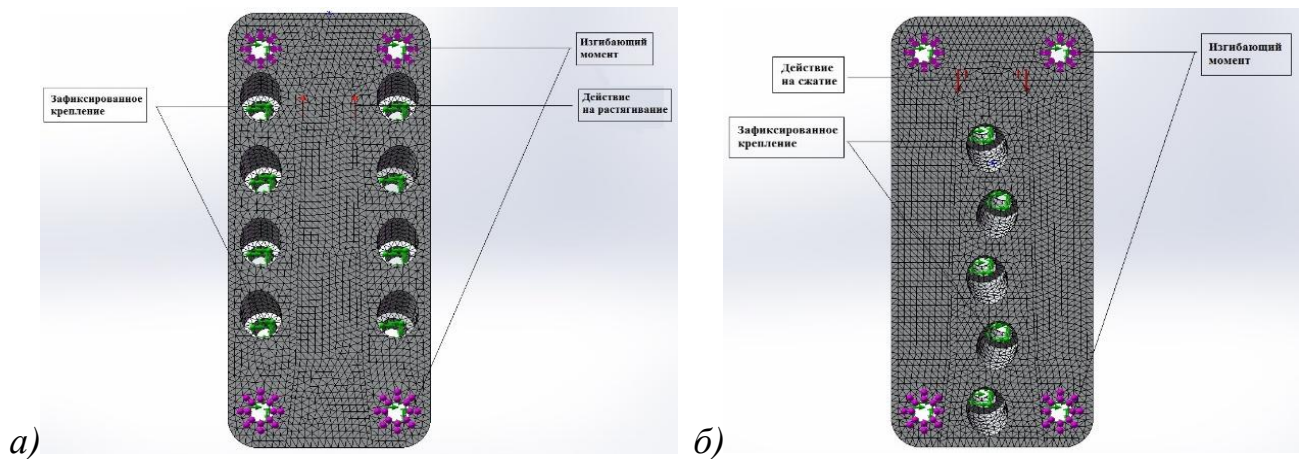


Рис. 4.23. Расположение мест приложения нагрузки и крепления соединения с учётом влияния эксцентриситета приложения нагрузки: *а*— для металлической накладки, которая крепится к стеновой панели из *CLT*; *б*— для металлической накладки, которая крепится к балке из *CLT* и *LVL*

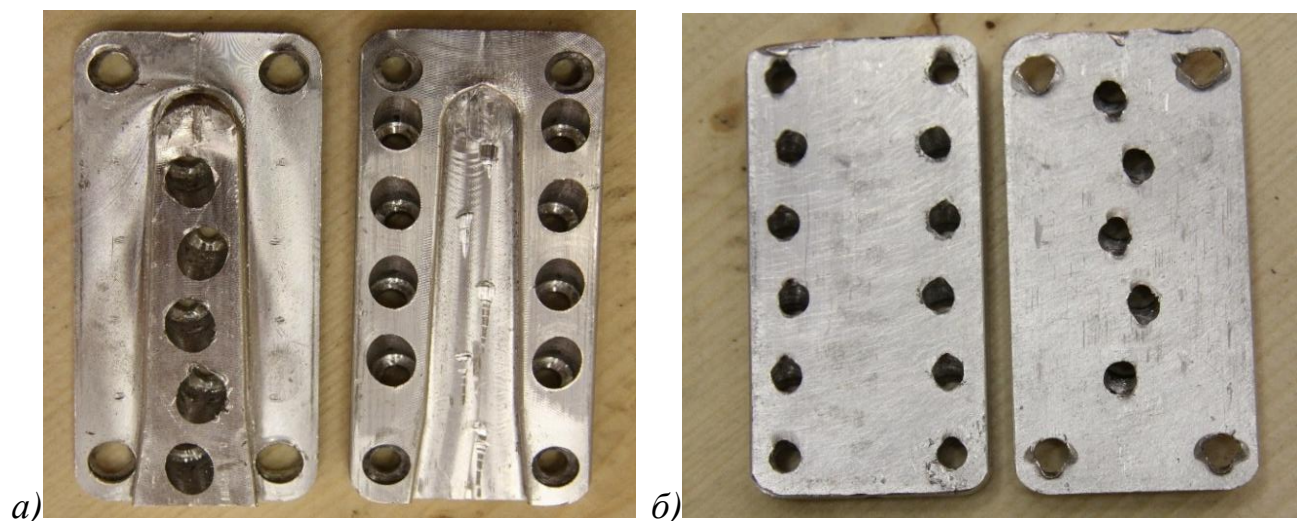


Рис.4.25. Виды разрушения металлических накладок с учётом влияния эксцентриситета приложения нагрузки: *а*— на лицевой стороне; *б*— на обратной стороне

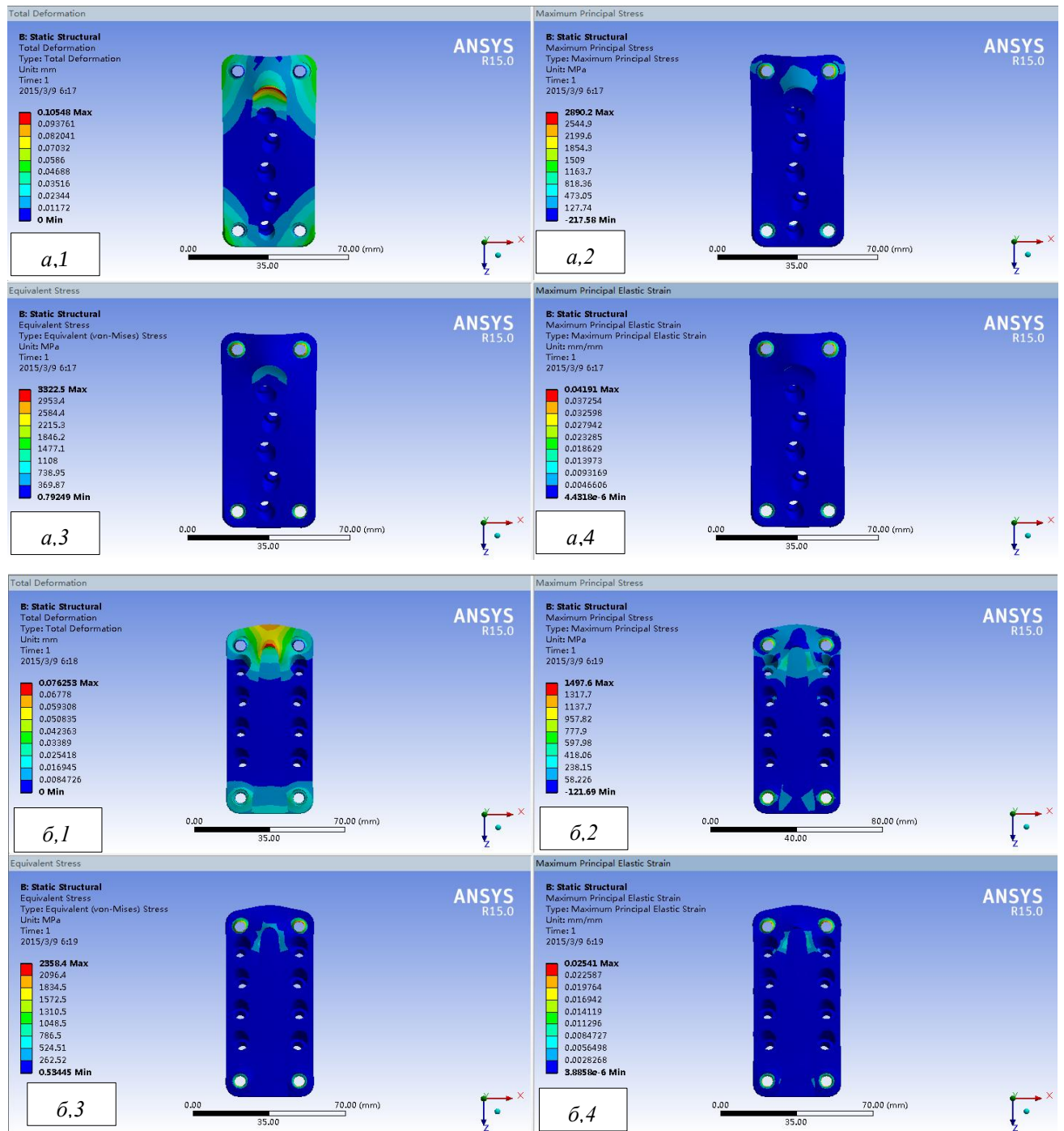


Рис. 4.24. Виды разрушения металлических накладок с учётом влияния эксцентриситета приложения нагрузки: *а, 1-4*) перемещение, напряжение в главном направлении, эквивалентных напряжений и деформация в главном направлении на металлической накладке в стеновой панели из *CLT*; *б, 1-4*) перемещение, напряжение в главном направлении, эквивалентных напряжений и деформация в главном направлении то же в балке из *CLT* и *LVL*

На рис. 4.24 и 4.25 видно, что с учётом влияния эксцентриситета приложения нагрузки на контактной зоне между выступами двух металлических накладок и в гнездах под шурупы появилось отчётливое перемещение. По сравнению с рис. 4.21 и 4.22 видно, что влияние эксцентриситета приложения нагрузки может приводить к большим пластичным разрушениям металлических накладок. Если при конструировании не учитывается влияние эксцентриситета приложения нагрузки на несущую способность соединения, расчётные результаты будут превышать фактическую несущую способность. Поэтому при расчёте несущей способности соединения должен учитываться коэффициент влияния эксцентриситета приложения нагрузки в соответствии с разделом. 2.8.

4.7.4. Сравнительный анализ

В разделе. 2.9 и 3.9 были проведены аналитические и экспериментальные исследования по определению эквивалентных напряжений и деформаций с использованием тензодатчиков. Сравнение зависимости деформации от напряжения на верхнем, среднем и нижнем поясе металлических накладок, которые крепятся к балке из *CLT* и *LVL*, представлены на рис. 4.25-4.27 в соответствии с графиками на рис. 4.28-4.30.

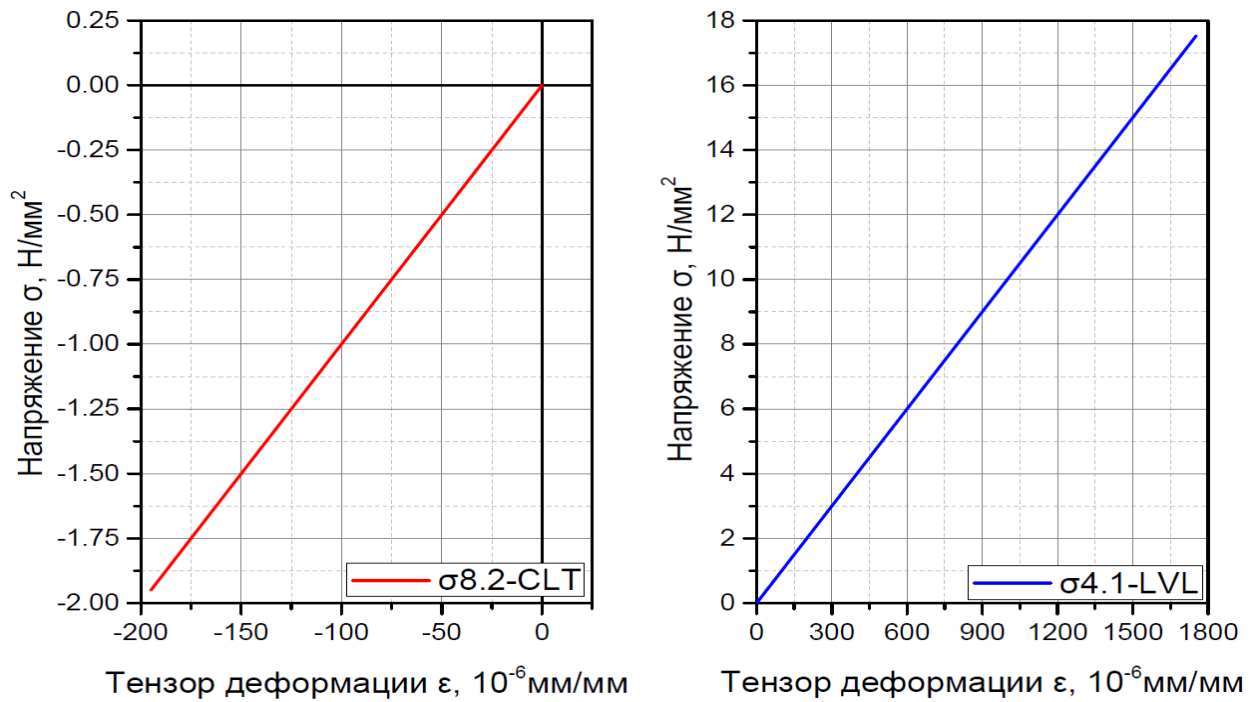


Рис. 4.26. Сравнение зависимости деформации от напряжения на верхнем поясе: слева— металлической наклейки, которая крепится к балке из *CLT*; справа— металлической наклейки, которая крепится к балке из *LVL*

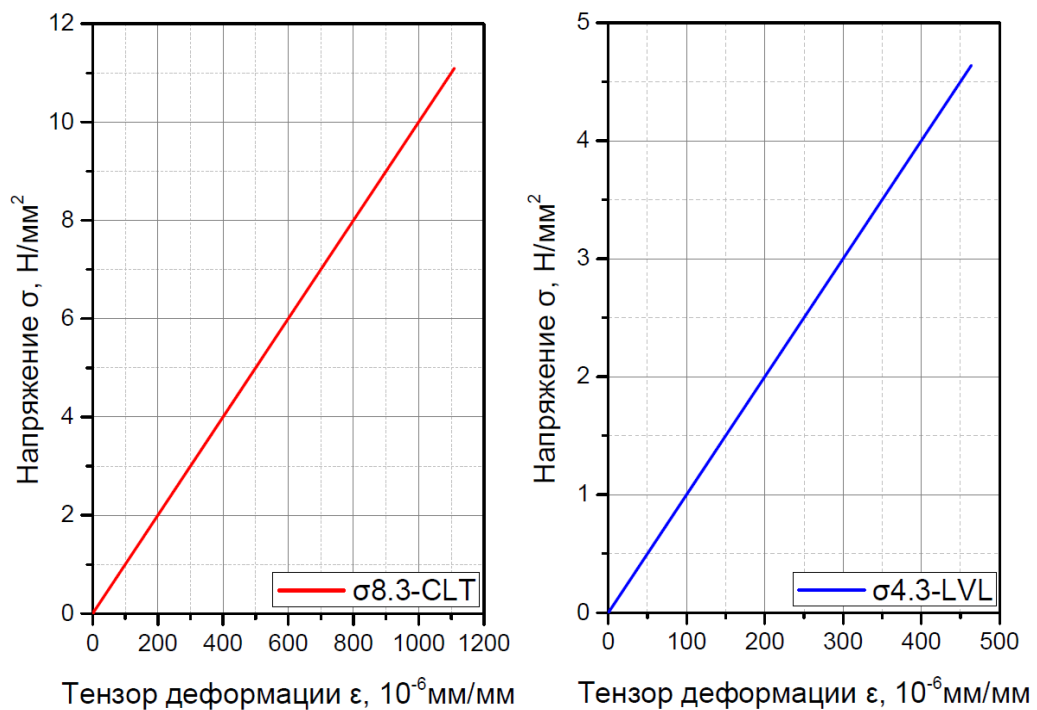


Рис. 4.27. Сравнение зависимости деформации от напряжения на среднем поясе алюминиевой наклейки: слева—металлической наклейки, которая крепится к балке из *CLT*; справа—металлической наклейки, которая крепится к балке из *LVL*

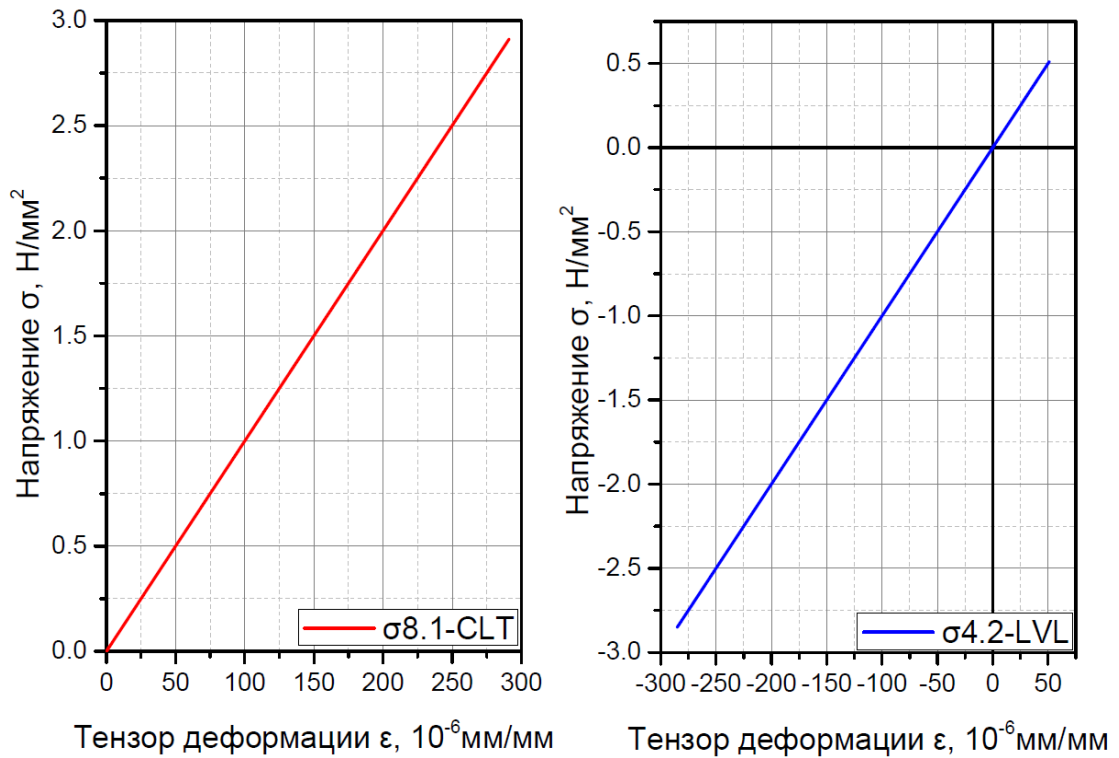


Рис. 4.28. Сравнение зависимости деформации от напряжения на нижнем поясе алюминиевой накладки: слева—металлической накладки, которая крепится к балке из *CLT*; справа—металлической накладки, которая крепится к балке из *LVL*

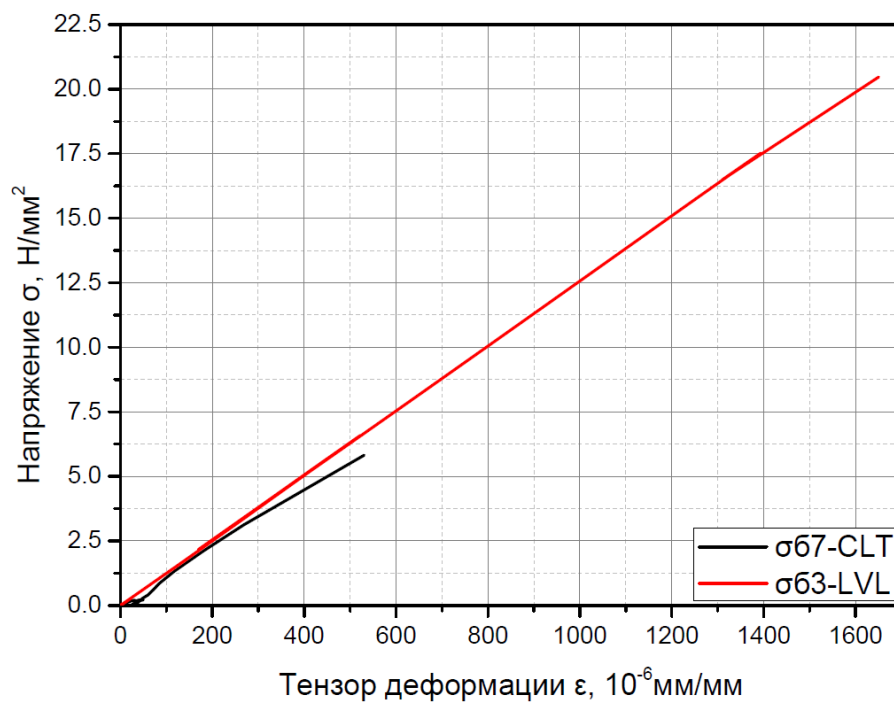


Рис. 4.29. Сравнение зависимости деформации от напряжения на верхнем поясе балки: красная сплошная линия— из *LVL*; чёрная сплошная линия— из *CLT*

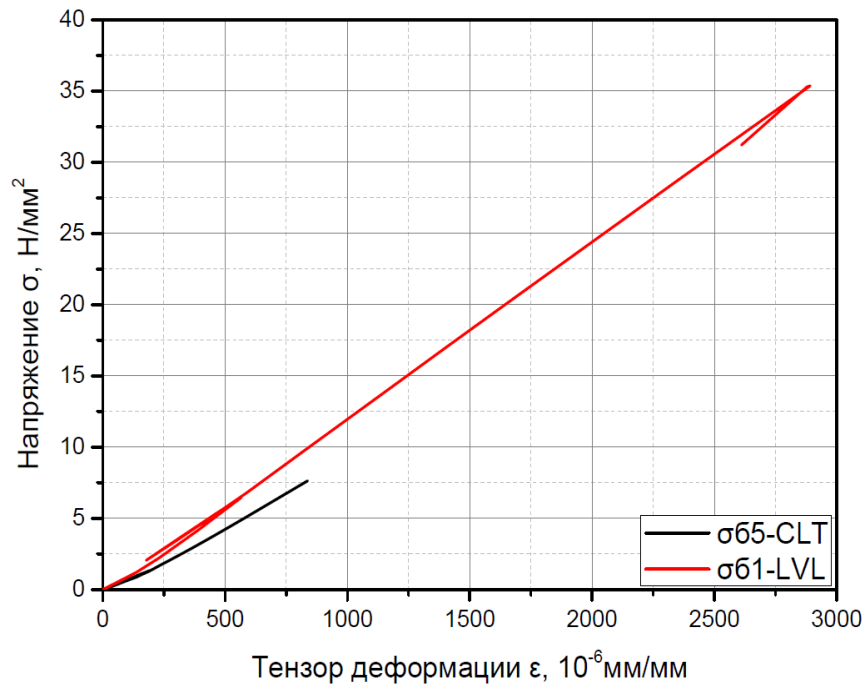


Рис. 4.30. Сравнение зависимости деформации от напряжения на среднем поясе балки: красная сплошная линия— из *LVL*; чёрная сплошная линия— из *CLT*

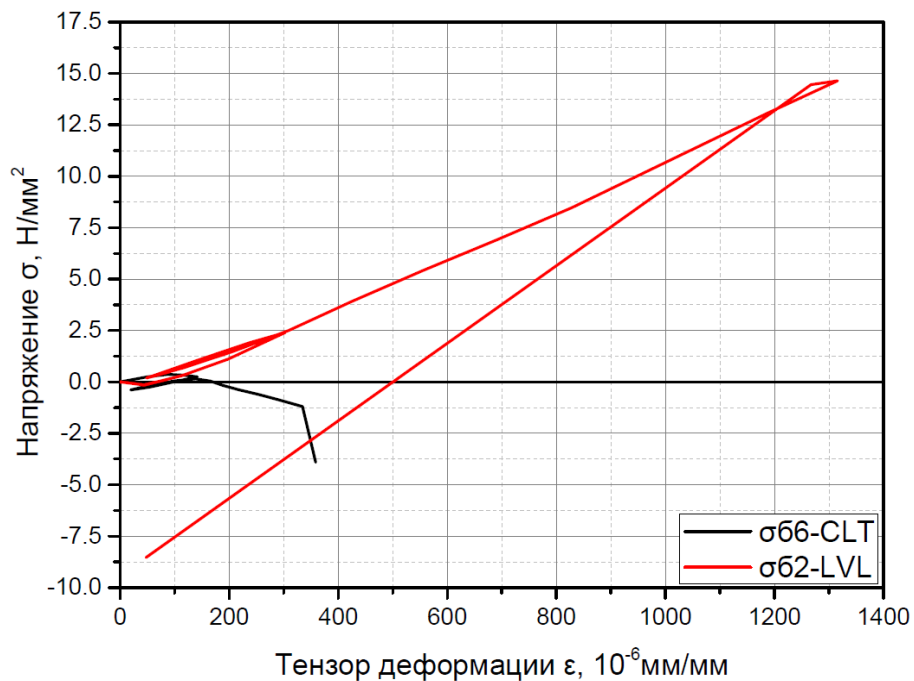


Рис. 4.31. Сравнение зависимости деформации от напряжения на нижнем поясе балки: красная сплошная линия— из *LVL*; чёрная сплошная линия— из *CLT*

Из рис. 4.26-4.31 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. В табл. 4.11 показано, что жёсткость (модуль упругости $E=11000$ МПа) для панели-*CLT* выше, чем материал из *LVL* (модуль упругости $E=10000$ МПа [79]), а отношения ширины к высоте 100/140 мм/мм для балки из *CLT* выше, чем 70/140 мм/мм для балки из *LVL* (см. табл. 3.12), поэтому комбинация из стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез имеет относительно меньше прогиб, напряжение и выше несущую способность, чем с балкой из *LVL*.

Для проверки достоверность предложенных методики в соответствии с разделами. 2.9 и 3.9 дополнительно были приложены одинаковые нагрузки на металлические накладки. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения главного напряжения и деформации с учётом влияния эксцентриситета представлены в табл.4.15 и 4.16 в соответствии с графиками на рис. 4.32-4.34.

Таблица 4.15

Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения главного напряжения на металлических накладках, 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 4.16

Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения главной деформации на металлических накладках, 10^{-6} мм/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

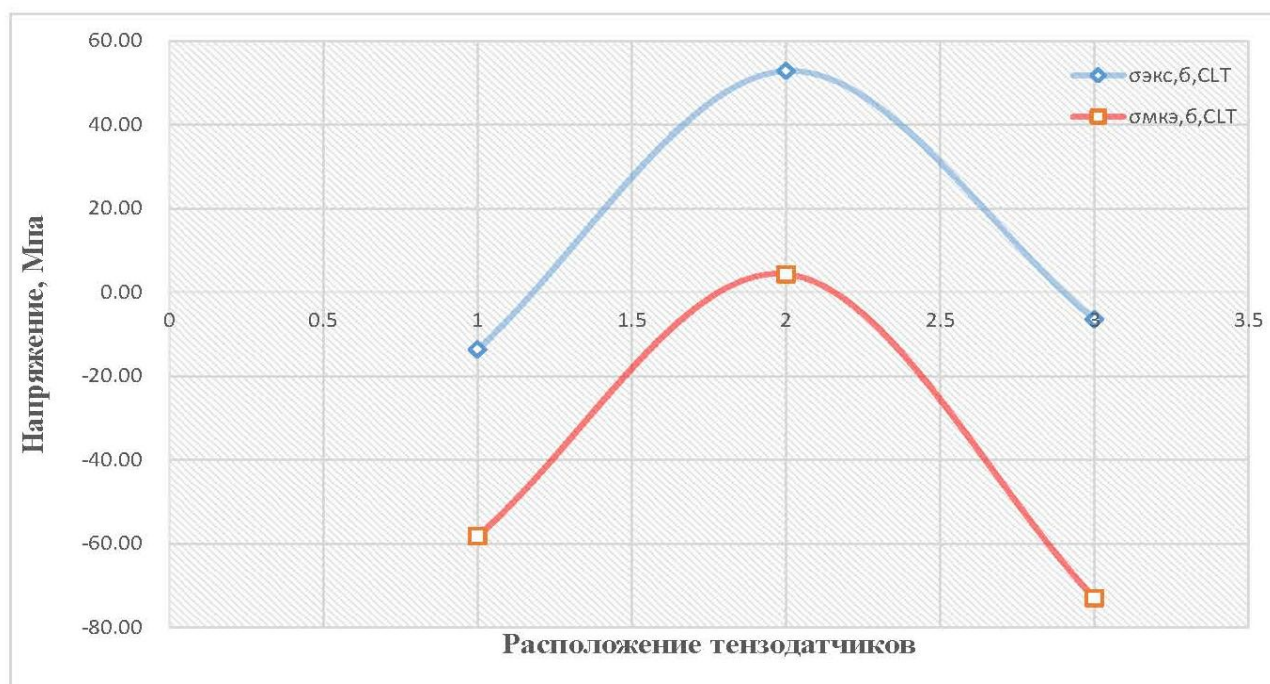


Рис. 4.32. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов определения главного напряжения на металлической накладке с учётом влияния эксцентриситета приложения нагрузки, которая крепится к балке из *CLT*

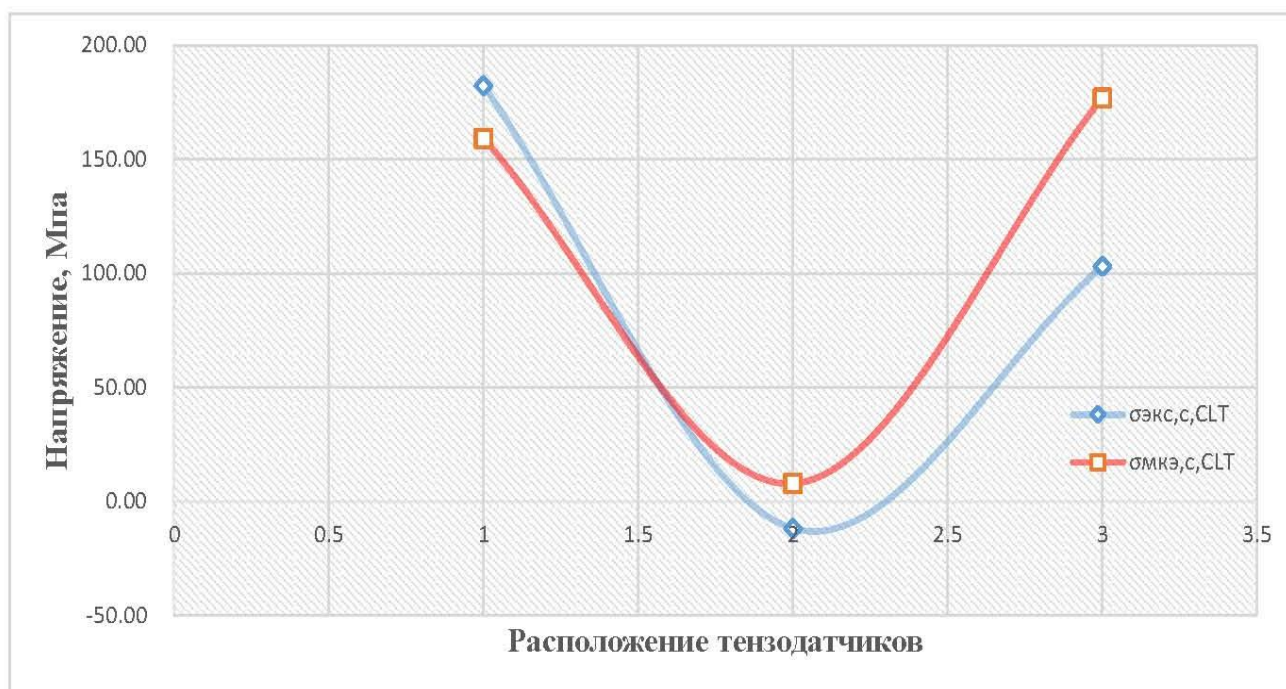


Рис. 4.33. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов для главного напряжения металлической накладки с учётом влияния эксцентриситета приложения нагрузки, которая крепится к стеновой панели из *CLT*

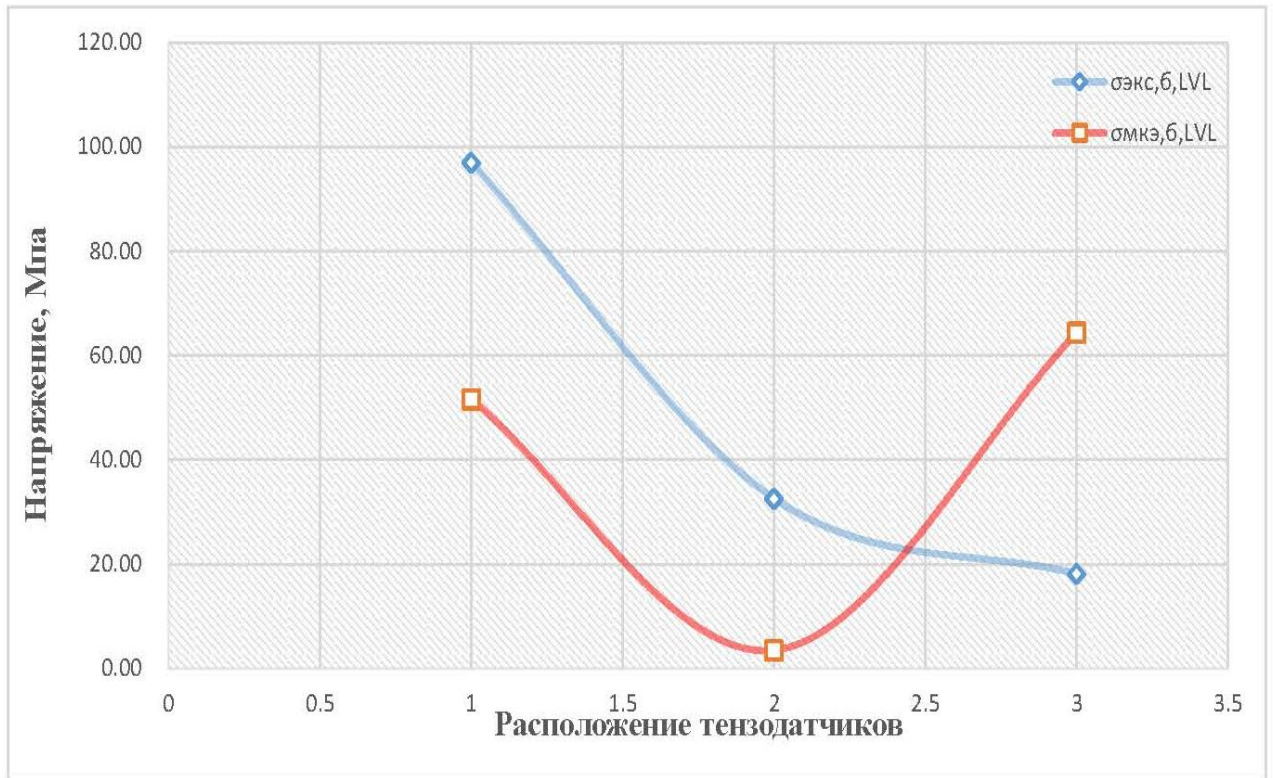


Рис. 4.34. Сравнение расчётных и экспериментальных результатов для главного напряжения металлической накладки с учётом влияния эксцентриситета приложения нагрузки, которая крепится к балке из *LVL*: 1— на верхнем поясе; 2— в середине пояса; 3— на нижнем поясе

Из табл. 4.15-4.16 и рис. 4.32-4.34 видно, что при расчёте по МКЭ получена удовлетворительная сходимость опытных и расчётных результатов в соответствии с разделом. 3.9. Сравнительным анализом подтверждено, что с использованием метода конечных элементов и программы *Ansys 15.0* можно исследовать напряженно-деформированное состояние на металлических накладках. Следовательно, при конструировании может осуществляться оценка несущей способности и совершенствование проектирования соединения.

4.8. Выводы по главе

1. Показана удовлетворительная сходимость аналитического и экспериментального исследования несущей способности шурупа на выдергивание из деревянных материалов из *CLT* и *LVL*, что подтверждает достоверность предложенной математической модели;

2. Показана удовлетворительная сходимость аналитического и экспериментального исследования несущей способности односрезного шурупа без укрепления и с МЗП в деревянных элементах из *CLT* и *LVL*, что подтверждает эффективность применения МЗП для повышения несущей способности соединения;

3. Показана удовлетворительная сходимость аналитического и экспериментального исследования несущей способности соединения на металлических накладках с укреплением МЗП в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* и *LVL* по сопротивлению шурупов на выдергивание и срез, что подтверждает эффективность и возможность повышения несущей способности соединения с применением МЗП;

4. Предложено оптимальное решение для совершенствования проектирования соединения на основе сравнительного анализа экспериментальных результатов с расчётной несущей способностью соединения на металлических накладках по критерию сопротивления шурупов на выдергивание;

5. Показана удовлетворительная сходимость аналитического и экспериментального исследования коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки, что подтверждает влияние эксцентриситета приложения

нагрузки на несущую способности соединения и достоверность аналитического алгоритма;

6. Получена трехмерная модель и определена несущая способность соединения на металлических накладках по МКЭ с использованием программы *Ansys 15.0* с учётом влияния эксцентриситета приложения нагрузки. Обоснована возможность проектирования и расчёта крепежа по МКЭ на основе сравнительного анализа расчётных и экспериментальных исследований напряженно-деформационного состояния металлических накладок, стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT* и *LVL*. На основе зависимости деформации от напряжения объясняются виды пластического разрушения соединения и показана достоверность и актуальность научно-исследованной работы автора для моделирования и расчёта несущей способности соединения;

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель расчёта несущей способности шурупа из соединения на металлических накладках типа *SHERPA* 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 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 для аналитического расчёта несущей способности соединения без укрепления и с металлической зубчатой пластиной в деревянных конструкциях из комбинации стеновой панели и балок;

5. Разработаны рекомендации для совершенствования проектирования соединения на металлических накладках при поперечных смещениях металлических накладок;

6. Предложена математическая модель расчёта коэффициента влияния эксцентриситета приложения нагрузки. Результаты исследований позволяют использовать полученный аналитический алгоритм при расчётах большепролетных конструкций;

7. Подтверждена достоверность и эффективность предложенных математических моделей 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*;

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**Статьи, опубликованные в 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.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Научно-исследовательские статьи

1. *Бойтемиров Ф.А.* Экспериментальное исследование совместной работы вклеенных стержней в деревянных конструкциях/ Бойтемиров Ф.А./ «Научное обозрение», № 7/2014, с.214-219.
2. *Бойтемиров Ф.А.* Расчет конструкций из дерева и пластмасс [Текст] : учеб. пособие для студ. вузов, обучающихся по направлению "Строительство" / Ф.А. Бойтемиров, В. М. Головина, Э. М. Улицкая ; под ред. Ф. А. Бойтемирова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Академия, 2007. – 160 с.
3. *Бойтемиров Ф.А.* Конструкции из дерева и пластмасс [Текст] : учебник для студентов учреждений высшего профессионального образования по направлению подготовки "Строительство" / Ф.А. Бойтемиров. - Москва : Академия, 2013. - 286 с.
4. *В.В. Пуртов*, канд. техн. наук, доц., *А.В. Павлик*, ст. Преподр: К расчету соединений элементов деревянных конструкций на металлических накладках и дюбелях, ISSN 0536-1052. Изв. вузов. Строительство. 2007. № 5.
5. *Глухих В. Н, Черных А. Г.* Анизотропия древесины. Технологический аспект: моногр. / Глухих В. Н, Черных А. Г.; СПбГАСУ. – СПб., 2013.- 240 с.
6. *Г.П. Албаут, В. В. Пуртов, А.В. Павлик, М.В. Табанюхова*, исследование соединений деревянных элементов на металлических зубчатых пластинах и дюбелях с зубчатыми шайбами поляризационно-оптическим методом при действии кратковременных нагрузок, Известия вузов 7/2007 г.
7. *Дмитриев П.А.* Исследование работы и расчет сопряжений деревянных элементов под углом на нагелях из круглой стали / П.А. Дмитриев // Сборник тр.

Моск. инж.-строит. института. 1953. — №13. - С.47-51.

8. *Дмитриев П.А.* Исследование прочности древесины на смятие в отверстиях при кратковременном и длительном действии нагрузки / П.А. Дмитриев // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1965. — №12. — С. 165-172.

9. *Дмитриев П.А.* Исследование деревянных элементов на дюбелях при действии кратковременных нагрузок / П.А. Дмитриев, Ю.Д. Стрижаков.

10. *Дурновский А.М.* «Разработка и исследование соединений деревянных конструкций металлическими зубчатыми пластинами», М. 1982, 22 стр.

11. *Иванов В.Ф.* Исследование работы нагельных соединений в пределах упругости / В.Ф. Иванов, Л.Н. Мальцев // Сб.тр. / Ленингр. ин-т коммун, хоз-ва. Л.: Госстройиздат, 1939. - Вып. 6. — С. 73-112.

12. *Кононов В.А.* «Расчет многонагельных соединений деревянных конструкций с учетом неточности их сборки и изготовления элементов», Ленинград, 1988.

13. *Котлов В.Г.* «Пространственные конструкции из деревянных ферм с узловыми соединениями на МЗП», Казань, 1992, 16 стр.

14. *Крицин А.В.* «Расчет сквозных деревянных конструкций на МЗП с учетом упруго-вязких и пластических деформаций», Нижний Новгород, 2004 г., 26 стр.

15. *Карлесен. Г.Г.* Деревянные конструкции/ Г.Г. Карлесен, В.В. Большаков и др. М.: Стройиздат. 1962.

16. *Лоскутова Д.В.* «Прочность и деформативность узловых соединений на МЗП в сквозных деревянных конструкциях», Томск, 2009 г., 24 стр.

17. *Леонтьев М.К.* Тензометрирование в авиационных газотурбинных двигателях: Учебное пособие. - М.: Изд-во МАИ, 2000. - 22 с.

18. *Лабудин Б.В.* Требования к надежности и безопасности большепролетных клееных деревянных конструкций [Текст]/ Е.Н. Серов, Б.В. Лабудин, В.И.Мелехов.//Известия вузов. Лесной журнал. -2012, -№ 3. – С. 143-147.
19. *Лабудин Б.В.* К вопросу восстановления деревянных конструкций купола Троицкого Собора в Санкт-Петербурге [Текст]/ Е.Н. Серов, А.Е. Серов, Б.В.Лабудин, Р.Б. Орлович, С.А. Лабутов //Известия вузов. Лесной журнал. 2010, № 2.
20. *Лабудин Б.В.* Клееные деревянные конструкции: состояние и проблемы развития [Текст]/ Е.Н. Серов, Б.В. Лабудин//Известия вузов. Лесной журнал. 2013, № 2.
21. *Лабудин Б.В.* Расчет композитных деревоклееных балок на основе применения инженерного метода[Текст] / С.И. Рощина, М.В. Лукин, Б.В. Лабудин, В.И. Мелехов //Лесной журнал. 2012, № 3.
22. *Лабудин Б.В.* Требования к надежности и безопасной эксплуатации большепролетных клееных деревянных конструкций[Текст] /А.В. Карельский, Б.В.Лабудин, В.И. Мелехов // Известия вузов. Лесной журнал. 2012, № 3.
23. *Лабудин Б.В.* Расчет композитных деревоклееных балок на основе применения инженерного метода [Текст]/ С.И. Рощина, М.В. Лукин, Б.В. Лабудин, В.И.Мелехов//Известия вузов. Лесной журнал. -2012, -№ 3. – С. 143-147.
24. *Ломакин А.Д.* Глубокая пропитка древесины средствами защиты от биоразрушения и возгорания [Текст] / А. Д. Ломакин // Строительные материалы. - 2012. - N 6. - С. 74-77.
25. *Ломакин А.Д.* Пропитка древесины способом нанесения на поверхность [Текст]

/ А. Д. Ломакин // Строительные материалы. - 2012. - N 7. - С. 110-112 .

26. *Ломакин А.Д.* Защита фасадных поверхностей деревянного дома [Текст] / А. Д. Ломакин // Жилищное строительство. - 2013. - N 2. - С. 51-55.

27. *Никитин Г.Г.* Расчет нагельных соединений с учетом деформаций, развивающихся во времени. Дисс. ... канд. техн. наук. – Ленинград, 1964 г. 192 с.

28. *Никитин Г.Г.* Вопросы применения и расчета нагельных соединений / Г.Г. Никитин // Сборник научных трудов. Вып. 34. ЛИСИ, 1961. — С. 5659.

29. *Николаи Б.Л.* Теория расчета нагельных соединений в деревянных конструкциях / Б.Л. Николаи // Харьков: ДНТВУ, 1935. 64 с.

30. *Николаи Б.Л.* Теория'расчета нагельных соединений в деревянных конструкциях / Б.Л. Николаи // Харьков: ДНТВУ, 1935. 64 с.

31. *Найчук А.Я., Бабаев М.В.* К вопросу оценки несущей способности стальных винтовых стержней, завинченных под углом к волокнам древесины // Журнал Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 1. С. 21 -23.1

32. *Наумов А.К.* Исследование соединений легких деревянных несущих конструкций на металлических зубчатых пластинах. – Дисс. ... канд. техн. наук, - М.,1978. – 143 с.

33. *Пятикрестовский К.П.* Теоретические вопросы учета совместной работы настилов из анизотропных материалов с каркасом пространственных конструкций при длительных нагрузках / Вестник ОАО «НИЦ «Строительство» Исследования по теории сооружений». Вып. 2, 2010.

34. *Пятикрестовский К.П.* Метод интегральных оценок в расчете пространственных деревянных конструкций на длительные нагрузки // Сб. тр.

Международной научно-практической конференции. — М. : МГСУ, 2010. С. 364—375.

35. *Пятикрестовский К.П., Ху н а го в Х.С.* Обоснование зависимостей между интенсивностями напряжений и деформаций для нелинейного расчета деревянных конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. — М., 2011. № 1. С. 62—69.

36. *Пятикрестовский К.П., Соколов Б.С.* Вопросы напряженно-деформированного состояния обшивок ребристых многогранных покрытий из древесины // Строительная механика и расчет сооружений. — М., 2011, № 3. С. 45—50.

37. Погорельцев А.А. Расчет растянутых стыков КДК на вклеенных стержнях [Текст] / А.А. Погорельцев // Строительная механика и расчет сооружений. - 2013. - N 4. - С. 28-33.

38. *Погорельцев А.А.* Испытание опорного узла металлодеревянной фермы покрытия конноспортивного манежа [Текст] / А.А. Погорельцев // Промышленное и гражданское строительство. - 2013. - N 10. - С. 42-44.

39. *Пуртов В.В.* « Легкие деревянные стропильные фермы с соединениями на стельных пластинах и дюбелях», Новосибирск, 1989, 23 стр.

40. *Пискунов Ю.В.* Влияния конструктивных параметров нагельных пластин на прочность и жесткость соединений деревянных конструкций / Ю.В. Пискунов, С.М. Чернявский // Р.Ж.-Сер. 10. Вып. 5. - М.,1982. -15 с.

41. *Пискунов Ю.В.* Несущие деревянные конструкции с соединениями на нагельных пластинах и элементах /Ю.В. Пискунов // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. 1988. - №6. — С. 13-17.

42. *Руководство- SHERPA* / Fa. Harrer GmbH / Frohnleiten, AT / 2010.
43. *Слицкоухов Ю.В.* Конструкции из дерева и пластмасс. Москва, изд.: "Стройиздат" 1986 г. — 336 с.
44. *Серов Е.Н.* Проектирование деревянных конструкций [Текст]: учеб. пособие/ Серов Е.Н., Санников Ю.Д., Серов А.Е. — М.: Издательство АСВ, 2011. — 536 С.
45. *Серов Е.Н.* Применение клееных деревянных конструкций в спортивных сооружениях [Текст]/Серов Е.Н.// Конструкции из клееной древесины и пластмасс/Лиси. — Л., 1980. — С. 5-9.
46. *Серов Е.Н.* Проектирование клееных деревянных конструкций. Ч. 3. Проектирование рам с криволинейными участками и арок [Текст]: учеб. пособие/ Серов Е.Н., Санников Ю.Д.; Под ред. Серов Е.Н.; СПб гос. Архит.-строит. Ун-т. — СПб., 1999. — 160с.
47. *Тимошенко С. П.* Курс сопротивления материалов. — Киев: Изд-во кн. маг. Л. Идзиковского, 1911. — 163 с.
48. *Черных А.Г.* Технология защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов. Учебное пособие. Братск, 1996.
49. *Черных А.Г.* Исследование соединений деревянных конструкций из «ULTRALAM» на цилиндрических нагелях в зависимости от комбинации соединяемых элементов. Отчет о научно-исследовательской работе. СПбГАСУ, 2011.
50. *Черных А.Г.* Расчет с применением ЭВМ напряженно-деформированного состояния несущих конструктивных элементов и их прочностные

характеристики/учеб. пособие / под общей ред. А.Г. Черных, В. В. Шелофаста. – СПбГАСУ, 2012. – 112 с.

51. *Чернявский С. М.* «Соединения элементов деревянных конструкций на нагелях, закрепленных в металлических пластинах», м., 1987, 23 стр.

52. *A. Ceccotti, M. P. Lauriola, M. Pinna, C. Sandhaas*, SOFIE Project – Cyclic Tests on Cross-Laminated Wooden Panels, Proceedings WCTE, Portland, USA, 2006.

53. *Bejtka, I., Blaß, H. J.*: Joints with Inclined Screws, Working Commission 18 – Timber Structures, Meeting Thirty-Five, paper CIB-W18/35-7-4, 12 pages, Kyoto, 2002.

54. *Blaß H.J., Uibel T.*, „Bemessungsvorschläge für Verbindungsmittel in Brettspertholz“, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe (TH), Jahr 2007.

55. *Blaß H. J.; Uibel, T.*: Tragfähigkeit von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brettspertholz, Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau, Band 8, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen (Hrsg.), Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2007.

56. *Blaß H.J., Görlacher, R.*, „Bemessung im Holzbau – Brettspertholz – Berechnungsgrundlagen“, Holzbaukalender 2003, Bruderverlag, Karlsruhe, 2003, Seiten: 580-598.

57. *Blaß H.J.; Schmid, M.; Werner, H.*: Verstärkung von Verbindungen, Bauen mit Holz, Heft 9, 2001.

58. *Blass, Hans Joachim, Laskewitz Bernd*: Tragfähigkeit von Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln und Zwischenschichten, Erschienen in Bauen mit Holz,

Fakult ä für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften (BGU) Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine (VAKA), Jahr 2003, Seitenangabe: 26-35.

59. *Bosl, R.*: „Zum Nachweis des Trag- und Verformungsverhaltens von Wandscheiben aus Brettsperrholz“, Dissertation, eingereicht am Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Universität der Bundeswehr München, J ä n n e r 2002.

60. *Brandner R.*, „Stochastic System Action and Effects in Engineered Timber Products and Structures“, Dissertation in Bearbeitung, voraussichtliche Fertigstellung 2012.

61. DI.Hanns. Schinner: Befestigung von Holzbauteilen auf Stahlbetonuntergr ü n d e n mit Hilfe von Systemverbindern, Internationales Holzbau-Forum 2012, TU Graz, Seiten 1-18.

62. *Frese M., Fellmoser P., Blaß H.J.*, „Modelle für die Berechnung der Ausziehtragf ä h i g k e i t von selbstbohrenden Holzschrauben“, Universität Karlsruhe (TH), Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Springer Verlag, Jahr 2009.

63. *Hübner U.*, „Auszieh Widerstand von Holzbauschrauben in Brettsperrholz - Aktivit ä t e n und Ergebnisse im Bereichszeitraum“, holz.bau forschungs gmbh.

64. *Jeitler G.*: „Versuchstechnische Ermittlung der Verdrehungskenngrößen von orthogonal verklebten Brett lamellen“, Diplomarbeit, eingereicht am Institut für Stahlbau, Holzbau und Fl ä c h e n t r a g w e r k e, TU Graz, November 2003.

65. *Johansen, K. W.*: Theory of Timber Connections. In: International Association of Bridge and Structural Engineering, 1949.

66. *Kevarinmäki, A., Kangas, J., Nokelainen, T., und Kanerva, P.* 1995. Nail-plate reinforced bolt joints of Kerto-FSH structures. Publication 51, Helsinki University of Technology/LSEBP, ISSN 0783-9634. 23 p.

67. *Manfred. Augustin, Georg. Flatscher*: Nachweisführung für SHERPA-Verbindungen auf Basis des SHERPA-Handbuchs, Internationales Holzbau-Forum 10, TU Graz, Seiten 1-16.
68. *Manfred. Augustin*: Abtragung hoher Lasten mit Sherpa-Systemverbindern, Internationales Holzbau-Forum 09, TU Graz, Seiten 1-15.
69. *Moosbrugger, T., Guggenberger, W., Bogensperger, T.*, „Cross-Laminated Timber Wall Segments under homogeneous Shear – with and without Openings“, WCTE 2006, 9th World Conference on Timber Engineering, 2006, Seite: 72 (1-10).
70. *Pirnbacher G.*, „Beanspruchungs- und Optimierungspotentiale selbstbohrender Holzschrauben“, Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz, Internationales Holzbau-Forum 09.
71. *Plieschounig St.*, „Ausziehverhalten axial beanspruchter Schraubengruppen“, Masterarbeit, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz, Jahr 2010.
72. *Schickhofer et al.*, „BSPhandbuch, Holz-Massivbauweise in Brettsperrholz, Nachweise auf Basis des neuen europäischen Normenkonzept“, Institut für Holzbau und Holztechnologie und holz.bau forschungs gmbh, Jahr 2010.
73. *Schickhofer, G., Katzensgruber, R., Hasewend, B., Ebner, H., Höfler, K.*, „Holzmassivbauweise“, Mehrgeschossiger Holzbau in Österreich, proHolz Information, ISSN1680-4252, Februar 2002, Seiten: 111-137.
74. *Strassmann B.*, Die Zeit, „Die Kunst des Anziehens“, Ausgabe Nr. 14 vom 31.03.2005 Schickhofer, Skriptum „Holzbau, Nachweisführungen für Konstruktionen

aus Holz“, Institut für Holzbau & Holztechnologie, Technische Universität Graz, Jahr 2006.

75. *T. Bogensperger, F. Hude*: Entwicklung einer hoch beanspruchbaren Verbindung für Haupt-Nebenträger-Anschlüsse, Grazer Holzbau-Fachtagung, holz.bau forschung gmbh, TU Graz, 2007, Setiten H1-H16.

76. *Whale, L. R. J., Smith, I*: Mechanical Timber Joints, Research Report 18/86, Timber Research and Development Association TRADA, USA, 1986.

77. *Yasumura, M*: Mechanical Properties of Dowel Type Joints unter Reversed Cyclic Lateral Loading, Working Commission 18 - Timber Structures, Proceedings Meeting 31, Savonlinna, CIB-W18/31-7-1, 9 pages, 1998.

78. << 木结构设计手册 >>, 中国建筑工业出版社, 2005, 页数 84-91(<<Руководство деревянных конструкций>>, Китайское строительное промышленное издательство, 2005, стр. 84-91).

Строительные нормы и правила

79. *СП 64-13330-2011*: Свод правил. Деревянные клееные и цельнодеревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80., М.: Минрегион России, 2011 г.

80. Рекомендации по испытанию соединений деревянных конструкций. ЦНИИСК. Москва, Стройиздат, 1981 г.

81. *СП 20.13330.2011*. Свод правил. Нагрузка и воздействия Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85., М.: Минрегион России, 2011 г.

82. *ГОСТ 8486-86*. Пиломатериалы хвойных пород. Технические условия. - Введ. 1986-11-30. -М.: изд-во стандартов,1986. -10с
83. *ГОСТ 16483.7-71*. Древесина. Методы определения влажности. Москва, 1971 г.
84. *СНиП II-7-81*. Свод правил. Строительство в сейсмических районах (С изменениями и дополнениями) . М.: Минрегион России, 1982 г.
85. *ГОСТ 16483.1-84*. Древесина. Методы определения плотности. Москва, 1984 г.
86. *СмАДД-3.0-11*. «Деревянные конструкции. Проектирование соединений деревянных элементов с использованием винтов и шурупов». СПб.: 2011.
87. *СмАДД-3.2-2012*. Деревянные конструкции Соединения деревянных элементов с использованием зубчатых пластин. Санкт-Петербург, 2012 г.
88. *СмАДД-3.1-11*. «Соединения на гвоздях, винтах и шурупах. Требования и методы испытаний». СПб.: 2011.
89. *BS EN 755-2:2008*. Aluminium and aluminium alloys. Extruded rod/bar, tube and profiles. Mechanical properties.
90. *DIN 1052:2008*: Entwurf , Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken- Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau”.
91. *EN 1995-1-1:2004*: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauteilen – Teil 1-1:Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau, Europ äisches Komitee für Normung(CEN), Br üssel, 2004.
92. *enBR:2007*: Eurocodenahe Bemessungsrichtline, Holzbauwerke – Entwurf, Berechnung und Bemessung, Kompetenzzentrum holz.bau forschungs gmbh, Technische Universit ä Graz, Graz, 2007.

93. *Europäische technische Zulassung ETA-12/0067*, Sherpa Serien XS, S, M, L, XL und XXL.

94. *ÖNORM EN 1995-1-1:2009*: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten, Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau.

95. *SIA 265:2003*. Bauwesen - Holzbau, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, 2003.

Электронные ресурсы

96. Деревянное здание «Stadthaus» [Электронный ресурс]. — Режим доступа :

<http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-22097/stadthaus-24-murray-grove-waugh-thistleton-architects/512787e7b3fc4b11a7001eb5>.

97. Официальный сайт для Ассоциации деревянного домостроения : Общие сведения о истории развития соединения SHERPA [Электронный ресурс]. —

Режим доступа: <http://www.npadd.ru/reestr/2200->.

98. Официальный сайт для компании SHERPA: Список серий продукции типа SHERPA [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://en.sherpa-connector.com/>.

99. Обзор о характеристик SHERPA и других типов соединения [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://artiva.lv/photo/files/sherpa_why_use_sherpa.pdf.

100. Школа «Открытая академия» [Электронный ресурс]. — Режим доступа:

<http://www.klhuk.com/portfolio/education/open-academy,-norwich.aspx>;

<http://www.sheppardrobson.com/architecture/view/the-open-academy>.

101. Обзор о развитии деревянных конструкций [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://woodproducts.fi/ru/content/naibolee-rasprostranennye-stroitelnye-konstrukcii>.

102. Обзор о соединении на металлических зубчатых платинах [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://derevok.narod.ru/publ/soedinenija_na_metallicheskih_zubchatykh_plastinakh/1-1-0-22.
103. Обзор о прочностных характеристик соединения на металлических зубчатых платинах [Электронный ресурс]. — Режим доступа : http://ostroykevse.ru/Obrabotka_dereva/Soedinenie_Dereva_6.html.
104. Официальный сайт компании Rautaruukki. Обзор о физико-механических характеристик материала EN 6082 [Электронный ресурс]. — Режим доступа : <http://www.ruukki.com/>.
105. Официальный сайт компании BBA. Обзор о физико-механических характеристик металлических зубчатых пластин [Электронный ресурс]. —Режим доступа: <http://www.bbacerts.co.uk/>..
106. Обзор о ветровой нагрузке. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.onduline.ru/blog/chto-takoe-vetrovaya-nagruzka>.
107. ANSYS 14.0 Help. (2011a). "ANSYS 14.0 Help, Basic ANSYS Guide."
108. ANSYS 14.0 Help. (2011b). "ANSYS 14.0 Help, Mechanical APDL, Element Reference."
109. IBM SPASS Statistics, 2011. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.csun.edu/sites/default/files/statistics20-briefguide-32bit.pdf>.
110. Mathcad 14.0 User's Guide, 2014. [Электронный ресурс].
111. Origin 9.1 User Guide, 2013. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://cloud.originlab.com/pdfs/Origin91_Documentation/English/Origin_9.1_User_Guide_E.pdf
112. SolidWorks 2014 Tutorial with Video Instruction, 2014. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.sdcpublications.com/pdfsample/978-1-58503-855-8-1.pdf>.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Содержание научных экспериментальных исследований

1. Эксперимент №. 1— Определение несущей способности крепежа типа *SHERPA* в соединениях деревянной конструкции стеновой панели из *CLT* с балкой из *CLT*;
2. Эксперимент №. 2— Определение несущей способности крепежа типа *SHERPA* в соединениях деревянной конструкции стеновой панели из *CLT* с балкой из *LVL* ;
3. Эксперимент №. 3— Определение несущей способности крепежа типа *SHERPA* в соединениях деревянной конструкции стеновой панели из *CLT* с балкой из *CLT*;
4. Эксперимент №. 4— Определение несущей способности крепежа типа *SHERPA* по критерию сопротивления шурупов на выдергивание в соединениях деревянной конструкции стеновой панели с балкой из *CLT*;
5. Эксперимент №. 5— Определение несущей способности крепежа типа *SHERPA* по критерию сопротивления шурупов на выдергивание в соединениях деревянной конструкции стеновой панели из *CLT* с балкой из *LVL*;
6. Эксперимент №. 6— Определение несущей способности крепежа типа *SHERPA* с укреплением МЗП в соединениях деревянной конструкции стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL*;
7. Эксперимент №. 7— Определение несущей способности крепежа типа *SHERPA* с укреплением МЗП в соединениях деревянной конструкции стеновой панели из *CLT* и балки из *CLT*;
8. Эксперимент №. 8— Определение несущей способности односрезного шурупа с металлической накладкой на широкой стороне панели из *CLT*;
9. Эксперимент №. 9— Определение несущей способности односрезного шурупа с металлической накладкой на деревянном элементе из *LVL* вдоль волокон;
10. Эксперимент №. 10— Определение несущей способности односрезного шурупа с металлической накладкой на узкой стороне панели из *CLT*;
11. Эксперимент №. 11— Определение несущей способности односрезного шурупа с металлической накладкой на широкой стороне панели из *CLT* под углом 45° к волокнам;
12. Эксперимент №. 12— Определение несущей способности односрезного шурупа на металлической накладке с укреплением МЗП на узкой стороне панели из *CLT*;

13. Эксперимент №. 13— Определение несущей способности односрезного шурупа на металлической накладке с укреплением МЗП на широкой стороне панели из *CLT*;
14. Эксперимент №. 14— Определение несущей способности односрезного шурупа на металлической накладке с укреплением МЗП на деревянном элементе из *LVL* вдоль волокон;
15. Эксперимент №. 15— Определение несущей способности МЗП на срез на узкой стороне панели-*CLT*;
16. Эксперимент №. 16— Определение несущей способности МЗП на срез на широкой стороне панели-*CLT*;
17. Эксперимент №. 17— Определение несущей способности МЗП на срез на балке из *LVL* вдоль волокон;
18. Эксперимент №. 18— Определение несущей способности шурупов на выдергивание из широкой стороны панели из *CLT*;
19. Эксперимент №. 19— Определение несущей способности шурупов на выдергивание из узкой стороны панели-*CLT*;
20. Эксперимент №. 20— Определение несущей способности шурупов на выдергивание из деревянного элемента из *LVL* вдоль волокон;
21. Эксперимент №. 21— Определение несущей способности МЗП на растяжение;
22. Эксперимент №. 22— Определение нормативной плотности материалов из *CLT* и *LVL*;

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Оптимизация расчётных формул по определению прочности при смятии в гнезде древесины и сопротивления шурупа при изгибе

Оптимизация расчётных формулы определения прочности при смятии в гнезде древесины (табл. 2.1) и сопротивления шурупа при изгибе (табл. 2.2) на основе предложенных уравнений в соответствие с разделом. 2.3 для расчёта несущей способности соединения деревянных элементов элементов из *CLT* и *LVL* на металлической накладке шурупа на срез по различным нормам и научным исследованиям. Для того, чтобы найти оптимальные формулы, у которых полученных расчётных результатов должны быть достаточно близки к экспериментальным: на широкой стороне панели из *CLT* 1638,31 Н; на узкой стороне панели из *CLT* 1641,76 Н; вдоль волокон *LVL* 1294,13 Н, позволяет в этих комбинации вполне допустимо в качестве очередного приближения к решению данных экспериментальных исследований описанной модели с учётом отечественных условий.

1. На широкой стороне стеновой панели из *CLT*

Таблица Б.1

Модель от нормы *EN 1995-1-1-2009* [66]

$f_{h,0,k}$ $M_{y,d}$	<i>SIA 265:2003</i>	<i>EN 1995-1-1:2004</i> <i>DIN 1052:2004</i> <i>enBR:2007</i>	<i>TU Graz</i> <i>Institut für Holzbau</i> <i>und Holztechnologie</i>	<i>H.J. Blaß</i>
<i>ENV 1998-1-1:1993</i>	2568	2376	2393	1443
<i>SIA 265:2003</i>	2829	2612	2632	1559
<i>EN 1995-1-1:2004</i> <i>DIN 1052:2004</i> <i>enBR:2007</i>	2821	2605	2624	1556
<i>L. Whale, I. Smith</i>	2837	2619	2639	1563
В.В.Пуртов	2240	2605	2624	1556

Модель от Blass. Hans Joachim u Laskewitz. Bernd [33]

$f_{h,0,k}$ $M_{y,d}$	SIA 265:2003	EN 1995-1-1:2004 DIN 1052:2004 enBR:2007	TU Graz Institut für Holzbau und Holztechnologie	H.J. Blaß
ENV 1998-1-1:1993	1863	1700	1715	901,895
SIA 265:2003	2091	1906	1922	1003
EN 1995-1-1:2004 DIN 1052:2004 enBR:2007	2083	1899	1916	1000
L. Whale u I. Smith	2097	1912	1928	1006
В.В.Пуртов	1578	1899	1916	1000

Модель от В. В. Пуртова и А. В. Павлика [1]

$f_{h,0,k}$ $M_{y,d}$	SIA 265:2003	EN 1995-1-1:2004 DIN 1052:2004 enBR:2007	TU Graz Institut für Holzbau und Holztechnologie	H.J. Blaß
ENV 1998-1-1:1993	10100	8573	8709	2396
SIA 265:2003	10100	8577	8713	2397
EN 1995-1-1:2004 DIN 1052:2004 enBR:2007	10100	8577	8713	2397
L. Whale u I. Smith	10100	8577	8714	2397
В.В.Пуртов	10090	8577	8713	2397

Китайская модель [53]

$f_{h,0,k}$ $M_{y,d}$	SIA 265:2003	EN 1995-1-1:2004 DIN 1052:2004 enBR:2007	TU Graz Institut für Holzbau und Holztechnologie	H.J. Blaß
ENV 1998-1-1:1993	3081	2544	2591	635,133
SIA 265:2003	3081	2544	2591	635,133
EN 1995-1-1:2004 DIN 1052:2004 enBR:2007	3081	2544	2591	635,133
L. Whale u I. Smith	3081	2544	2591	635,133
В.В.Пуртов	3081	2544	2591	635,133

Модель от DIN 1052 [65]

$f_{h,0,k}$ $M_{y,d}$	SIA 265:2003	EN 1995-1-1:2004 DIN 1052:2004 enBR:2007	TU Graz Institut für Holzbau und Holztechnologie	H.J. Bläß
ENV 1998-1-1:1993	1971	1838	1850	1120
SIA 265:2003	2180	2030	2044	1220
EN 1995-1-1:2004 DIN 1052:2004 enBR:2007	2173	2024	2038	1217
L. Whale u I. Smith	2186	2035	2049	1223
В.В.Пуртов	1709	2024	2038	1217

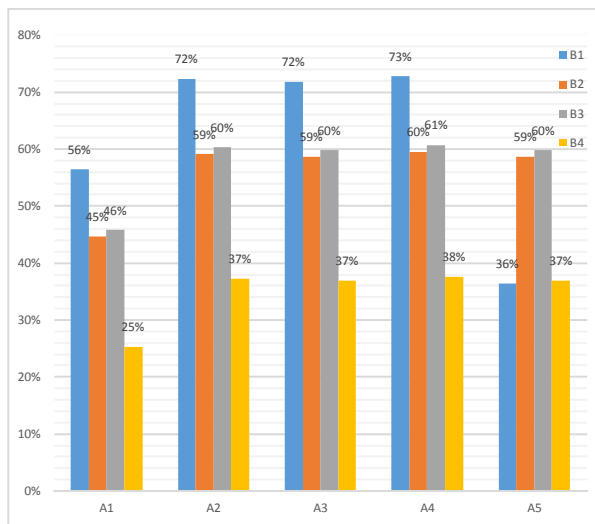


Рис.1.1.1. Модель от нормы EN 1995-1-1-2009 [66]

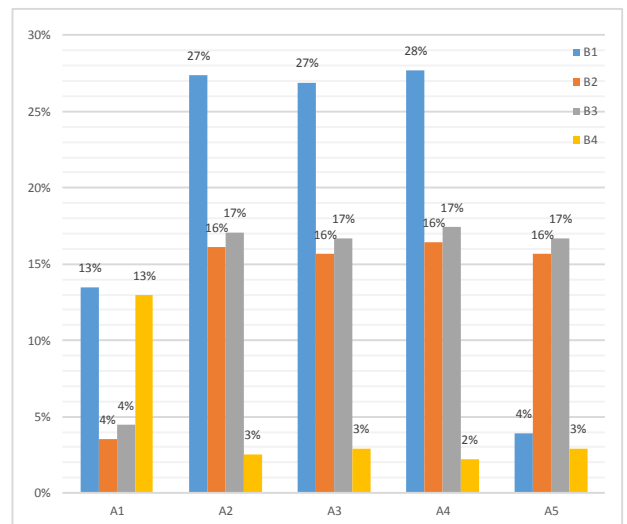


Рис.1.2. Модель от Blass, Hans Joachim u Laskewitz, Bernd [33]

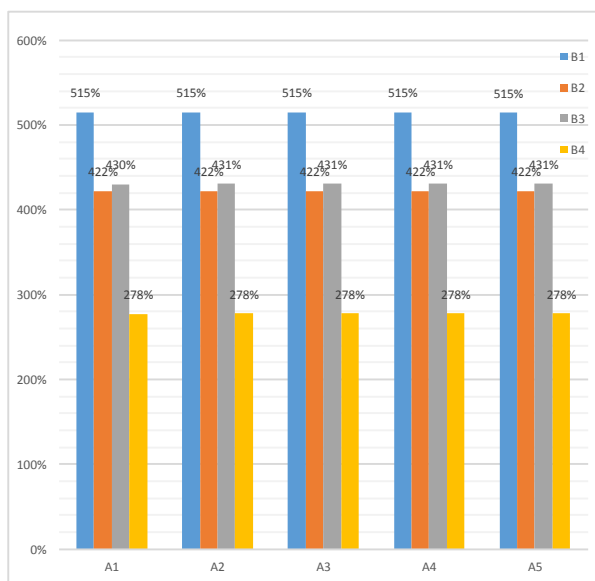


Рис.1.3. Модель от В. В. Пуртова и А. В. Павлика [1]

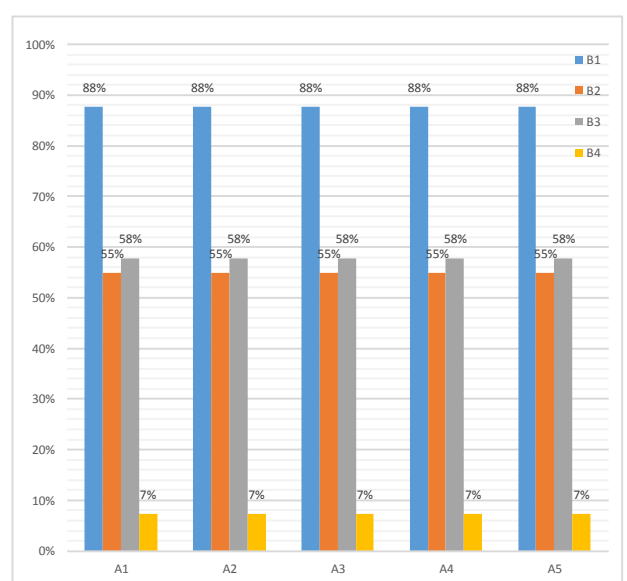


Рис.1.4. Китайская модель [53]

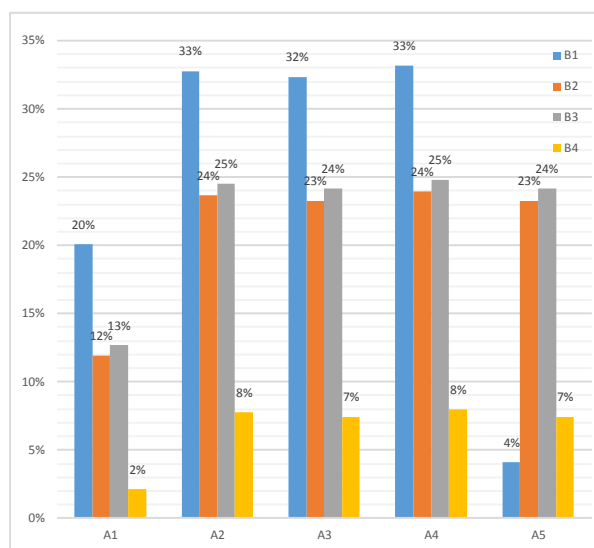


Рис.1.5. Модель от DIN 1052 [65]

2. На узкой стороне стеновой панели из CLT

Таблица Б.6

Модель от нормы EN 1995-1-1:2009 [66]

$f_{h,0,k}$ $M_{y,d}$	SIA 265:2003	EN 1995-1-1:2004 DIN 1052:2004 enBR:2007	TU Graz Institut für Holzbau und Holztechnologie	H.J. Blaß
ENV 1998-1-1:1993	3197	2833	2524	1605
SIA 265:2003	3526	3115	2766	1729
EN 1995-1-1:2004 DIN 1052:2004 enBR:2007	3515	3106	2758	1725
L. Whale u I. Smith	3535	3123	2773	1733
В.В.Пуртов	2786	3106	2758	1725

Таблица Б.7

Модель от Blass. Hans Joachim u Laskewitz. Bernd [33]

$f_{h,0,k}$ $M_{y,d}$	SIA 265:2003	EN 1995-1-1:2004 DIN 1052:2004 enBR:2007	TU Graz Institut für Holzbau und Holztechnologie	H.J. Blaß
ENV 1998-1-1:1993	2305	1997	1735	949,792
SIA 265:2003	2591	2243	1945	1058
EN 1995-1-1:2004 DIN 1052:2004 enBR:2007	2582	2235	1939	1054
L. Whale u I. Smith	2599	2250	1951	1061
В.В.Пуртов	1947	2235	1939	1054

Модель от В. В. Пуртова и А. В. Павлика [1]

$f_{h,0,k}$ $M_{y,d}$	SIA 265:2003	EN 1995-1-1:2004 DIN 1052:2004 enBR:2007	TU Graz Institut für Holzbau und Holztechnologie	H.J. Blaß
ENV 1998-1-1:1993	1442	1139	8896	4134
SIA 265:2003	1443	1139	8901	4146
EN 1995-1-1:2004 DIN 1052:2004 enBR:2007	1443	1139	8901	4145
L. Whale u I. Smith	1443	1139	8901	4146
В.В.Пуртов	1441	1139	8901	4145

Таблица Б.9

Китайская модель[53]

$f_{h,0,k}$ $M_{y,d}$	SIA 265:2003	EN 1995-1-1:2004 DIN 1052:2004 enBR:2007	TU Graz Institut für Holzbau und Holztechnologie	H.J. Blaß
ENV 1998-1-1:1993	4072	3558	2656	714,704
SIA 265:2003	4072	3558	2656	714,704
EN 1995-1-1:2004 DIN 1052:2004 enBR:2007	4072	3558	2656	714,704
L. Whale u I. Smith	4072	3558	2656	714,704
В.В.Пуртов	3942	3558	2656	714,704

Таблица Б.10

Модель от DIN 1052 [65]

$f_{h,0,k}$ $M_{y,d}$	SIA 265:2003	EN 1995-1-1:2004 DIN 1052:2004 enBR:2007	TU Graz Institut für Holzbau und Holztechnologie	H.J. Blaß
ENV 1998-1-1:1993	2303	2076	1867	1166
SIA 265:2003	2555	2299	2063	1271
EN 1995-1-1:2004 DIN 1052:2004 enBR:2007	2547	2292	2056	1268
L. Whale u I. Smith	2562	2305	2068	1274
В.В.Пуртов	1988	2292	2056	1268

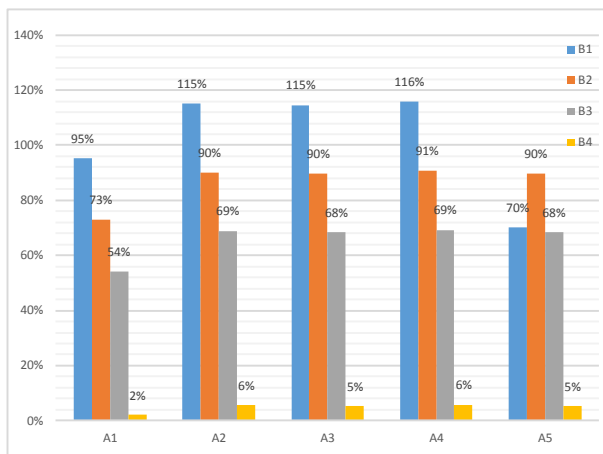


Рис.2.1. Модель от нормы EN 1995-1-1:2009 [66]

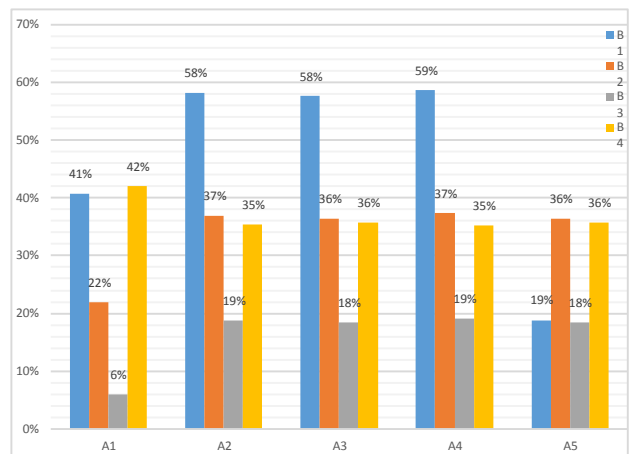


Рис.2.2. Модель от Blass, Hans Joachim u Laskewitz, Bernd [33]

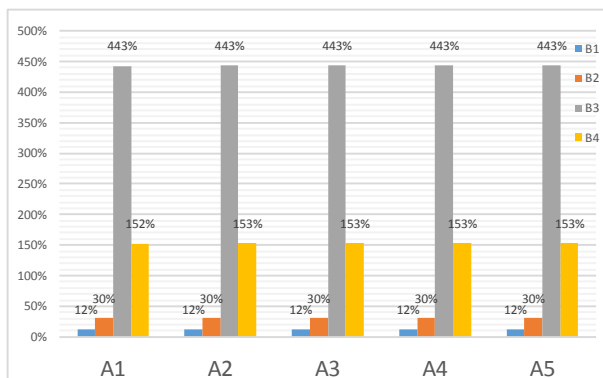


Рис.2.3. Модель от В. В. Пуртова и А. В. Павлика [1]

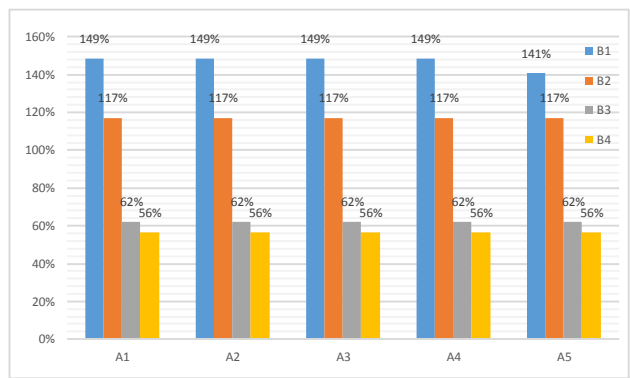


Рис.2.4. Китайская модель[53]

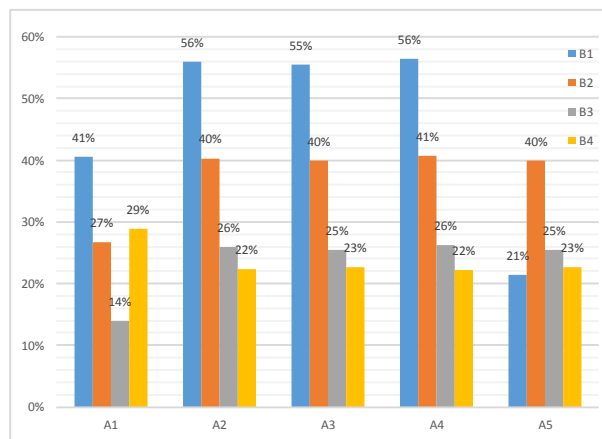


Рис.2.5. Модель от DIN 1052 [65]

3. Деревянные элементы из *LVL* вдоль волокон

Таблица Б.11

Модель от нормы *EN 1995-1-1:2009* [66]

$f_{h,0,k}$ $M_{y,d}$	<i>SIA 265:2003</i>	<i>EN 1995-1-1:2004</i> <i>DIN 1052:2004</i> <i>enBR:2007</i>	<i>TU Graz</i> <i>Institut für Holzbau</i> <i>und Holztechnologie</i>	<i>H.J. Blaß</i>
<i>ENV 1998-1-1:1993</i>	2568	2376	2393	2058
<i>SIA 265:2003</i>	2829	2612	2632	2254
<i>EN 1995-1-1:2004</i> <i>DIN 1052:2004</i> <i>enBR:2007</i>	2821	2605	2624	2248
<i>L. Whale u I. Smith</i>	2837	2619	2639	2260
В.В.Пуртов	2240	2605	2624	2248

Таблица Б.12

Модель от *Blass. Hans Joachim u Laskewitz. Bernd* [33]

$f_{h,0,k}$ $M_{y,d}$	<i>SIA 265:2003</i>	<i>EN 1995-1-1:2004</i> <i>DIN 1052:2004</i> <i>enBR:2007</i>	<i>TU Graz</i> <i>Institut für Holzbau</i> <i>und Holztechnologie</i>	<i>H.J. Blaß</i>
<i>ENV 1998-1-1:1993</i>	1863	1700	1715	1429
<i>SIA 265:2003</i>	2091	1906	1922	1600
<i>EN 1995-1-1:2004</i> <i>DIN 1052:2004</i> <i>enBR:2007</i>	2083	1899	1916	1594
<i>L. Whale u I. Smith</i>	2097	1912	1928	1605
В.В.Пуртов	1578	1899	1916	1594

Таблица Б.13

Модель от В. В. Пуртова и А. В. Павлика [1]

$f_{h,0,k}$ $M_{y,d}$	<i>SIA 265:2003</i>	<i>EN 1995-1-1:2004</i> <i>DIN 1052:2004</i> <i>enBR:2007</i>	<i>TU Graz</i> <i>Institut für Holzbau</i> <i>und Holztechnologie</i>	<i>H.J. Blaß</i>
<i>ENV 1998-1-1:1993</i>	10100	8573	8709	6199
<i>SIA 265:2003</i>	10100	8577	8713	6202
<i>EN 1995-1-1:2004</i> <i>DIN 1052:2004</i> <i>enBR:2007</i>	10100	8577	8713	6202
<i>L. Whale u I. Smith</i>	10100	8577	8714	6202
В.В.Пуртов	10090	8577	8713	6202

Китайская модель[53]

$f_{h,0,k}$ $M_{y,d}$	SIA 265:2003	EN 1995-1-1:2004 DIN 1052:2004 enBR:2007	TU Graz Institut für Holzbau und Holztechnologie	H.J. Blaß
ENV 1998-1-1:1993	3081	2544	2591	1761
SIA 265:2003	3081	2544	2591	1761
EN 1995-1-1:2004 DIN 1052:2004 enBR:2007	3081	2544	2591	1761
L. Whale u I. Smith	3081	2544	2591	1761
В.В.Пуртов	3081	2544	2591	1761

Таблица Б.15

Модель от DIN 1052 [65]

$f_{h,0,k}$ $M_{y,d}$	SIA 265:2003	EN 1995-1-1:2004 DIN 1052:2004 enBR:2007	TU Graz Institut für Holzbau und Holztechnologie	H.J. Blaß
ENV 1998-1-1:1993	1971	1838	1850	1607
SIA 265:2003	2180	2030	2044	1769
EN 1995-1-1:2004 DIN 1052:2004 enBR:2007	2173	2024	2038	1764
L. Whale u I. Smith	2186	2035	2049	1773
В.В.Пуртов	1709	2024	2038	1764

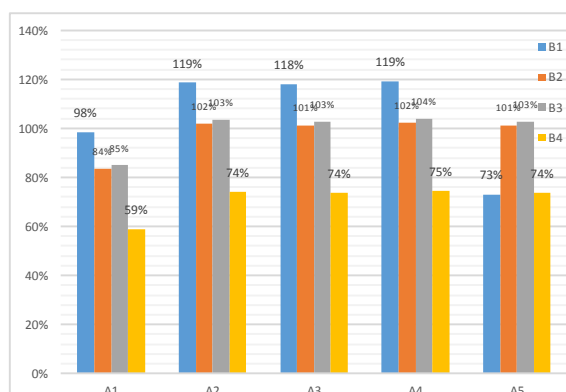


Рис.3.1. Модель от нормы EN 1995-1-1-2009 [66]

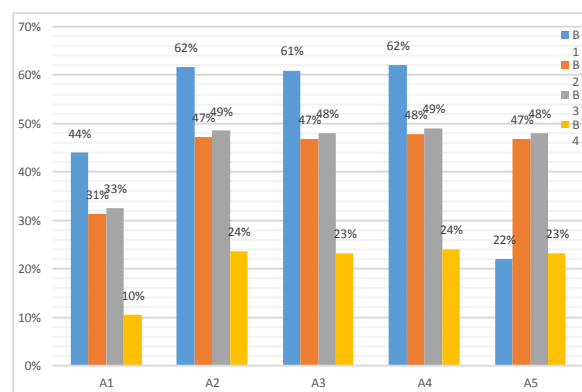


Рис.3.2. Модель от Blass, Hans Joachim u Laskewitz, Bernd [33]

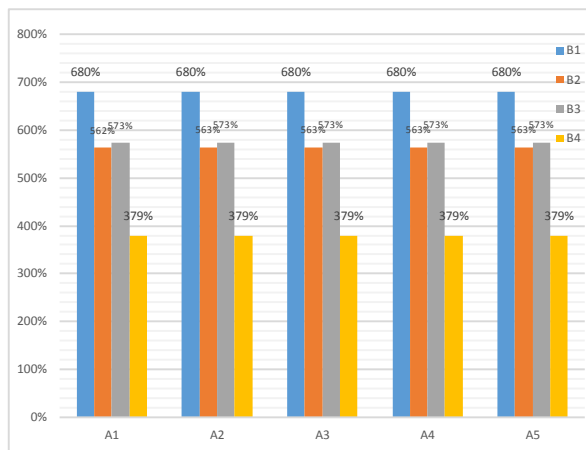


Рис.3.3. Модель от В. В. Пуртова и А. В. Павлика [1]

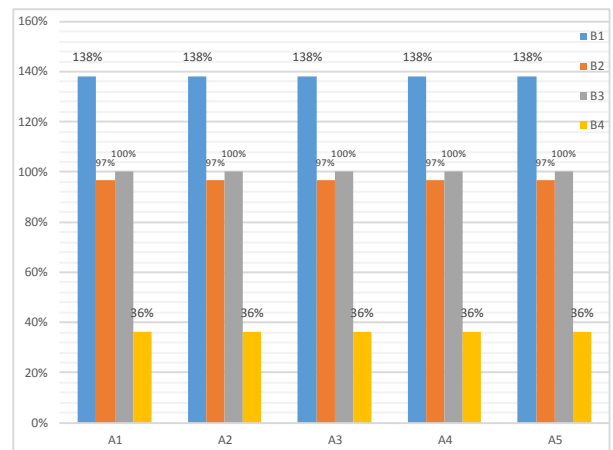


Рис.3.4. Китайская модель[53]

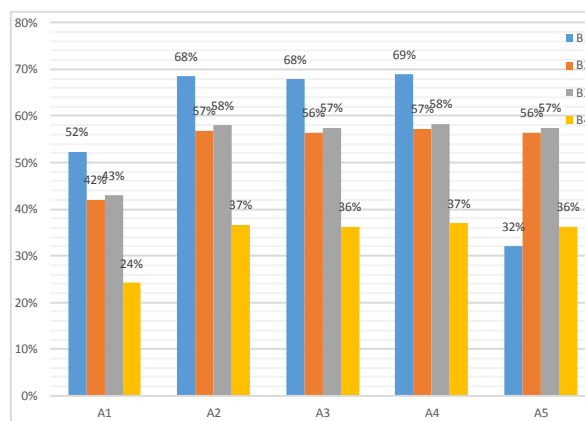


Рис.3.5. Модель от DIN 1052 [65]

Примечание:

A1— ENV 1998-1-1:1993;

A2— SIA 265:2003;

A3— EN 1995-1-1:2004, DIN 1052:2004, enBR:2007;

A4— L. Whale, I. Smith;

A5— В.В.Пуртов;

B1— SIA 265:2003;

B2— EN 1995-1-1:2004, DIN 1052:2004, enBR:2007;

B3— TU Graz;

B4— H.J. Blaß;

Выводы по приложению Б

После оптимизации расчётных формул определения прочности при смятии в гнезде древесины и сопротивления шурупа при изгибе в деревянных элементах из *CLT* и *LVL* на основе предложенных уравнений из раздела.2.3 определяются по следующим уравнениям:

- прочность при смятии в гнезде деревянных элементов из *CLT* и *LVL* под углом α к волокнам:

при $\alpha = 0^\circ$:

$$f_{h,0,k} = 0,15d^{-0,3} \cdot \rho_k \quad (\text{Б.1})$$

при $\alpha = 90^\circ$:

$$f_{h,90,k} = 0,15 \cdot 1,58d^{-0,3} \cdot \rho_k [71] \quad (\text{Б.2})$$

- сопротивление шурупа при изгибе:

для *CLT*:

$$M_y = f_{u,k} \cdot \frac{d^3}{6} \quad (\text{Б.3})$$

для *LVL*:

$$M_y = 0,13 f_{u,k} \cdot d^3 [ENV 1998-1-1:1993] \quad (\text{Б.4})$$

Где:

$f_{h,0,k}$ — прочность при смятии в гнезде древесины из узкой стороны панели из *CLT*, МПа;
 $f_{h,90,k}$ — прочность при смятии в гнезде древесины из узкой стороны панели из *CLT*, МПа;
 ρ_k — плотность древесины, кг/м³;
 d — наружный диаметр резьбы шурупа, мм;
 M_y — сопротивление шурупа при изгибе, Н•мм;

ПРИЛОЖЕНИЕ В. Решение задачи по моделированию и расчёту несущей способности односрезного шурупа с укреплением МЗП на металлических накладках

В.1. Общие сведения о развитии теории разрушения односрезного шурупа с укреплением МЗП

С использованием сопротивления шурупа при изгибе, физико-механических и геометрических характеристик соединения могут быть определены виды разрушения в боковом соединении. Модели разрушения на основе теории *Johansen* (рис. В.1), описывающие деревянные элементы под нагрузкой за пределами упругой области, показаны как:

Модель разрушения *I* — разрушение деревянного элемента за счёт смятия при прочности шурупа при изгибе выше, чем прочность при смятии в гнезде древесины 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 при образовании одного пластического шарнира на плоскости среза и смятие деревянного элемента;

Модель разрушения *IV* — пластическая деформация шурупа при изгибе при образовании двух пластических шарниров на плоскости среза и смятие деревянного элемента;

Методика повышения несущей способности нагельных соединений с укреплением МЗП была впервые предложена в работе *Kevarinmäki* [66]. В работе

Blaß, H. J., Schmid, M. u Werner, H [57] были проведены испытания определения несущей способности нагельных соединений деревянных конструкций с укреплением МЗП на срез и предложена математическая модель в соответствии с нормами *EC5* и *1052:2008-12*. Аналитическое исследование несущей способности односрезного шурупа с укреплением МЗП в этой области в современной литературе практически не представлено. Таким образом, модель разрушения односрезного шурупа в соединениях деревянного элемента в соответствии с предложенной моделью в разделе. 2.3 представлена на рис. В.1.

В соответствии с видами разрушения (рис. В.1) расчётная схема по определению несущей способности односрезного шурупа и распределение действующего напряжения при смятии в гнезде древесины, МЗП и металлической накладки представлены на рис. В.2. Упрощенная расчётная схема по определению длины рапределения напряжений при смятии в гнезде древесины под шурупы, МЗП и металлической накладки представлена на рис. В.3.

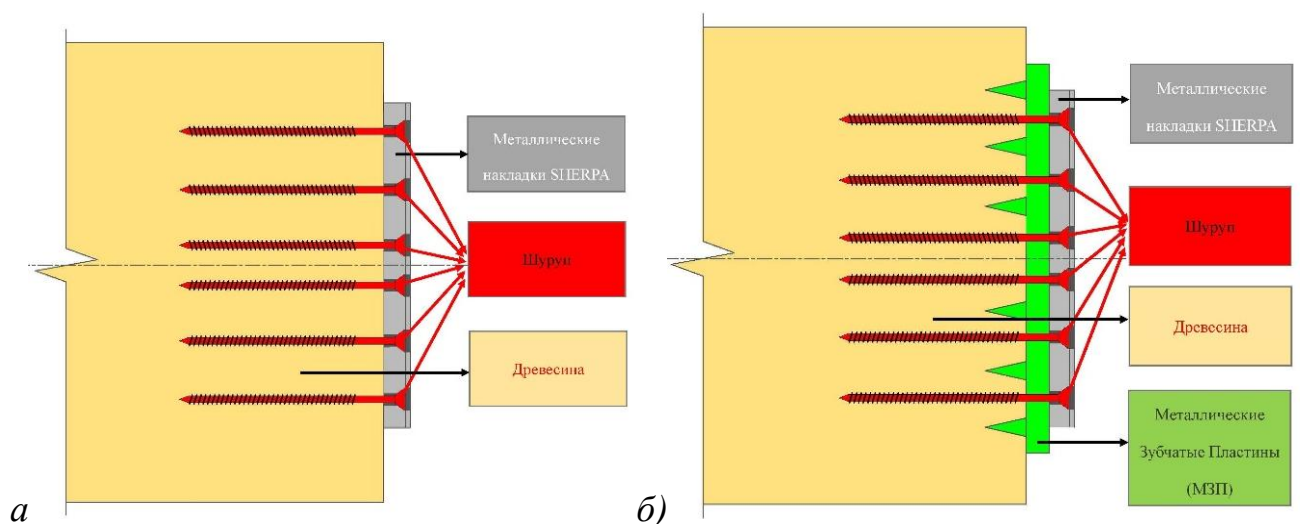


Рис. В.1. Конструктивная схема соединения деревянных конструкций на металлических накладках и шурупов: а— без укрепления МЗП; б—с укреплением МЗП

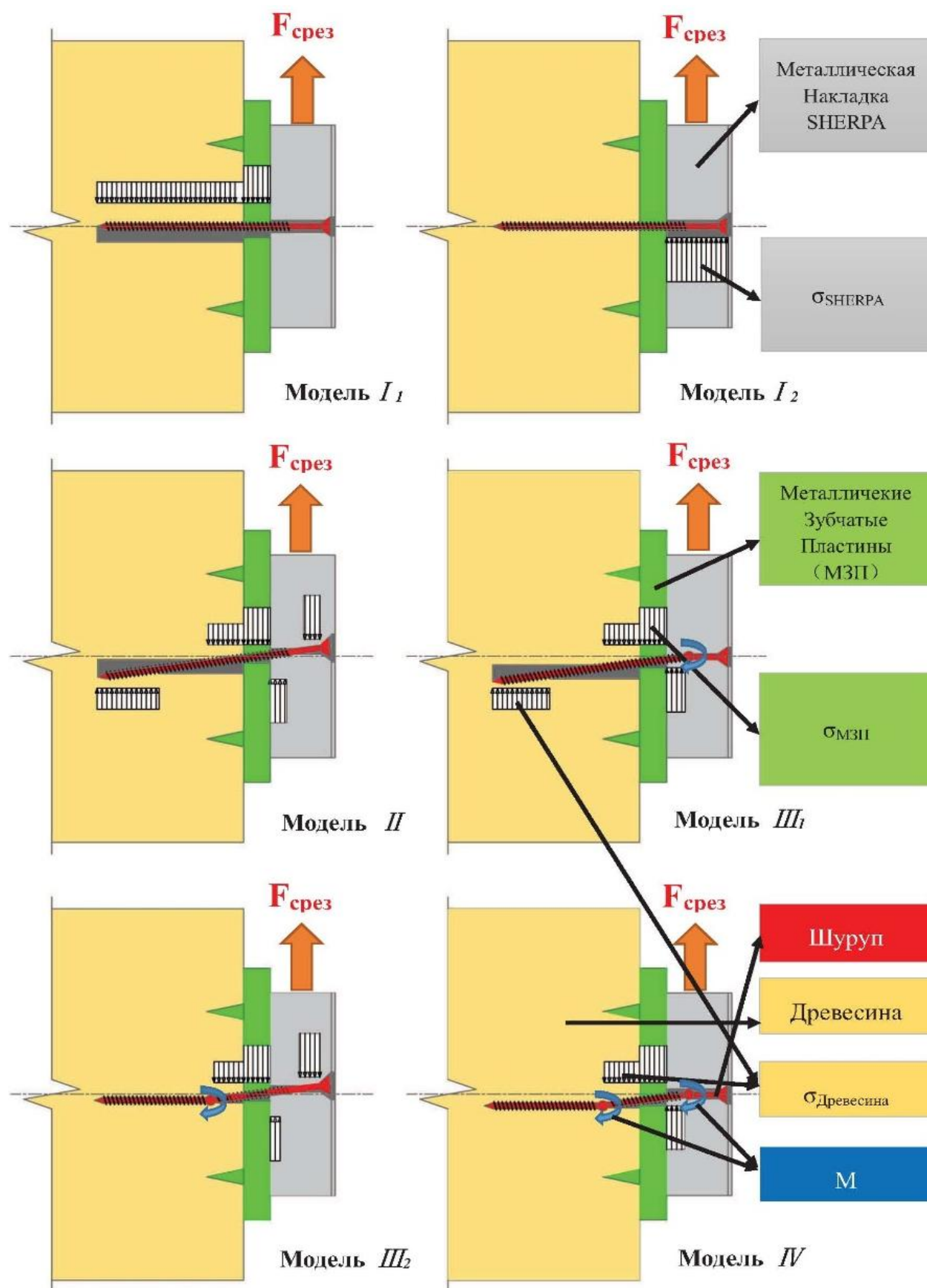


Рис. В.2. Распределение напряжений при смятии в гнезде древесины, МЗП и металлической накладке для односрезного шурупа

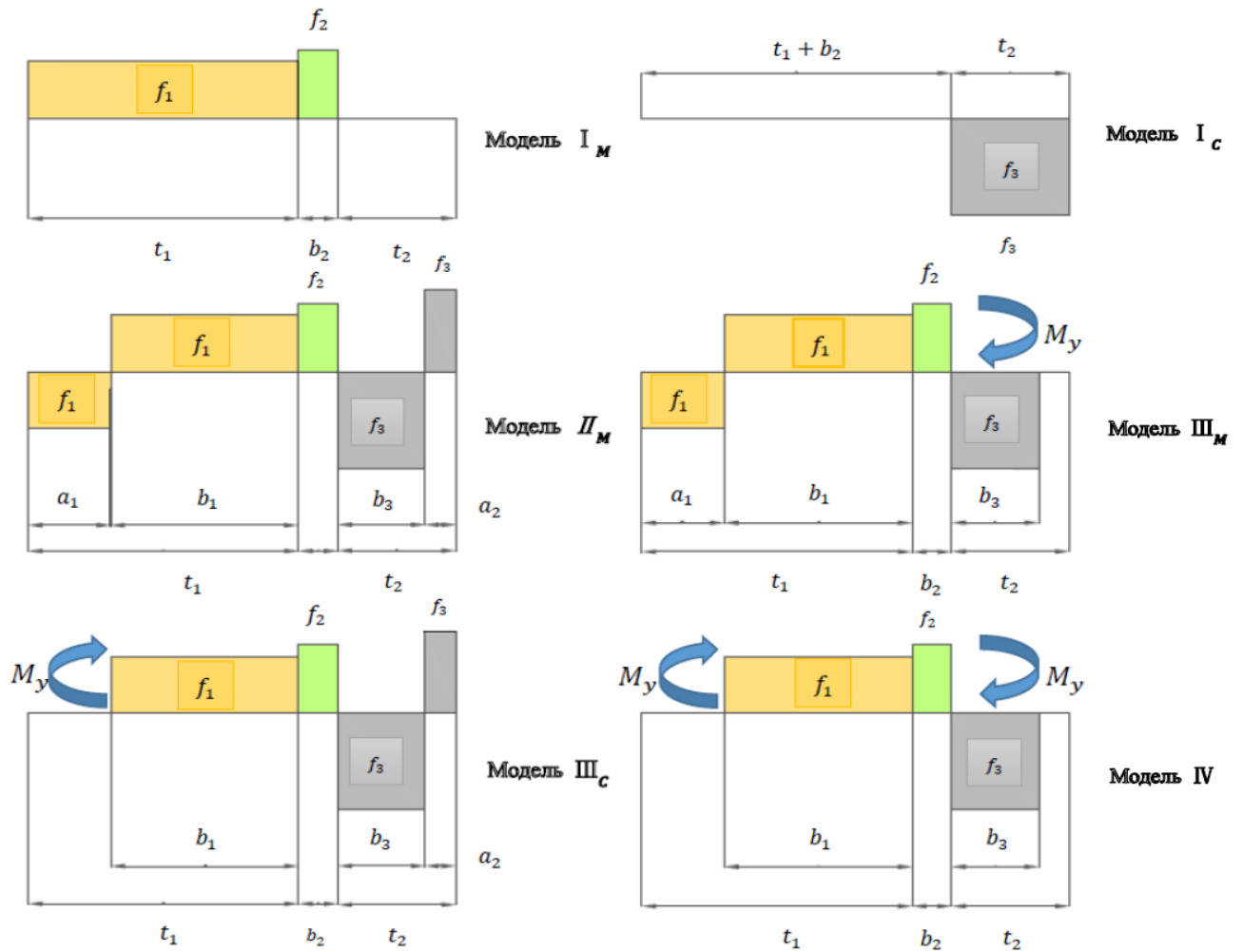


Рис. В.3. Упрощенная расчётная схема по определению длины распределения напряжений при смятии в гнезде древесины, МЗП и металлической накладке для односрезного шурупа: жёлтая часть— в древесине; зелёная часть— в МЗП; серая часть— в металлической накладке

В.2.1. Полученные уравнения в соответствии с видами разрушения и распределениями напряжения при смятии в гнезде древесины, МЗП и металлической накладке

• для модели разрушения I :

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

• для модели разрушения II:

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

• для модели разрушения III:

$$b_1^{C_3} = \frac{-\beta \cdot t_2 + \sqrt{(\beta \cdot t_2)^2 + \left(\beta \cdot t_2^2 + \frac{4M_y}{f_1 \cdot d}\right) \cdot (2 + \beta)}}{2 + \beta} \quad (\text{B.3})$$

• для модели разрушения IV:

$$b_1^4 = \sqrt{\frac{\frac{4M_y}{f_1 \cdot d}}{1 + \beta}} \quad (\text{B.4})$$

В.2.1. Решение задачи в соответствии с моделью разрушения I

Для того, чтобы упростить расчёт уравнений, коэффициенты определяют

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = \frac{f_2}{f_1} \\ \beta = \frac{f_3}{f_1} \\ a_1 = \frac{t_1 - b_1}{2} \\ a_2 = \frac{t_2 - b_3}{2} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} m = \frac{b_2}{b_1} \\ n = \frac{b_3}{b_1} \end{array} \right. \quad (\text{B.5})$$

Из рис. В.2 можно составлять уравнения равновесия по оси Y

$$\sum F_Y = 0$$

$$b_1 \cdot d \cdot f_1 + b_2 \cdot d \cdot f_2 = b_3 \cdot d \cdot f_3$$

откуда

$$b_1 \cdot f_1 + b_2 \cdot f_2 = b_3 \cdot f_3 \quad (\text{B.6})$$

Решая совместно уравнения (B.5) и (B.6), найдём соотношение b_3 и b_1

$$b_1 \cdot f_1 + m \cdot b_1 \cdot \alpha \cdot f_1 = b_3 \cdot \beta \cdot f_1$$

$$\frac{b_3}{b_1} = \frac{1 + m \cdot \alpha}{\beta} = n$$

Из рис. В.2 можно составлять уравнения равновесия изгибающих моментов

$$\sum M_O = 0$$

$$M_1 = -f_1 \cdot d \cdot a_1 \cdot (1,5a_1 + b_1 + b_2) + f_1 \cdot d \cdot (a_1 + b_1) \cdot \left(\frac{a_1 + b_1}{2} + b_2\right)$$

$$M_1 = f_1 \cdot d \cdot \left(\frac{b_1^2}{2} + b_1 \cdot b_2 - a_1^2\right)$$

$$M_2 = f_2 \cdot d \cdot \frac{b_2^2}{2}$$

$$M_3 = f_3 \cdot d \cdot \frac{(a_2 + b_3)^2}{2} - f_3 \cdot d \cdot a_2 \cdot (1,5a_2 + b_3)$$

$$M_3 = f_3 \cdot d \cdot \left(\frac{b_3^2}{2} - a_2^2\right)$$

$$M_1 + M_2 + M_3 = 0$$

$$b_1^2 \cdot (2 + 4m - 1 + 2\alpha \cdot m^2 + \beta \cdot n^2) + b_1 \cdot (2t_1 + 2n \cdot t_2 \cdot \beta) - \beta \cdot t_2^2 - t_1^2 = 0 \quad (\text{В.7})$$

Решая уравнения (В.7) совместно с использованием методики корней квадратного уравнения, дискриминант получим

$$b_{1/2} = \frac{-B \pm \sqrt{\Delta}}{2A}$$

$$\Delta = R^2 - 4Q \cdot S$$

$$A = 2 + 4m - 1 + 2\alpha \cdot m^2 + \beta \cdot n^2$$

$$B = 2t_1 + 2n \cdot t_2 \cdot \beta$$

$$C = -\beta \cdot t_2^2 - t_1^2$$

Подставив данные задачи и полагая $n=1$ после определения дискриминанта уравнения (В.7), получим

$$A = 2 + 4m - 1 + 2\alpha \cdot m^2 + \beta$$

$$B = 2t_1 + 2t_2 \cdot \beta$$

$$C = -\beta \cdot t_2^2 - t_1^2$$

$$\Delta = 4(t_1 + t_2 \cdot \beta)^2 + 4(1 + \beta) \cdot (\beta \cdot t_2^2 + t_1^2) \quad (\text{В.8})$$

На основе дискриминант (В.8), корень получим

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

В.2.1. Решение задачи в соответствии с моделью разрушения II

Из рис. В.2 с учётом коэффициентов из уравнений (В.5) и (В.6) можно составлять уравнения равновесия изгибающих моментов

$$\sum M_O = 0$$

$$M_1 = f_1 \cdot d \cdot \left(\frac{b_1^2}{2} + b_1 \cdot b_2 - a_1^2 \right)$$

$$M_2 = f_2 \cdot d \cdot \frac{b_2^2}{2}$$

$$M_3 = f_3 \cdot d \cdot \frac{b_3^2}{2}$$

$$M_1 + M_2 + M_3 - M_y = 0$$

$$b_1^2 \cdot (1 + 2\beta \cdot n^2) + 2b_1 \cdot t_1 - t_1^2 - \frac{4M_y}{f_1 \cdot d} = 0 \quad (\text{В.9})$$

Решая уравнения (В.9) совместно с использованием методики корней квадратного уравнения, дискриминант получим

$$b_{1/2} = \frac{-B \pm \sqrt{\Delta}}{2A}$$

$$\Delta = R^2 - 4Q \cdot S$$

$$A = 1 + 2\beta \cdot n^2$$

$$B = 2t_1$$

$$C = -t_1^2 - \frac{4M_y}{f_1 \cdot d}$$

Подставив данные задачи и полагая $n=1$ после определения дискриминанта уравнения (В.9), получим

$$A = 1 + 2\beta$$

$$B = 2t_1$$

$$C = -t_1^2 - \frac{4M_y}{f_1 \cdot d}$$

$$\Delta = 4t_1^2 + 4(1 + 2\beta) \cdot \left(t_1^2 + \frac{4M_y}{f_1 \cdot d} \right) \quad (\text{В.10})$$

На основе дискриминант (В.10), корень получим

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

В.2.1. Решение задачи в соответствии с моделью разрушения III

Из рис. В.2 с учётом коэффициентов из уравнений (В.5) и (В.6) можно составлять уравнения равновесия изгибающих моментов

$$\sum M_O = 0$$

$$M_1 = f_1 \cdot d \cdot \frac{b_1^2}{2}$$

$$M_3 = f_3 \cdot d \cdot (\frac{b_3^2}{2} - a_2^2)$$

$$M_1 + M_3 - M_y = 0$$

$$b_1^2 \cdot (2 + \beta \cdot n^2) + 2n \cdot \beta \cdot t_2 \cdot b_1 - \beta \cdot t_2^2 - \frac{4M_y}{f_1 \cdot d} = 0 \quad (B.11)$$

Решая уравнения (В.11) совместно с использованием методики корней квадратного уравнения, дискриминант получим

$$b_{1/2} = \frac{-B \pm \sqrt{\Delta}}{2A}$$

$$\Delta = B^2 - 4A \cdot C$$

$$A = 2 + \beta \cdot n^2$$

$$B = 2n \cdot \beta \cdot t_2$$

$$C = -\beta \cdot t_2^2 - \frac{4M_y}{f_1 \cdot d}$$

Подставив данные задачи и полагая $n=1$ после определения дискриминанта уравнения (В.11), получим

$$A = 2 + \beta$$

$$B = 2t_2 \cdot \beta$$

$$C = -\beta \cdot t_2^2 - \frac{4M_y}{f_1 \cdot d}$$

$$\Delta = 4t_2^2 \cdot \beta^2 + 4(2 + \beta) \cdot (\beta \cdot t_2^2 + \frac{4M_y}{f_1 \cdot d}) \quad (B.12)$$

На основе дискриминант (В.12), корень получим

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

В.2.1. Решение задачи в соответствии с моделью разрушения IV

Из рис. В.2 с учётом коэффициентов из уравнений (В.5) и (В.6) можно составлять уравнения равновесия изгибающих моментов

$$\begin{aligned}\sum M_O &= 0 \\ M_1 &= f_1 \cdot d \cdot \frac{b_1^2}{2} \\ M_3 &= f_3 \cdot d \cdot \frac{b_3^2}{2} \\ M_1 + M_3 - M_y &= 0 \\ b_1^2 + n^2 \cdot \beta \cdot b_1^2 - \frac{4M_y}{f_1 \cdot d} &= 0\end{aligned}\tag{В.13}$$

Подставив данные задачи и полагая $n=1$ с учётом уравнения (В.13), получим

$$(1 + \beta) \cdot b_1^2 = \frac{4M_y}{f_1 \cdot d}\tag{В.14}$$

На основе дискриминант (В.14), корень получим

$$b_1^4 = \sqrt{\frac{4M_y}{f_1 \cdot d} \cdot \frac{1}{1 + \beta}}$$

Примечание:

f_1 — прочность древесины при смятии в гнезде под шурупы, МПа; f_2 — прочность при смятии в гнезде МЗП под шурупы, МПа; f_3 — прочность при смятии в гнезде металлической накладке под шурупы, МПа;

M_1 — изгибающий момент в гнезде древесины, Нмм;

M_3 —изгибающий момент в гнезде металлической накладки, Нмм;

M_y — сопротивление шурупа при изгибе, МПа;

n — отношение b_1 и b_2 ; $n=b_2/b_1$; $n=1$ [29]; m — отношение b_1 и b_3 ; $m=b_3/b_1$; $m=\beta-1$;

α — отношение f_1 и f_2 ; $\gamma=f_2/f_1$; β — отношение f_1 и f_3 ; $\beta=f_3/f_1$;

b_1 — длина распределения действующего напряжения при смятии в гнезде древесины под шурупы, мм;

b_2 — длина распределения действующего напряжения при смятии в гнезде МЗП под шурупы, мм;

b_3 — длина распределения действующего напряжения при смятии в гнезде металлической накладки под шурупы, мм;

t_1 — эффективная длина резьбовой части шурупа, мм; t_2 — толщина металлической накладки, мм;

a_1 — длина распределения действующего напряжения при смятии в гнезде древесины под шурупы, мм;

a_2 — длина распределения действующего напряжения при смятии в гнезде металлической накладки под шурупы, мм;

ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Экспериментальные исследования несущей способности МЗП на растяжение и срез в деревянных элементах

1. Оборудование

Экспериментальные исследования проводились в механической лаборатории СПбГАСУ с использованием универсальной испытательной машины INSTRON 5969, имеющей максимальный режим работы до 50 кН. Количество образцов на каждый вид испытаний составляло 5 шт. Температура в лаборатории 20 ± 1 °С, влажность материалов 13 %. Скорость нагружения при непрерывном увеличении нагрузки составляла 3 мм/мин.

2. Методика и результаты проведения эксперимента

Выполненный анализ состояния вопроса позволил сформулировать основные направления исследования, включая программу экспериментов.

Экспериментальные исследования были направлены на:

- определение несущей способности МЗП на срез в широкой и узкой стороне стеновой панели из *CLT*;
- определение несущей способности МЗП на срез вдоль волокон *LVL*;
- определение несущей способности МЗП на растяжение;

Параметры опытных образцов из МЗП (рис. 3.3, б) на срез и растяжение с точностью 0,1 мм, показаны в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Параметры опытных образцов из МЗП на срез

t	L	T	l	n
1	62	50	8	8

Примечание: t — толщина МЗП, мм; L — длина опытного образца, мм; T — ширина опытного образца, мм; l — длина зуба, мм; n — количество зубов

Параметры опытных образцов из МЗП на растяжение

t	L	T	l	n
1	62	25	8	0

Примечание: t— толщина МЗП, мм; L— длина опытного образца, мм; T— ширина опытного образца, мм; l— длина зуба, мм; n— количество зубов

Испытания по определения несущей способности МЗП на срез и растяжение показаны на рис.2 в соответствии с зависимостью «нагрузка-перемещение» на рис.

3.

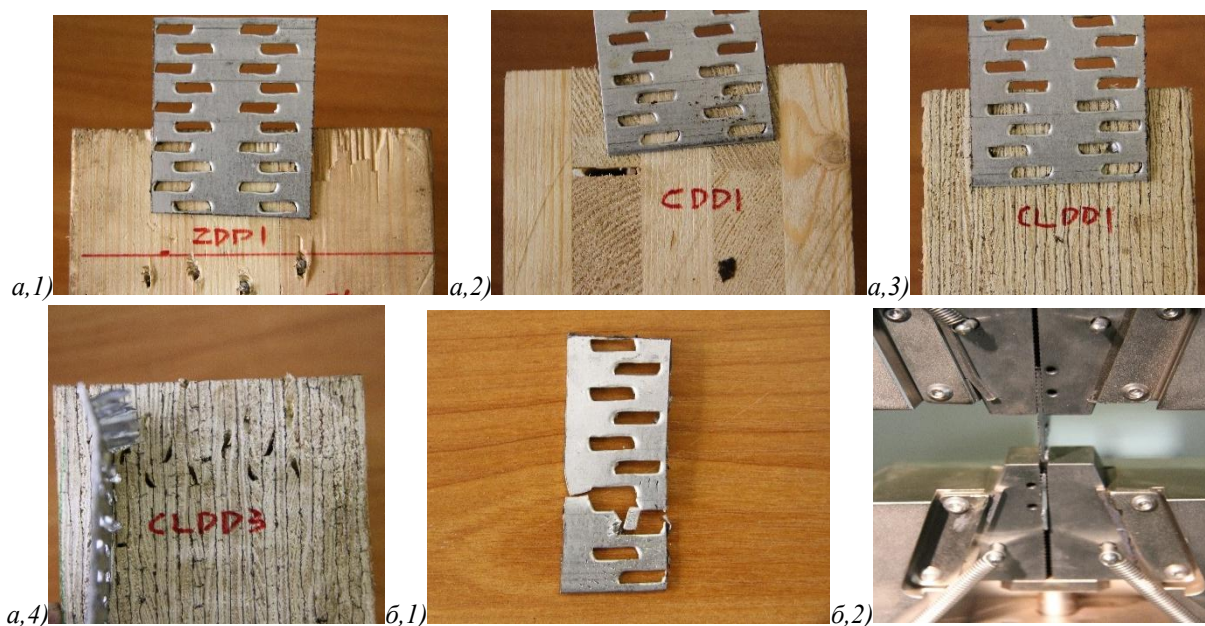
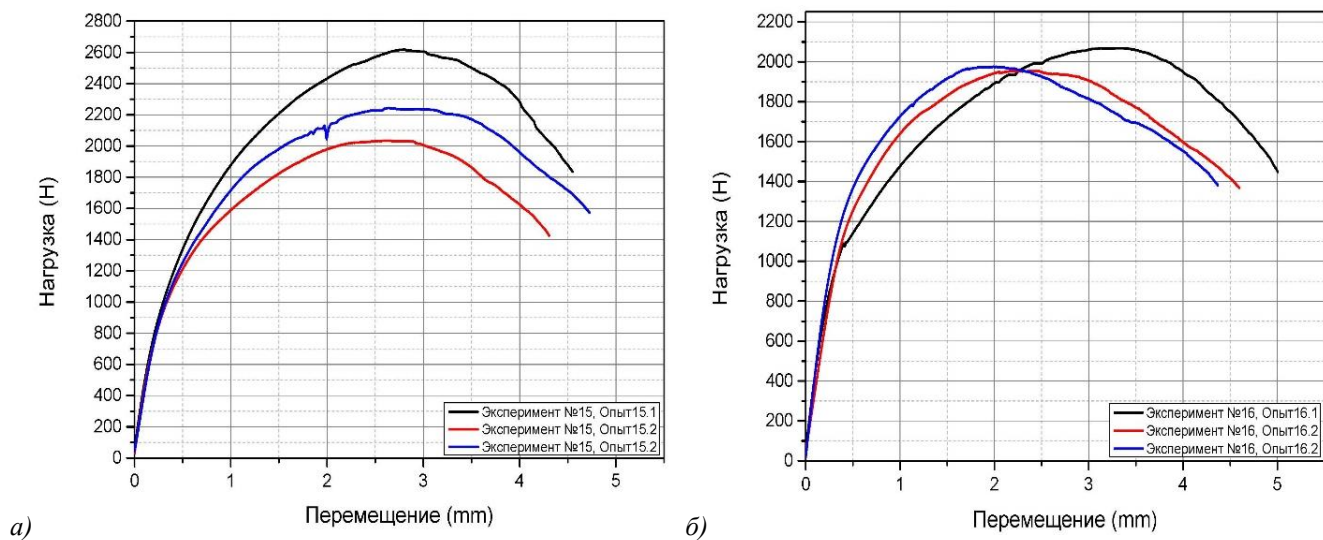


Рис. 1. Испытание по определению несущей способности МЗП: а, 1) — а, 4) на срез; б, 1) — б, 2) на растяжение



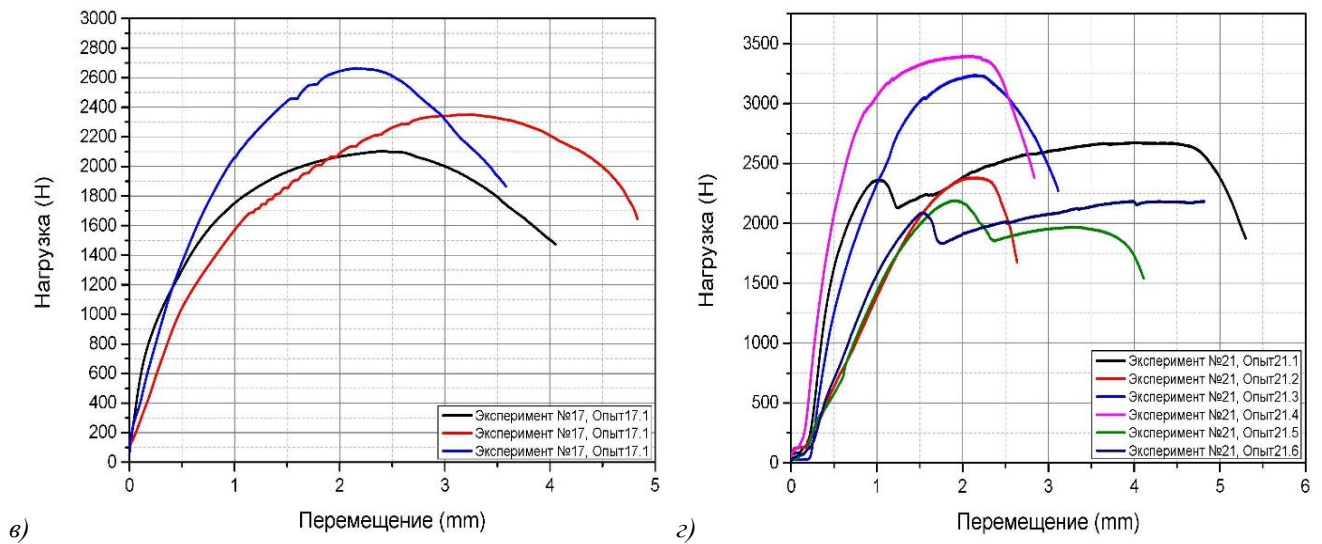


Рис. 2. Зависимость «нагрузка-перемещение» по определению несущей способности МЗП: а) на узкой стороне стеновой панели из *CLT* на срез; б) на широкой стороне стеновой панели из *CLT* на срез; в) вдоль волокон *LVL* на срез; г) на растяжение

Экспериментальный результат для каждого образца имеет небольшое отклонение по сравнению со средней величиной. Поэтому с учётом требования точности средняя величина должна быть принята равной фактической несущей способности МЗП на срез и растяжение. Экспериментальные результаты в соответствии с требованиями [80] с точностью 0,01 Н представлено в таблице. 3 и 4. Для расчётов и обработки результатов использовались программы *Microsoft Excel*, *Origin pro*, *IBM SPASS Statistics* и *Mathcad*.

Таблица 3

Экспериментальные результаты определения несущей способности МЗП на срез

Из широкой стороны <i>CLT</i>			Из узкой стороны <i>CLT</i>			Вдоль волокон <i>LVL</i>		
$F_{ax,test}$	$F_{ax,теку}$	$F_{ax,max}$	$F_{ax,test}$	$F_{ax,теку}$	$F_{ax,max}$	$F_{ax,test}$	$F_{ax,теку}$	$F_{ax,max}$
520,98	1335,08	1423,42	396,22	1377,29	1379,54	538,60	1168,93	1199,75
$\omega_{CLT/LVL}$	-3,27%		$\omega_{CLT/LVL}$	-26,44%				

Примечания: $F_{ax,test}$ — фактическая несущая способность, Н; $F_{ax,max}$ — максимальная несущая способность, Н; $F_{ax,теку}$ — предел текучести материала, Н; $\omega_{CLT/LVL}$ — приращение $F_{ax,test,LVL}$ и $F_{ax,test,CLT}$:

$$\omega_{CLT / LVL} = \frac{F_{ax,test,CLT} - F_{ax,test,LVL}}{F_{ax,test,LVL}} \cdot 100\%$$

**Экспериментальные результаты определения несущей способности МЗП на
растяжение**

$F_{ax, test}$	$F_{ax, теку}$	$F_{ax, max}$
1678,58	2870,83	3213,28

Примечания: $F_{ax, test}$ — фактическая несущая способность, Н; $F_{ax, max}$ — максимальная несущая способность, Н; $F_{ax, теку}$ — предел текучести материала, Н

Поскольку с использованием МЗП можно повысить несущую способность древесины в гнездах под шурупы при смятии, регулирование параметров МЗП, например длина, количество зубьев и расстояние между ними, площадь накладки МЗП и несущая способность МЗП на срез и растяжение позволяют эффективно использовать МЗП. Параметры опытных образцов МЗП, которая крепится к стеновой панели и балке, приведены в таб. 5. Сравнение несущей способности МЗП на срез и растяжение, которые крепятся к стене и балке, представлено в таб. 5.

Таблица 5

Параметры опытных образцов МЗП, которые крепятся к стене и балке

t	L	T	l	n
1	100	90	8	42

Примечание: t — толщина МЗП, мм; L — длина опытного образца, мм; T — ширина опытного образца, мм; l — длина зуба, мм; n — количество зубьев

Таблица 6

**Сравнение несущей способности МЗП на срез и растяжение, которая крепится к стеновой
панели и балке**

Расположение	На стеновой панели-CLT	На балке из CLT	Вдоль волокон LVL	МЗП
Несущая способность, Н	$F_{срез, 42}$	$F_{срез, 42}$	$F_{срез, 42}$	$F_{растяжение}$
	5470,29	4160,31	5655,3	1678,58
ω	225,98%	147,85%	236,91%	-

Примечание: $F_{срез, 42}$ — несущая способность МЗП с 42 зубьями, Н; $F_{растяжение}$ — несущая способность МЗП на

растяжение, Н; ω — приращение; $\omega = \frac{F_{срез, 42} - F_{растяжение}}{F_{растяжение}} \cdot 100\%$

Из таб. 6 видно, что несущая способность МЗП с 46 зубьями на срез выше

минимально на 147,85%, чем на растяжение. С укреплением МЗП к деревянному торцовому элементу опытный образец из МЗП удовлетворяет условию несущей способности на срез и в гнездах возникает пластическое разрушение смятия. При этом, опытный образец из МЗП можно использовать в испытании по определению несущей способности соединения на металлических накладках с укреплением МЗП в деревянных конструкциях.

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Экономическое исследование с использованием МЗП для повышения несущей способности соединения на металлических накладках в деревянных конструкциях

В разделе 4.4 было проведено сопоставление аналитического и экспериментального исследования несущей способности соединения на металлических накладках в деревянных конструкциях стеновой панели из *CLT* и балки из *LVL* и *CLT*. По выводу исследования замечается, что использование МЗП позволяет повысить несущую способность соединения, поэтому экономическое исследование является актуальным.

В табл. 1 приведено сравнение экспериментальных результатов определения несущей способности соединения на металлических накладках без укрепления и с МЗП. Из табл. 1 видно, что с использованием МЗП можно повысить несущую способность соединения на 31,15%. При этом, серии продукции типа *SHERPA* с низкой несущей способностью могут заменять соединение с высокой, это позволяет значительно сократить себестоимость продукции.

Таблица 1

Сравнение экспериментальных результатов по определению несущей способности соединения на металлических накладках без укрепления и с МЗП

На широкой стороне панели из <i>CLT</i>			На узкой стороне панели из <i>CLT</i>			Вдоль волокон балки из <i>LVL</i> для э		
$F_{v,\phi,90,CLT,МЗП}$	$F_{v,\phi,90,CLT}$	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:

1. $F_{v,\phi,90,CLT,МЗП}$ — фактическая несущая способность соединения с укреплением МЗП, Н;
2. $F_{v,\phi,90,CLT}$ — фактическая несущая способность соединения без МЗП, Н;
3. μ_ϕ — фактическое приращение $F_{v,\phi,90,CLT,МЗП}$ и $F_{v,\phi,90,CLT}$; $\mu_n = \frac{F_{v,\phi,n,CLT,МЗП} - F_{v,\phi,n,CLT}}{F_{v,\phi,n,CLT}} \cdot 100\%$;
4. α — угол между осью шурупа и волокнами;

Рис. 1 приведено сравнение несущей способности соединения на металлических накладках серий продукции типа *SHERPA* без укрепления и с МЗП в соответствии с [42].

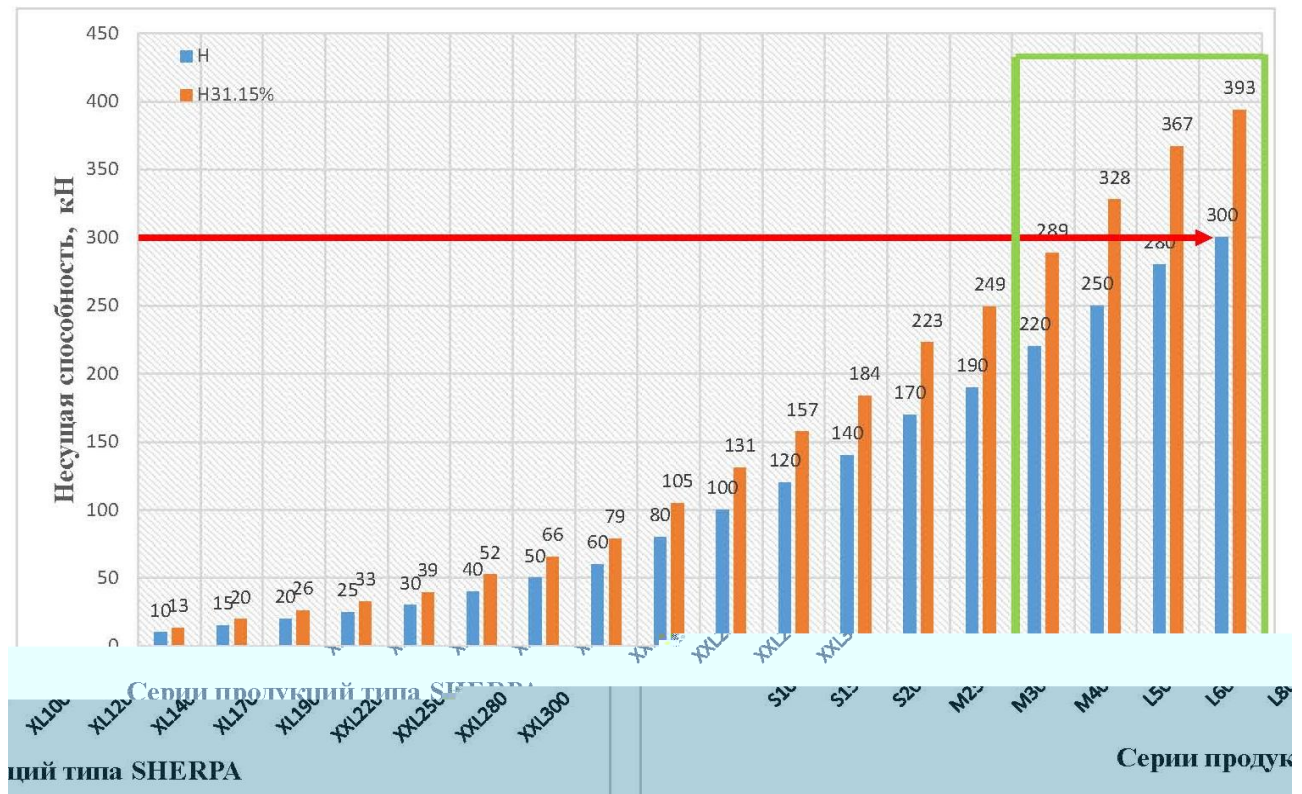


Рис. 1. Сравнение несущей способности соединения на металлических накладках серий продукции типа *SHERPA* без укрепления и с МЗП

Из рис. 1 видно, что в зелёной рамке для серии продукции XXL220 его несущая способность 289 кН с использованием МЗП близка к 300 кН без укрепления МЗП для серии продукции XXL300. Для остальных серий продукции типа *SHERPA* XXL250, 280 и 300 с использованием МЗП несущая способность превышает то же для серии продукции XXL 300 без укрепления МЗП.

С использованием экономического исследования рыночные цены серий продукции типа *SHERPA* [42] с курсом (1 евро на 40 руб) приведены на рис. 2.



Рис.2. Рыночные цены серий продукции типа *SHERPA* с вспомогательным курсом (1 евро на 40 руб)

Из рис.2 видно, в соответствии с результатом из рис. 1 серию продукции *XXL220* можно заменять на *XXL300*, что позволяет сократить себестоимость на 25% (4000 руб) за 1 ш.