

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-  
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*

**ЧАН КУОК ФОНГ**

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ  
КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЛВЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ САМОНАРЕЗАЮЩИХ  
НАГЕЛЕЙ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор А. Г. Черных

Санкт-Петербург – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПО ПРОБЛЕМЕ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЛВЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ САМОНАРЕЗАЮЩИХ НАГЕЛЕЙ.....	13
1.1. Современные тенденции в развитии соединений деревянных конструкций.....	13
1.1.1. Современное состояние применения клееных деревянных конструкций.....	13
1.1.2. Соединения клееных деревянных конструкций с металлическими детальями.....	22
1.2. Решения узловых соединений в рамах и фермах. Характерные соединения с самонарезающими нагельями.....	26
1.3. Сравнение соединений с самонарезающими нагельями и стальными пластинами с традиционными инженерными нагельными соединениями .....	31
1.4. Российский и зарубежный опыт расчета узловых соединений с использованием самонарезающих нагелей.....	37
1.5. Напряженно-деформированное состояние элементов соединений «сталь-дерево».....	39
1.6. Выводы по главе .....	51
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ (НДС) СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ (ЛВЛ).....	53
2.1. Несущая способность нагельных соединений «сталь-дерево».....	53
2.2. Анализ механизмов разрушения соединения «сталь-дерево» .....	56
2.2.1. Режим пластичного разрушения.....	57

2.2.2. Режим хрупкого разрушения .....	62
2.3. Расчет несущей способности соединений с использованием различных моделей пластического разрушения .....	71
2.3.1. Влияние диаметра нагеля и геометрического положения элементов на предел прочности соединения (при хрупком разрушении) .....	77
2.4. Влияние допустимого отклонения между предварительно просверленным отверстием в деревянных конструкциях и нагелем .....	81
2.5. Алгоритм расчета узловых соединений деревянных конструкций (ЛВЛ) с применением самонарезающих нагелей .....	85
2.6. Выводы по главе .....	86
<b>ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ .....</b>	<b>88</b>
3.1. Определение плотности и предела прочности на сжатие ЛВЛ и прочности нагелей на растяжение .....	89
3.2. Определение фактической несущей способности для различных схем узловых соединений конструкций из ЛВЛ с несколькими стальными пластинами на сжатие .....	95
3.2.1. Методика и схемы испытаний .....	96
3.2.2. Последовательность проведения опытов. Результаты эксперимента .....	99
3.3. Определение фактической несущей способности для различных схем узловых соединений конструкций из ЛВЛ с несколькими стальными пластинами и гвоздевыми нагелями на растяжение .....	102
3.3.1. Методика и схемы испытаний .....	103
3.4. Влияние количества и схем установки пластин на несущую способность соединения сталь-дерево с самонарезающими нагелями .....	114
3.5. Выводы по главе .....	125

ГЛАВА 4. АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ (НДС) СОЕДИНЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ САМОНАРЕЗАЮЩИХ НАГЕЛЕЙ ПО МЕТОДУ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (МКЭ).....	126
4.1. Общие положения .....	126
4.2. Сравнительный анализ результатов, полученных теоретически и экспериментальных данных .....	132
4.3. Выводы по главе.....	139
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	140
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	143
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	155

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** В настоящее время с развитием технологий производства комбинированных многофункциональных металлических нагелей, сочетание металлических соединителей и деревянных конструкций становится более разнообразным в общественных и жилых зданиях. Особенно можно отметить, применение скрытых нагельных соединений в проектах каркасных конструкций, рамах и фермах. Дизайн соединений элементов деревянных конструкций приобретает первостепенное значение. Структуры эффективных узловых соединений деревянных элементов с применением скрытого быстрособираемого крепежа становятся все более востребованными в мобильных зданиях и умных городах.

Технология клееных деревянных конструкций, с применением скрытого крепежа, позволяет осуществлять эффективное и конкурентоспособное проектирование и исполнение самых сложных задач строительства в целом. Область использования таких систем достаточно широка: начиная от соединения деревянных конструкций с другими материалами, такими как сталь или бетон, до применения в конструкциях общественных и жилых зданий, спортивных сооружений, навесов для автостоянок, ограждений и лестничных пролетов.

Широкий ассортимент продукции позволяет подобрать для каждой поставленной задачи индивидуальное, надежное и рациональное техническое решение. Высокая степень предварительной сборки и быстрый монтаж соединительных элементов, гарантированно сэкономят средства при обеспечении требуемой надежности зданий и сооружений и повысят архитектурную привлекательность строительных объектов.

Исследование и совершенствование узловых соединений пространственного каркаса здания необходимо для достижения наилучшей несущей способности деревянных конструкций и уменьшения их локальных хрупких разрушений. Однако нормативные документы до настоящего времени

не содержат единой методики расчета несущей способности клееных деревянных конструкций, соединяемых с помощью стальных пластин и гладких нагелей. Проблема заключается в том, что соединения типа сталь-дерево имеют принципиальное отличие от обычных составных нагельных соединений. Поэтому для выбора оптимальных конструктивных параметров соединений требуются новые подходы к расчету, с учетом особенностей напряженно-деформируемого состояния элементов деревянных конструкций, соединяемых с помощью стальных пластин и самонарезающих нагелей.

**Степень разработанности проблемы:** основы теории расчета и результаты экспериментальных испытаний деревянных конструкций с использованием цилиндрических нагелей в практике появились в начале XX века. Предметом исследования являются, как правило, соединения «дерево-дерево» и классические соединения «сталь-дерево». Зарубежный опыт исследования узловых соединений с использованием нагелей представлен в работах: A. Mischler, Andreasson E., Kroon M., Kevarinmäki, Quenneville P., Zarnani P., Muhammed, Pedersen M. U., Hanhijärvi A., Persson Jutemar E., Petersson V., Persson L., Dorn M., Olsson P. A. T., Rossi S., Crocetti R., Honfi D., Frühwald Hansson E, K.W. Johansen, Soltis L. A., Wilkinson T. L., Jan-Willem van de Kuilen, Misconel A.; Ballerini, Dorn M., de Borst K., J. Yurrita M., Cabrero J. M. В России, – исследования известных российских учёных: Б. Л. Николаи, В. Ф. Иванова, А. Я. Найчука, В. В. Большакова, Е.Н. Серова, Г. Г. Никитина, Шмидта А.Б., В. А. Кононова, С. М. Чернявского, Ю. В. Пискунова, А. Г. Черных и других. Вопросам исследования соединений деревянных конструкций, посвящены работы ученых: Т. Н. Базенкова, П. А. Дмитриева, В. Н. Шапонилова, В. А. Кононова, Б. К. Михайлова, Н. В. Шешуковой, В. В. Пуртова, А. В. Туркова, С. А. Исупова, Е. В. Данилова, А. В. Павлика, П.Н. Смирнова, Г. Г. Никитина, М. М. Гаппоева, Е. В. Бурова, и др..

На основе результатов исследований были разработаны методики расчета и принципы проектирования узловых нагельных соединений деревянных конструкций, благодаря этому применение и производство такого типа

соединителей распространилось во многие страны. Европейский опыт применения соединений деревянных конструкций из ЛВЛ с использованием самонарезающих нагелей показал большую эффективность, по сравнению с применением классических соединений, за счет сокращения сроков монтажа и увеличения размеров конструкций по мере необходимости, в соответствии с масштабом проекта, при обеспечении достаточной жесткости соединений.

В специализированных литературных источниках опубликованы в основном результаты исследований нагельных соединений со стальными пластинами в конструкциях из ЛВЛ для больших диаметров цилиндрических нагелей, при этом сведения для малых диаметров самонарезающих нагелей ограничены, и последовательность расчетов все еще не систематизирована. Отсутствует информация об оптимальной несущей способности соединений с применением самонарезающих нагелей (СНН) в конструкциях из ЛВЛ, ограничены сведения о правилах расчета и разработке оптимальной структуры соединений деревянных конструкций из ЛВЛ.

**Цель работы:** Развитие методов расчета соединений деревянных конструкций из ЛВЛ с применением металлических прокладок и самонарезающих нагелей с учетом наступления одновременного пластического разрушения компонентов системы при растяжении.

**Задачи исследования:** Для достижения заданной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Анализ состояния вопроса по теории и практике применения самонарезающих нагельных соединителей для деревянных конструкций из ЛВЛ.
2. Провести анализ и предложить математические модели напряженно-деформируемого состояния (НДС) деревянных конструкций из ЛВЛ, с применением самонарезающих нагельных элементов соединения.
3. Исследовать влияния допустимого отклонения в отверстиях ЛВЛ и металлической пластине на работу нагельного соединения.

4. Разработать оригинальную экспериментальную оснастку и провести лабораторные исследования напряженно-деформированного состояния соединений «сталь – дерево».

5. Выполнить численное моделирование, с использованием программы Ansys 18.2 и сравнить с результатами экспериментальных исследований.

6. Обобщить результаты теоретических и экспериментальных исследований, определить алгоритм расчета соединений «сталь-ЛВЛ».

7. Предложить рекомендации по проектированию деревянных конструкций из ЛВЛ с применением самонарезающих нагельных соединителей.

**Объект исследования** – соединения элементов деревянных конструкций из ЛВЛ с применением самонарезающих нагелей с несколькими стальными пластинами.

**Предмет исследования** – пластический и хрупкий механизмы разрушения и несущая способность соединений элементов конструкций из ЛВЛ с применением самонарезающих нагелей и стальных пластин.

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

**Научная новизна исследования** работы заключается в следующем:

1. Получены новые сведения о режимах разрушения нагельных соединений деревянных конструкций из ЛВЛ со стальными пластинами, установлена зависимость несущей способности от количества пластических шарниров нагеля.

2. Разработана оригинальная методика экспериментальных исследований соединений конструкций из ЛВЛ с использованием металлических пластин и



самонарезающих нагелей при сжатии и растяжении. Получены новые данные по влиянию параметров нагельных соединений на несущую способность деревянных конструкций.

3. Подтверждена, с помощью численного моделирования, зависимость напряженно-деформированного состояния нагельного соединения от диаметра и допуска между диаметром нагеля и отверстиями в стальных пластинах.

4. Обоснована методика расчета нагельных соединений элементов деревянных конструкций из ЛВЛ с применением самонарезающих нагелей, с учетом наступления одновременного пластического разрушения компонентов системы при растяжении.

**Теоретическая значимость работы** заключается в определении несущей способности деревянных конструкций из ЛВЛ с применением стальных пластин и самонарезающих нагелей, с учетом напряженно-деформированного состояния на основе анализа механизма хрупкого и пластического разрушения элементов соединений «сталь-дерево».

### **Практическая ценность работы**

– в определении влияния параметров элементов нагельных соединений (диаметра нагеля, допусков в соединении нагель-пластина) на несущую способность и распределение напряжений в поперечных сечениях конструкции;

– в предложенной методике экспериментальных исследований по определению несущей способности цилиндрических нагельных соединений, с учетом количества и размеров стальных пластин;

– в разработке методики проведения экспериментальных исследований по определению несущей способности самонарезающих нагельных соединений, с учетом количества и размеров стальных пластин;

– в разработке алгоритма расчета соединения с несколькими стальными пластинами на основе сравнения экспериментальных данных с расчетными значениями, полученными разными методами.

**Методология и методы диссертационного исследования** основываются на применение методики конечных элементов и теоретическом исследовании моделей напряженно-деформированного состояния соединений на основе анализа механизмов хрупкого и пластического разрушения, использование экспериментальной методики с несколькими вариантами схем соединений элементов деревянных конструкций из ЛВЛ, применение различных расчетных схем соединений, сравнение полученных аналитических, численных и экспериментальных результатов исследований.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Зависимость напряженно-деформированного состояния соединений от диаметра и допуска между диаметром нагеля и отверстиями в элементах нагельного соединения.

2. Математические модели по определению несущей способности элементов деревянных конструкций из ЛВЛ с самонарезающими нагельными соединителями, на основе анализа хрупкого и пластического механизма разрушения соединений.

3. Результаты экспериментальных исследований по определению фактической несущей способности для различных схем узловых нагельных соединений конструкций из ЛВЛ на растяжение.

4. Сравнительный анализ результатов экспериментальных исследований и численного моделирования соединений деревянных конструкций из ЛВЛ с самонарезающими нагелями.

5. Методика вычисления узловых соединений деревянных конструкций из ЛВЛ с применением самонарезающих нагелей.

**Степень достоверности результатов исследований** обеспечивается применением общепринятых понятий, гипотез и допущений механики твердого деформируемого тела, современных подходов в анализе напряженно-деформированного состояния конструкций из дерева, использованием поверенного аттестованного измерительного оборудования; подтверждена

удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований и результатов численного моделирования.

### **Внедрение результатов работы**

Рекомендации по проектированию соединений из ЛВЛ с применением самонарезающих нагелей приняты для практического применения. Методика расчета и порядок сборки соединений с самонарезающими нагелями. используются в учебном процессе ФГБОУ ВО СПбГАСУ по дисциплине «Исследование и проектирование деревянных конструкций» при подготовке специалистов по направлению 08.03.01 «Строительство» на кафедре «Металлических и деревянных конструкций».

Кроме того, результаты диссертационных исследований рассматриваются для практического применения в компании «СТРОИТЕЛЬСТВО NEW SKYLINE», подтверждены сертификатами.

**Апробация работы** Основное содержание диссертационной работы доложено на следующих всероссийских и международных конференциях:

– IX Международная научно-практическая конференция «Инновации в деревянном строительстве», СПб, СПбГАСУ, 2018 г.;

– 72-я Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Актуальные проблемы современного строительства», СПб, СПбГАСУ, 2019 г.;

– 75-я Научная конференция профессорско – преподавательского состава и аспирантов университета «Актуальные проблемы современного строительства», СПб, СПбГАСУ, 2019 г.;

– 73-я Всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Актуальные проблемы современного строительства», СПб, СПбГАСУ, 2020 г.;

– МРСРЕ-2020 Международная конференция по физике материалов, строительных конструкций и технологий в строительстве, промышленности и производстве, Владимир, ВлГУ, 2020 г.;

– XII Международная конференция «Актуальные проблемы архитектуры и строительства», СПб, СПбГАСУ, 2020 г.

**Публикации** По содержанию диссертации опубликованы 8 работ, в том числе три работы в журналах, входящих в перечень ВАК; две работы в журналах, входящих в перечень SCOPUS.

### **Структура и объем работы**

Диссертационное исследование включает Введение, 4 главы, Основные результаты и Выводы, Список литературы из 120 источников. Объем диссертационного исследования составляет 164 страницы машинописного текста, в данный объем входят 129 страницы основного текста, содержащего 78 рисунков и 24 таблицы. Список литературы состоит из 120 источников, в том числе 56 источников на иностранных языках.

# **ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПО ПРОБЛЕМЕ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЛВЛ С ПРИМЕНЕНИЕМ САМОНАРЕЗАЮЩИХ НАГЕЛЕЙ.**

## **1.1. Современные тенденции в развитии соединений деревянных конструкций.**

### **1.1.1. Современное состояние применения клееных деревянных конструкций**

Древесина является древнейшим конструкционным материалом, и в отличие от бетона и стали, она относится к возобновляемым ресурсам. При этом трудозатраты клееных деревянных конструкций меньше чем другие материалы, сокращается срок строительства и снижает общий вес здания. В настоящее время популярность использования клееных деревянных конструкций в строительной отрасли растет не только в Европе и России, но и в других странах. Деревянные конструкция, такие как рамы, фермы, балки, используются в промышленном строительстве для всех видов производств, но наибольшее применение они получили при строительстве гражданских зданий под спортивные сооружения, библиотеки, выставочные и концертные залы.

Между тем, современная тенденция строительства деревянных конструкций возрастает с использованием инновационных технологий. Применение новых технологий для строительства деревянных зданий постепенно сравнивается с бетонными и стальными конструкциями. К конструкциям в зданиях возрастают требования по нагрузкам и эстетике. В современных экономических условиях значительный прирост объёмов жилищного и промышленного строительства в мире обеспечивается за счет малоэтажного и многоэтажного деревянного домостроения, при этом важно отметить экологическую безопасность, высокие показатели прочности и жесткости, отличные технологические и акустические характеристики древесины, идеальные эстетические свойства, легкость и обрабатываемость, минимальная энергоёмкость при выпуске строительной продукции. [23, 103]

Особенностью древесины является её возобновляемость и экологическая чистота по сравнению с бетоном и сталью. На долю железа и стали приходится почти 5% глобальных выбросов парниковых газов, а выбросы от других материалов в процессе строительства, таких как бетон, составляют 6%. Другими словами, железобетонные здания также способствуют изменению климата, как и выбросы от дорожных транспортных средств [59]. Создаваемые на основе древесины альтернативные конструкционные строительные материалы являются хранилищем углерода, позволяют реализовать циркулярную экономику замкнутого цикла, минимизировать отходы и увеличить пользу для общества (см Рис 1.1)



Рис. 1.1. Схемы использования древесных ресурсов в строительных работах

Древесина – анизотропный материал, ее прочностные характеристики различаются в разных направлениях (пределы прочности при сжатии вдоль

волокон, растяжении и изгибе). Исследование начальных напряжений и свойств анизотропии древесины и древесных материалов, их влияние на физико-механические и технологические свойства имеет важное научное и практическое значение [7, 9, 10]. Устойчивое развитие и эффективность требуют разработки современных деревянных конструкций с высокой несущей способностью и прочностью.

Появление клееных деревянных конструкций подарило новую жизнь древесине как строительному материалу. Широкие возможности применения, архитектурная выразительности, экологическая безопасность, высокие технико-экономические показатели позволяют клееным деревянным конструкциям завоевывать все большее внимание в наше время. Наиболее интересными свойствами таких конструкций являются: возможность перекрытия больших пролетов при низкой удельной массе, удобство транспортировки и монтажа. Положительные стороны использования клееных деревянных конструкций высоко оценили при строительстве гражданских зданий в Европе. Отдельного внимания заслуживают архитектурно-выразительные пространственные плоскостные конструкции [7].

Исследованием физико-механических и конструктивных свойств древесины занимались: Е. К. Ашкенази, Ф. П. Белянкин, С. И. Ванин, В. Н. Глухих, В. М. Хрулев, А. Б Шмидт, Е. В Данилов, А. Г. Черных, А. Н. Белова и А. И. Кузнецова, А. Г Горшков, В. Г Миронов [1, 5, 9, 10, 11, 29, 61].

**LVL****PSL****UTRALAM**



Рис. 1.2. Популярные типы клееных деревянных конструкций и потенциал развития в будущем деревообрабатывающей промышленности

Разработка и внедрение деревянных пространственных конструкций (оболочки, складки, купола, структура и т.п.) из клееной древесины приобретают большое значение в повышении эффективности используемых материалов. Применение современных клееных деревянных конструкционных материалов (CLT, LVL, GLT, PSL, UTRALAM, и др..) позволило увеличить высоту зданий до 18 этажей и выше. Пространственные конструкции являются во многих случаях одновременно несущими, ими можно перекрывать большие пролеты. В качестве примера можно привести данные о наибольших пролетах уникальных сооружений, перекрытых клееными деревянными конструкциями [25] Табл. 1.1

Таблица 1.1. Ограничение этажности деревянных сооружений в мире

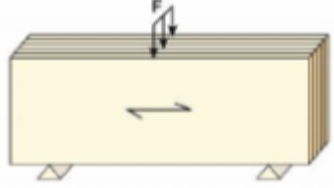



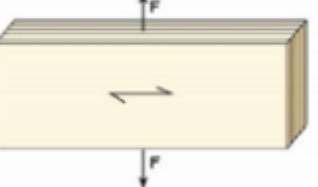
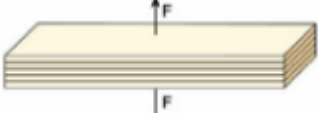

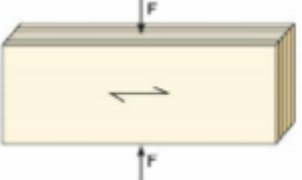
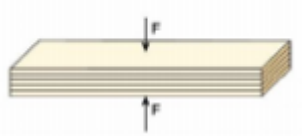



Страна	Наибольший пролет (по возрастающим значениям), м	Назначение сооружения и место строительства
Литва	50	Склад торговой базы
Германия	60	Зимний стадион в г. Греффрате
Россия	63	Крытый каток в г. Архангельске
Великобритания	67	Спортивный зал в г. Перте
Швейцария	85	Ледовый стадион в г. Берне
Финляндия	87	Спортивный зал в г. Виерумаки
Канада	93	Здание склада в провинции Квебек



Австрия	96	Лесоторговый павильон в г. Клагенфурте
Бельгия	98	Крытый рынок в г. Генте
Франция	100	Выставочный павильон в г. Туре
США	158	Крытый стадион в г. Флагстаффе

В настоящей работе рассматриваются деревянные конструкции, выполненные из клееного однонаправленного шпона (ЛВЛ). Исследуются свойства ЛВЛ [103,105, 109], как строительного материала, особенности его производства, экологичность и безопасность; показано применение ЛВЛ в различных зданиях и сооружениях; рассмотрены рекомендации в первую очередь для проектировщиков представлена более подробная информация о проектировании конструкций, пожарной безопасности, прочности и строительной физике, включая примеры расчета конструкций.

Табл. 1.1. Типы напряженно-деформированного состояния ЛВЛ

 <p>а. Изгиб по кромке вдоль волокон</p>	 <p>б. Изгиб по пласти вдоль волокон</p>	 <p>в. Изгиб по пласти поперек волокон</p>
 <p>г. Растяжение вдоль волокон</p>	 <p>д. Растяжение поперек волокон, по кромке</p>	 <p>е. Растяжение поперек волокон, по пласти</p>
 <p>ё. Сжатие вдоль волокон</p>	 <p>ж. Сжатие вдоль поперек, по кромке</p>	 <p>з. Сжатие вдоль поперек, по пласти</p>
 <p>и. Скалывание по кромке вдоль волокон</p>	 <p>й. Скалывание по пласти вдоль волокон</p>	 <p>к. Скалывание по пласти поперек волокон</p>

Клееный брус ЛВЛ имеет минимальные показатели естественной усадки, устойчив к воздействию влаги, не подвержен гниению, является полностью однородным материалом с неизменными качествами по всей длине.

Производство ЛВЛ торговой марки Ультралам является безотходным: технологические остатки идут на выпуск белых пеллет (топливных гранул класса премиум). Продольное прессование всех слоев позволяет получить брус марки Ультралам, отличающийся особенно высокой прочностью и устойчивостью к деформациям, что делает его пригодным для возведения несущих строительных конструкций (балок, рам, ферм...), таблица 1.2 [19, 20, 48]

Таблица 1.2. Продукция Ультралам типов R имеют следующие стандартные линейные характеристики (типоразмеры)

Тип материала	Характеристика	Область применения
(Ультралам R)	Все слои шпона имеют параллельное направление волокон, для изготовления используется шпон сортов G1 – G2 (преимущественно сорт G2)	Преимущественно в несущих конструкциях
(Ультралам X)	Отдельные слои шпона имеют взаимно перпендикулярное направление волокон, для изготовления используется шпон сортов G2 - G3	Несущие и ограждающие конструкции
(Ультралам I)	Слои шпона могут иметь как параллельное, так и взаимно перпендикулярное направление волокон, для изготовления используется шпон сортов G3 - G4	Ограждающие конструкции, в том числе заготовки для дверного и мебельного производства и т.д.

Обзор нормирования и применения ЛВЛ бруса в отечественной и зарубежной строительной практике в исследовании авторов: А. Б. Шмидт, А. Г Черных, Е. В. Дпнилов, П. С. Коваль, Д.А.Животов , и др. [51, 52, 53, 61]

Для конструкций типа ферм, рам, арок, стержневых куполов, и т.п. характерно большое количество узловых соединений. В типовых зарубежных проектах используются фермы и рамы с использованием клееных деревянных конструкций. Mогö Vaske Школа F9, (Год постройки: 2017/2018, Архитектор: MAF Arkitektkontor, Конструктор: Martinsons Byggsystem, Площадь: Skellefteå), Рис. 1.2 Universeum Gothenburg, (Год постройки: 2001, Архитектор: Wingårdh Arkitektkontor AB, Gothenburg, Конструктор: FB инженер AB, пять этажи), Выставочный центр в Агордо, Италия, (Год постройки: 2020, Архитектор: Studio Botter, Studio Bressan., Конструктор: Fabio Valentini., Внешние размеры: 112 x 57 x 14,8 метра). (см. рис. 1. 3-5)



Рис. 1.3. Morö Vaske Школа F9, (Год постройки: 2017/2018, Архитектор: MAF Arkitektkontor, Конструктор: Martinsons Byggsystem, Площадь: Skellefteå)



Рис. 1.4. Universeum Gothenburg, (Год постройки: 2001, Архитектор: Wingårdh Arkitektkontor AB, Gothenburg, Конструктор: FB инженер AB, пять этажей)



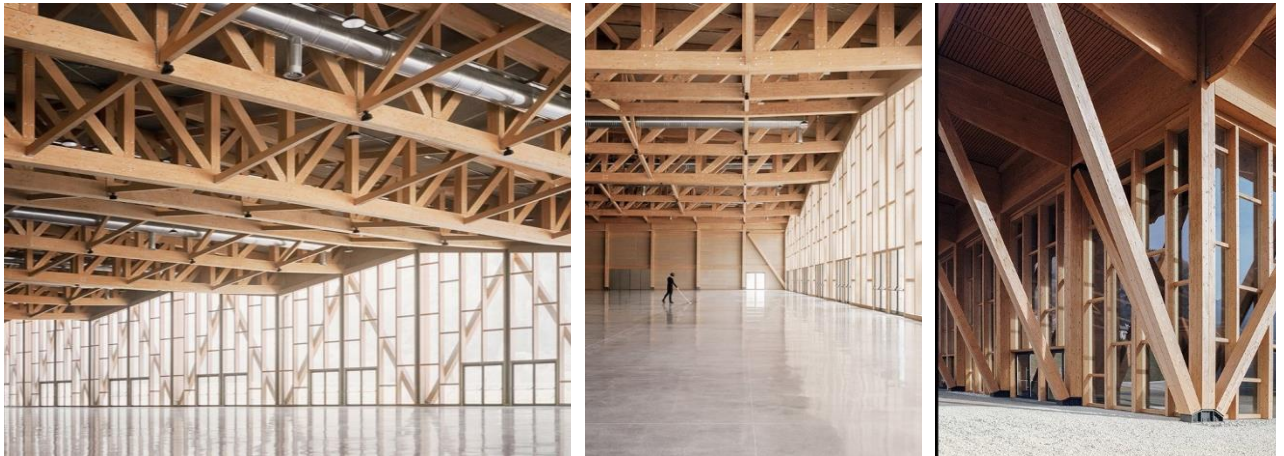
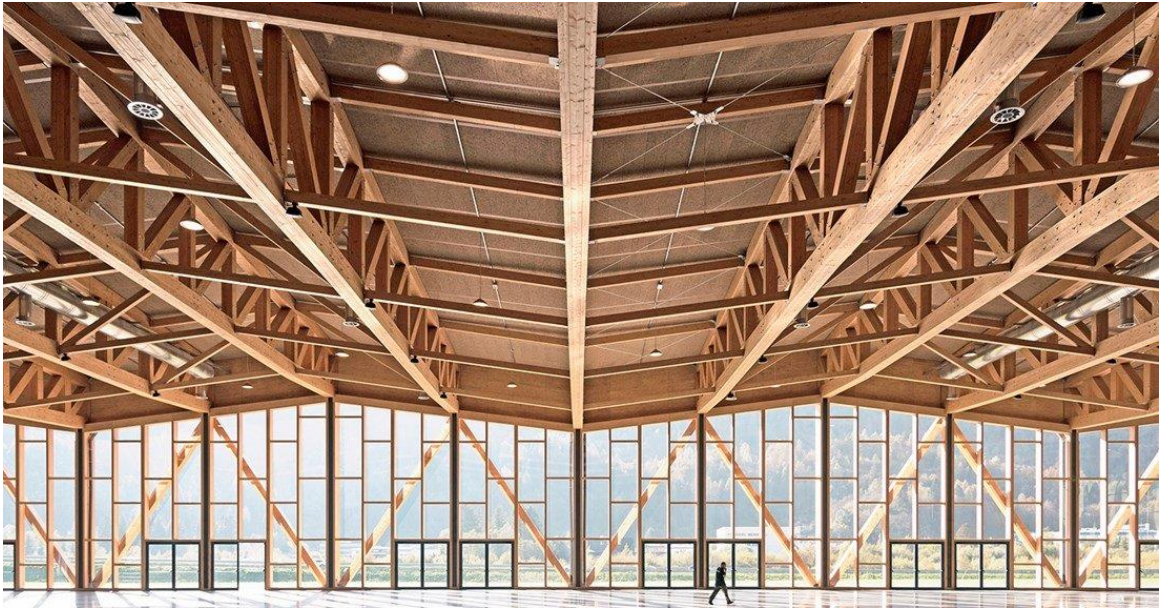


Рис. 1.5. Выставочный центр в Агордо, Италия, (Год постройки: 2020, Архитектор: Studio Botter, Studio Bressan., Конструктор: Fabio Valentini., Внешние размеры: 112 x 57 x 14,8 метра)

К тому же, на данный момент успешно реализовано множество объектов: в олимпийском спортивном зале в Солт-Лейк-Сити (США) купольное сетчатое покрытие ячейками диаметром 150 метров и высотой 38 метров выполнено из клееных деревянных балок; овальный спортивный зал в городе Пуатье (Франция), основной несущей конструкцией покрытия которого является клееная деревянная арка пролетом 75 метров; во дворце спорта, город Архангельск (Россия), клееные деревянные сегментные арки пролетом 63 метра [19, 20].



Рис. 1.6. Производство Фермы, используются соединения с применением самонарезающих нагелей

#### 1.1.2. Соединения клееных деревянных конструкций с металлическими деталями.

Для деревянных конструкций исправность и долговечность конструкции в основном зависят от надежности стыков между элементами. Для часто используемых соединений различают столярные соединения и механические соединения, которые могут быть выполнены с помощью нескольких типов крепежа. Традиционные механические крепежные элементы делятся на две группы, в зависимости от того как они передают усилия между соединяемыми элементами [3, 22, 59].

Для конкретной конструкции выбор крепежных элементов определяется не только нагрузкой и условиями несущей способности. Это также включает в себя такие соображения, как эстетика, экономическая эффективность и процесс изготовления. Способ возведения и предпочтения проектировщика или архитектора также могут играть определенную роль. Невозможно указать набор правил, из которых можно построить наилучшее соединение для любой заданной



структуры. Основная идея заключается в том, что чем проще соединение и чем меньше крепежных элементов, тем лучше структурный результат.

Основная группа соответствует дюбельному типу крепежа. Здесь передача нагрузки включает в себя как изгибное поведение дюбеля, так и опорные и сдвиговые напряжения в древесине, вдоль хвостовика дюбеля. К этой группе относятся скобы, гвозди, шурупы, болты и дюбели. Второй тип включает крепежные элементы, такие как разрезные кольца, срезные пластины и перфорированные металлические пластины, для которых передача нагрузки в первую очередь достигается большой опорной площадью на поверхности элементов. В данном исследовании рассматриваются только крепежные детали типа нагелей.

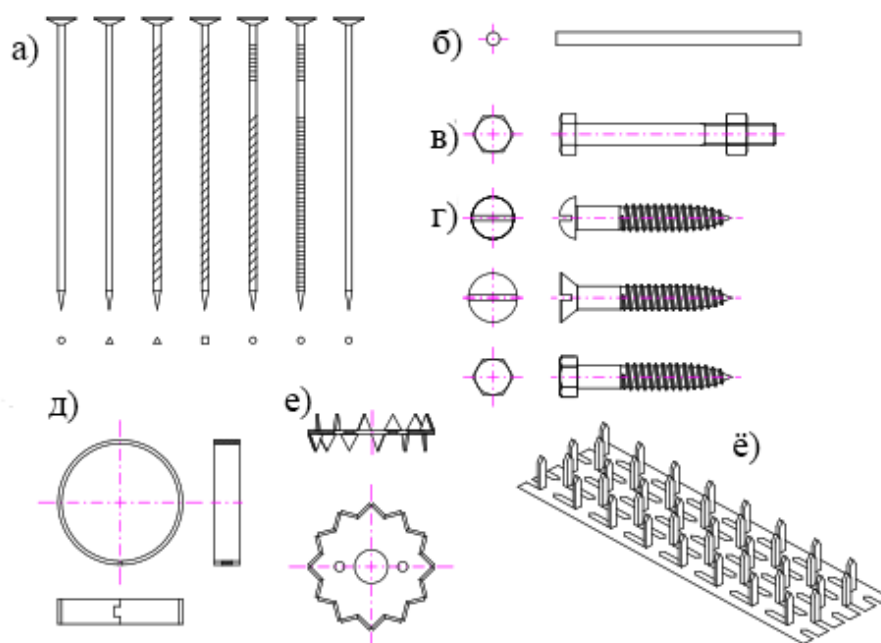


Рис. 1.7. Металлический крепеж: а) гвозди, б) нагель, в) болт, г) винты, д) разъем с разрезным кольцом, е) разъем с зубчатой пластиной.

За прошедшие десятилетия было разработано и усовершенствовано множество различных типов соединений. От простых соединений дерева к дереву к современным болтовым соединениям (рис.1.7). Создание деревянных конструкций при помощи цилиндрических нагелей насчитывает многие столетия. Нагельные соединения получили существенное развитие и широко

применяются за рубежом – в Финляндии, Франции, Соединенных Штатах Америки, Канаде и др. [34, 65, 67, 68]

Исследование проблем соединения дерева с помощью металлических деталей в узловых соединениях приведены на Рис. 1.8

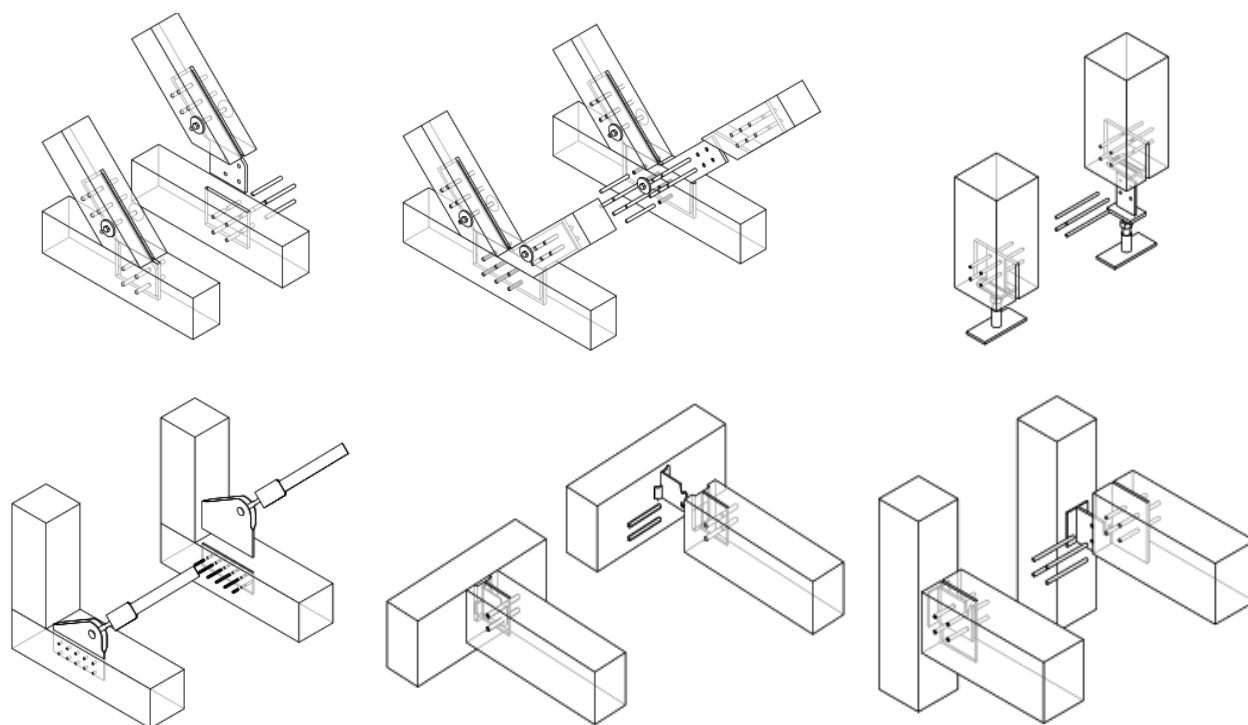


Рис. 1.8. Варианты узловых соединений конструкций с применением стальных пластин

Нагели различают по признакам: по виду применяемых материалов: а) металлические, применяемые в наземных строительных конструкциях; б) деревянные, применяемые в гидротехнических конструкциях; в) композитные, применяемые в конструкциях, эксплуатируемых в агрессивной среде. По форме: а) цилиндрические; б) пластинчатые. Или по производственному признаку [46].

В соединении с использованием стальных соединителей, детали деревянных конструкций неподвижны относительно друг друга, так как являются одним целым с конструкцией. В этом есть особенности механизма работы соединяемых элементов и механических связей, через которые усилия передаются от элемента к элементу. Металлические детали в соединениях можно условно разделить на несколько основных групп по механизму работы: нагели;



болты; шурупы; винты; гвозди, работающие на изгиб; соединения на клеестальных шайбах, работающие на сдвиг; стальные хомуты; болты; накладки, работающие на растяжение.

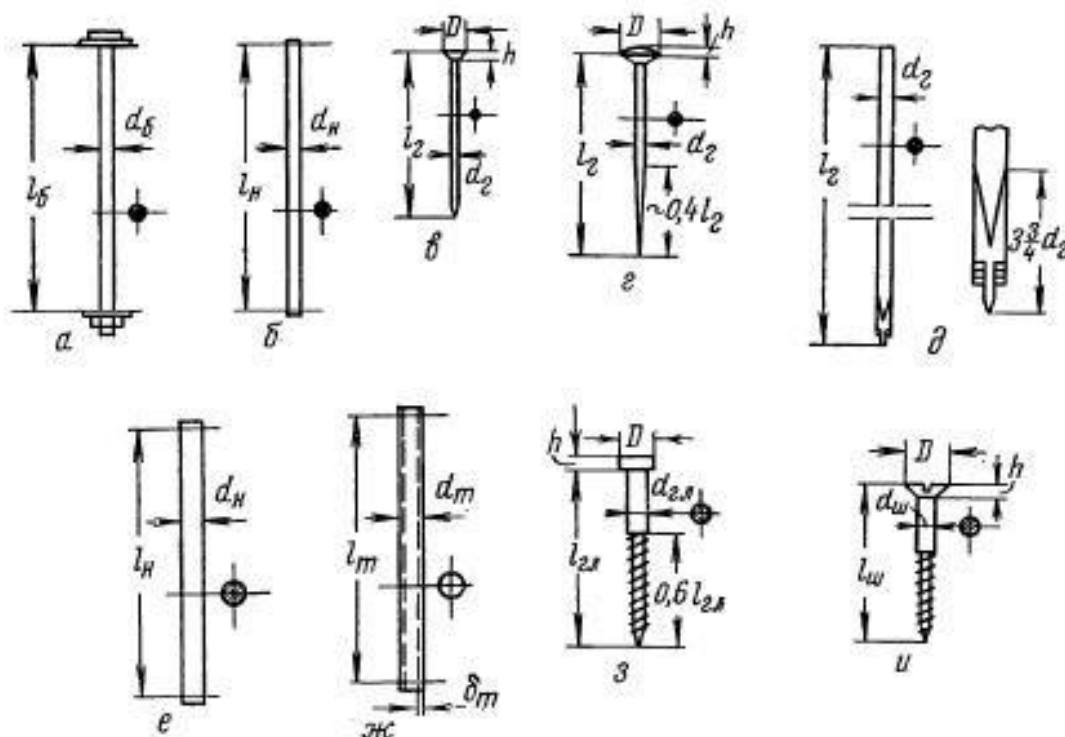


Рис. 1.9. Цилиндрические нагели: а) болт; б) штырь; в) гвоздь проволочный; г) гвоздь кованый; д) гвоздь крупноразмерный со специальной заточкой конца; е) дубовый нагель; ж) трубка; з) глухарь; и) шуруп.

Нагель – это крепёжное изделие, которое можно охарактеризовать как длинный, гибкий стержень. Он служит для соединения между собой элементов деревянных конструкций и препятствует их взаимному сдвигу. Сам нагель при этом работает главным образом на поперечный изгиб. Цилиндрические нагели: болты и штыри (стержни из круглой стали), винты, проволочные гвозди. Нагельные соединения широко распространённый тип механических соединений в конструкциях постоянного и временного назначения [21, 26, 29, 30]. Нагели часто применяются не только при сборке деревянных конструкций, но и при их усилении, ремонте, восстановлении (см. рис. 1.9).

## **1.2. Решения узловых соединений в рамах и фермах. Характерные соединения с самонарезающими нагелями.**

В предыдущих исследованиях были проведены значительные работы, касающиеся гвоздей, шурупов и болтов [2, 22]. Большая часть из которых была задействована в расчете несущей способности и прогнозировании режима отказов соединений. Исследования были также выполнены на конструкционных древесных материалах, таких как клееный брус ЛВЛ и поперечно-клееные панели (CLT) [26, 27, 28,].

В настоящее время возрастает тенденция применения деревянных конструкций с использованием современных технологий. В деревянных рамах и фермах применение нагельных соединений – главный фактор при принятии конструктивных решений. Прочность соединения обычно определяет надежность всей конструкции. Нагрузки сосредоточены на соединении, где и возникает местное напряжение. Расчет несущей способности соединений является актуальной проблемой.

На практике рассматривается и применяется множество решений нагельных соединений. Из двадцати пяти процентов, недавно рассмотренных разрушений деревянных конструкций, половину составляют соединения с нагелями [57, 60]. Нагельные соединения с использованием металлических пластин увеличивают несущую способность конструкции. В последние годы осуществляются исследовательские проекты по данному направлению. Этот тип соединения появился в 1940-х годах (Gehri [95]) – решение для большепролетной фермы, выполненной из узлов с несколькими стальными пластинами Crocetti [78], здание «Treet» в Бергене (Норвегия), 14-этажное деревянное здание из вертикальных ферм, применение такого соединения объясняется Malo et al. [106], Швейцарский федеральный технологический институт в Цюрихе (ETH), Швейцария в рамках исследовательского проекта по оптимизации конструкции соединения типа SBS (Mischler 1998a, 1999) [107, 108].

Новый самонарезающий нагель, позволяет просверливать отверстие в древесине и стальных пластинах и монтировать соединение без предварительного сверления. Эта инновационная технология с применением самонарезающих нагелей, при которой нагельные соединения могут достигать высокой несущей способности.



Рис. 1.10. Самонарезающий нагель типа WS-T-7 Производства SFS-Stadler AG

Нагели используются в соединении растянутых элементов, в узлах деревянных ферм и рам. Нагельные соединения отличаются податливостью. Усилия распределяются между нагелями достаточно равномерно, что способствует повышению надежности таких соединений. Простота изготовления и надежность нагельных соединений обеспечили их распространение и в современном строительстве.



Рис. 1.11. Соединения деревянных конструкций с использованием самонарезающих нагелей

Соединения «сталь – дерево» с применением самонарезающих нагелей со стальными пластинами могут достигать высокой несущей способности. Обычно стальные пластины вводятся в пазы и просверливаются вместе с деревянными элементами на всю длину нагелей. В этом случае, вставленные стальные пластины должны быть предварительно просверлены, установка нагелей в правильное положение отверстий стальных пластин является сложной задачей. Чтобы нагели могли свободно вгоняться сквозь одну или несколько накладок, диаметр просверливаемого отверстия должен быть равен диаметру нагеля. Если прокладки не обжаты сбоку деревянными элементами, то в результате действия сжимающей силы возникает опасность их выпучивания. В таких случаях опасность сжатия должна быть уменьшена путем ликвидации зазоров между стальной пластиной и древесиной. Соединения типа «сталь-дерево» с тонкими стальными листами, которые пробиваются насквозь без предварительного сверления, определяются строительными допусками, так как при использовании тонких листов опасность выпучивания особенно велика. [23, 57, 58]

При пропилах пазов и забивке нагелей в наружные стальные листы требуется особенно аккуратная и точная работа. Системы «сталь-дерево» позволяют осуществить присоединение к узлу нескольких брусев. Нагели, соединяя деревянные элементы со стальными пластинами, подвергаются срезу по нескольким слоям. Допустимая нагрузка на нагели повышается по мере увеличения их несущей способности. Многосрезные нагельные соединения способны при сравнительно малой поверхности пластин воспринимать большие усилия. Например, несущая способность четырехсрезного нагеля в четыре раза больше, чем односрезного [120].

Ниже приводится пример практического применения стальных пластин и самонарезающих нагелей при строительстве общественного здания в Санкт-Петербурге. В реальной практике строительства часто требуются большие размеры конструкций, например, 20-метровых балок и 10-метровых колонн, используемых в общественных зданиях. Однако транспортировка таких конструкции с завода на строительную площадку – это сложная проблема. Было

найдено следующее решение. Завод изготовил балки длиной по 7 метров одинакового размера сечения. При помощи уникальной технологии короткие балки были сращены в длинномерные уже на объекте. Для сращивания были использованы самонарезающие нагели со стальными пластинами.

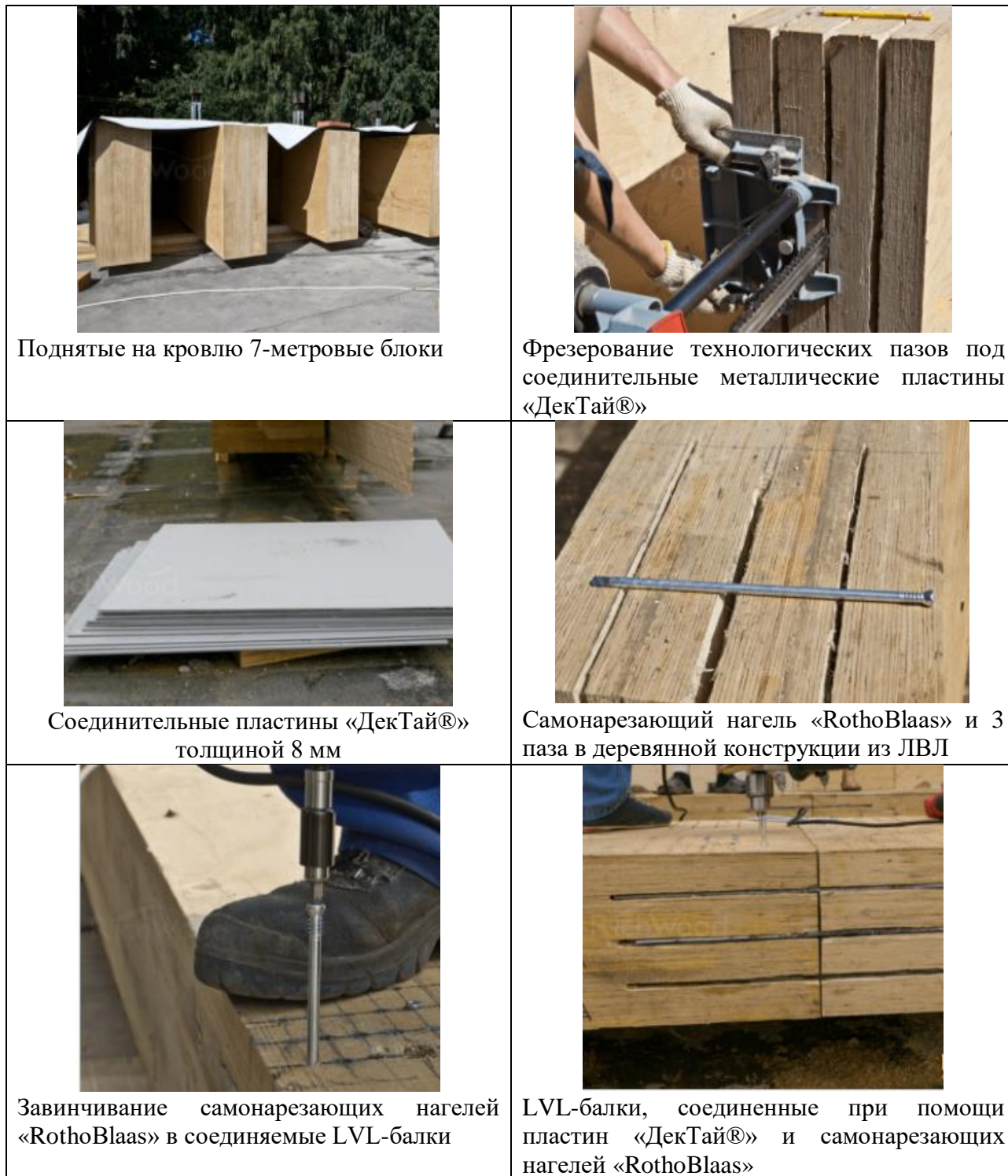


Рис. 1.12. Длинномерные LVL из соединений с самонарезающими нагелями

Длинномерные ЛВЛ-балки выполнены методом сращивания из короткомеров. Балки установлены на РПО-опоры, обшиты щитами из Тика.

*Современное строительное оборудование для соединений с использованием самонарезающих нагелей*

Для просверливания нагелем отверстия в стали и древесине применяется специальное оборудование. Для эффективной сборки крупных конструкций с большим количеством нагелей разработаны специализированные сверлильные машины. Инструмент оснащен мощным двигателем, направляющим штифтом и регулятором глубины. Нагели вставляются заподлицо с поверхностью. Регулятор глубины обеспечивает согласованную глубину всех соединителей [23]. (см. рис. 1.13).

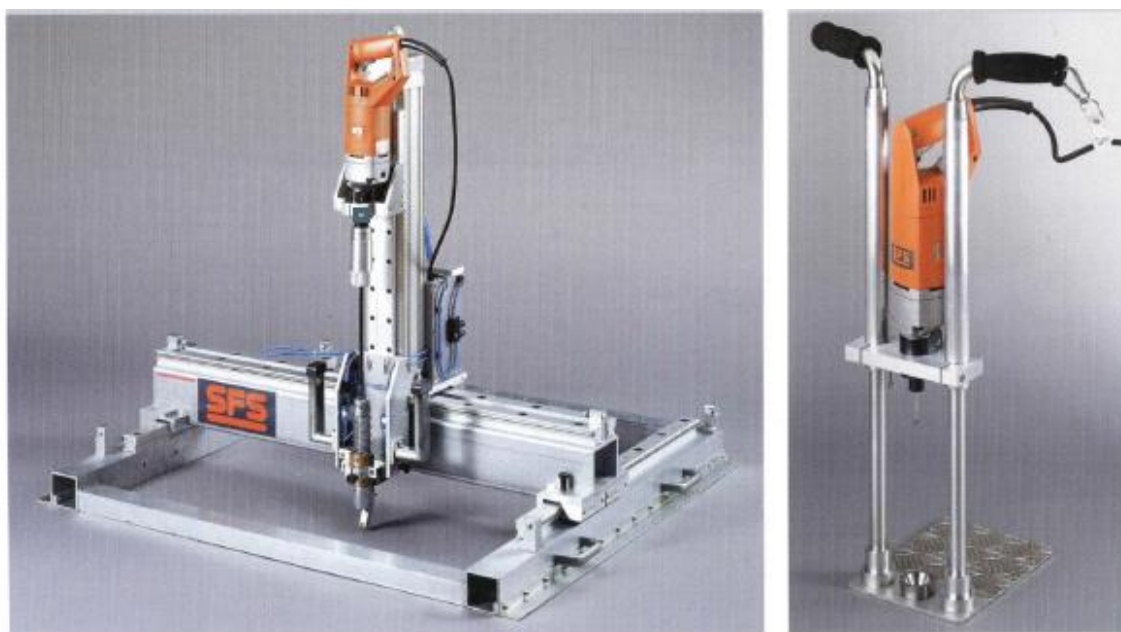


Рис. 1.13. Специализированные сверлильные машины (пневматический CF WS/P и ручной версии CF WS/M) для нагеля типа FSF.

Кроме того, используются специальные шурупверты для установки нагелей в вертикальной и горизонтальной плоскости



Магнитный держатель бит.



Вставка бита T40 диск.

Рис. 1.14. Сверлильный станок (пневматический и ручной версии) для нагеля типа FSF, WS диаметр 5 – 7 мм

В европейских странах широко применяются и развиваются соединения с самонарезающими нагелями. Инструкции по проектированию вводят в практическое использование типов нагелей WS-T-5, WS-T-7, таблица 1.3 и 1.4.

Таблица 1.3. Рекомендуемые характеристики нагелей (5мм) в соединениях с различными размерами деревянных элементов

WS-T-5xL					
Тип	Материал Т-углеродистая сталь	Диаметр (мм)	Длина (мм)	Толщина деревянной части (мм)	Стальные пластинки, шт.
WS	T	5	73	80	1
WS	T	5	93	100	1
WS	T	5	113	120	1
WS	T	5	133	140	2

Таблица 1.4. Рекомендуемые характеристики нагелей (7мм) в соединениях с различными размерами деревянных элементов

WS-T-7xL					
Тип	Материал Т-углеродистая сталь	Диаметр (мм)	Длина (мм)	Толщина деревянной части (мм)	Стальные пластинки, шт.
WS	T	7	113	120	1
WS	T	7	133	140	2
WS	T	7	153	160	2
WS	T	7	173	180	3
WS	T	7	193	200	3
WS	T	7	213	220	3
WS	T	7	233	240	3

### 1.3. Сравнение соединений с самонарезающими нагелями и стальными пластинами с традиционными инженерными нагельными соединениями



Ниже представлены возможные структуры традиционных нагельных соединений и варианты со стальными пластинами с использованием самонарезающих нагелей.

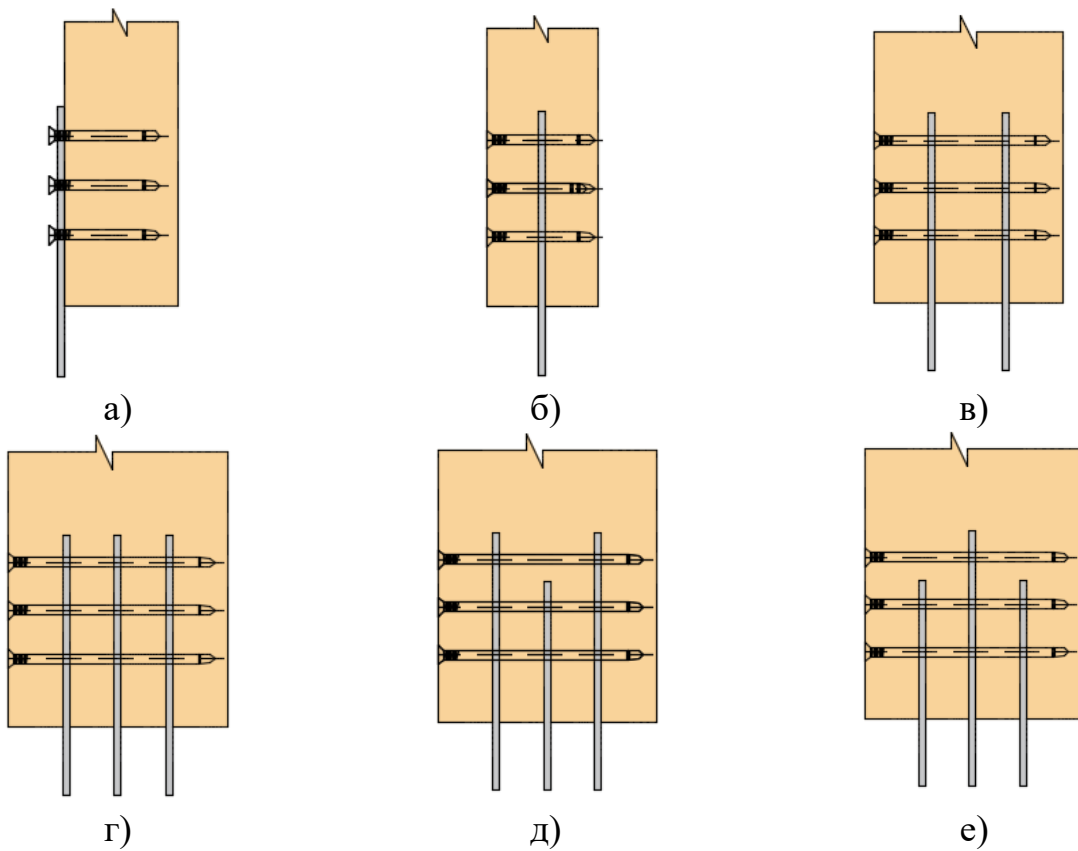


Рис. 1.15. Возможные варианты структуры соединения с использованием самонарезающих нагелей с различными рабочими механизмами в зависимости от количества стальных пластин в соединении

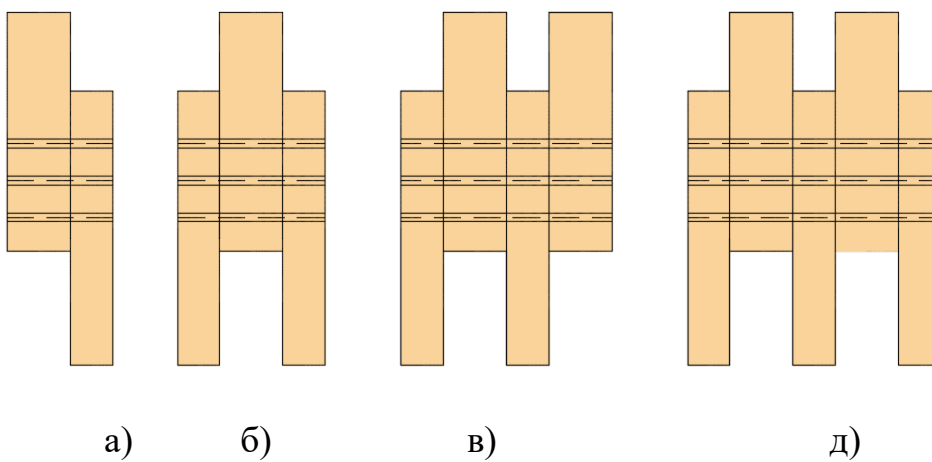


Рис. 1.16. Пример различных типов традиционных соединений с использованием цилиндрических металлических или деревянных нагелей



Сталь-дерево (на рисунке 1.15) – это соединения деревянных элементов посредством металлических пластин с помощью самонарезающих нагелей. В деревянных конструкциях пропиливаются пазы, в которые вставляются стальные пластины. Затем с помощью специальных приспособлений и мощных дрелей самонарезающие нагели строго перпендикулярно просверливают отверстия непосредственно сквозь деревянные конструкции и стальные пластины. Возможно соединение конструкций разных размеров с помощью стальных пластин. Это позволяет выполнять сложные соединения и увеличивать длину балок и колонн.

Традиционные нагельные соединения (на рисунке 1.16) – это составные конструкции. Элементы деревянных конструкций кладут друг на друга и соединяют цилиндрическими нагельными из дерева или металла, поэтому общая конструкция не является плоской и эстетичной. В то же время, такое соединение вызывает эксцентриситет и изменяет рабочее направление элементов соединения в конструкции. Для длинных элементов конструкций (балок, колон) с традиционными соединениями, необходимо уменьшать поперечное сечение деревянных конструкций в месте соединения до необходимого размера. Однако это снижает несущую способность конструкции. Несущая способность соединения составных конструкций намного меньше, чем у базовой конструкции, что дополнительно увеличивает расход материала.

Прочность соединения изменяется в зависимости от параметров стальных пластин, следовательно, легко можно настроить увеличение или уменьшение несущей способности соединения в соответствии с заданным типом большой, средней и маленькой деревянных конструкций. Это демонстрирует гибкость соединения с помощью стальных пластин. Стальные пластины в соединении действуют как «посредник», эффективно связывая элементы конструкций в различном положении в структуре сооружения между деревянными элементами и другим материалом (металлические крепления, железобетон...).

Ниже приводится сравнение расчетных математических формул несущей способности между двумя типами соединениями «дерево-дерево» и «дерево-сталь-дерево» в российских стандартах и Еврокод 05.2011

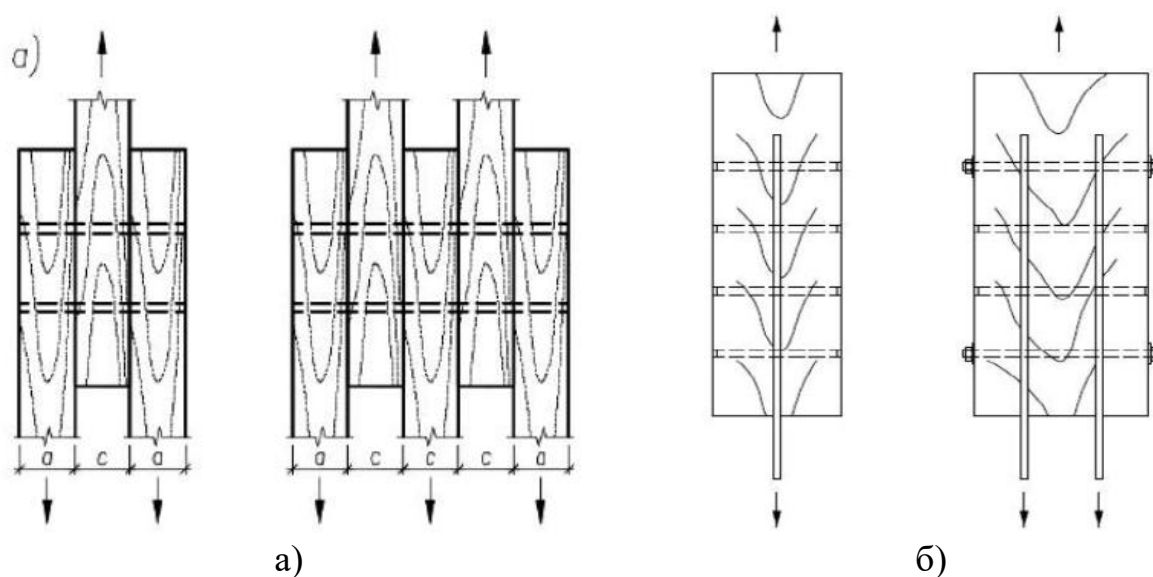


Рис. 1.17. а) виды соединений по конструктивному сочетанию нагелей; б) нагельные соединения с прокладками

Расчет по СП. 64.13330.2017 [39, 40]

$$T = \begin{cases} 0,75cdk_{\alpha} \\ 1,2adk_{\alpha} \\ (2,2d^2 + 0,025a^2)\sqrt{k_{\alpha}} \leq 3,1d^2 \end{cases} \quad (1.1)$$

где  $T$  – несущая способность одного нагеля одного среза в соединении, кН;

$c$  – толщина среднего деревянного элемента, см;

$a$  – толщина крайнего деревянного элемента, см;

$d_n$  – диаметр нагеля, см;

$k_{\alpha}$  – коэффициент, учитывающий угол приложения нагрузки.

Рассчитывается несущая способность одного нагеля и одного среза в соединении с учетом поперечных сечений частей деревянной конструкции. Формула  $(0,75cdk_{\alpha})$  для внутренней части древесины и формула  $(1,2adk_{\alpha})$  для внешней части древесины, и без учета влияния стальных пластин в соединении.

Таким образом, оба типа соединения «деревяно-деревяно» и «сталь-деревяно» рассчитываются по одним и тем же формулам (по режиму смятия древесины в соединении).

Расчет по Еврокод 05 [89]

В формуле согласно E05 с учетом различия двух типов соединения «деревяно-деревяно» и «сталь-деревяно».

Несущая способность одного нагеля и одного среза в соединении «деревяно-деревяно» с учетом режимов разрушения нагеля (см. п. 8.2.2) [89]

Несущая способность нагеля для односрезных соединений:

$$F_{v,R_k} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d \\ f_{h,2,k} t_2 d \\ 1,15 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{1 + \beta} \sqrt{\beta + 2\beta^2 \left[ 1 + \frac{t_2}{t_1} + \left( \frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right]} + \frac{F_{ax,R_k}}{4} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \left[ \sqrt{2\beta^2 + (1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,R_k}}{f_{h,1,k} d t_1^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,R_k}}{4} \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_2 d}{1 + 2\beta} \left[ \sqrt{2\beta^2 + (1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_{y,R_k}}{f_{h,1,k} d t_2^2}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,R_k}}{4} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,R_k} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,R_k}}{4} \end{cases} \quad (1.2)$$

Несущая способность нагеля для двухсрезных соединений

$$F_{v,R_k} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d \\ 0,5 f_{h,2,k} t_2 d \\ 1,05 \frac{f_{h,1,k} t_1 d}{2 + \beta} \sqrt{2\beta + (1 + \beta) + \left( \frac{4\beta \cdot (2 + \beta)}{f_{h,1,k} d t_1^2} - \beta \right)} + \frac{F_{ax,R_k}}{4} \\ 1,15 \sqrt{\frac{2\beta}{1 + \beta}} \sqrt{2M_{y,R_k} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,R_k}}{4} \end{cases} \quad (1.3)$$

Несущая способность одного нагеля и одного среза в соединении «сталь-деревяно» с учетом режимов разрушения соединения (см. п. 8.2.3) [89]

Несущая способность нагеля для двухсрезного соединения древесины со стальной пластиной любой толщины между двумя деревянными элементами определяется по формуле (1.4)

$$F_{v,R_k} = \min \begin{cases} f_{h,1,k} t_1 d \\ f_{h,1,k} t_1 d \left[ \sqrt{2 + \frac{M_{y,R_k}}{f_{h,1,k} d \cdot t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,R_k}}{4} \\ 2,3 \sqrt{M_{y,R_k} f_{h,1,k} d} + \frac{F_{ax,R_k}}{4} \end{cases} \quad (1.4)$$

Несущая способность нагеля для двухсрезного соединения двух тонких стальных пластин и деревянного элемента между ними определяется по формуле (1.5)

$$F_{v,R_k} = \min \begin{cases} 0,5 f_{h,2,k} t_1 d \\ 1,15 \sqrt{2 M_{y,R_k} f_{h,2,k} d} + \frac{F_{ax,R_k}}{4} \end{cases} \quad (1.5)$$

Видно, что в стандарте Е05 расчет несущей способности соединения рассчитывается не только в соответствии с механизмом смятия древесины, но также учитывается и механизм изгиба нагеля в соединении.

В предыдущих исследованиях [30, 31, 32, 35, 53] сравнение значений несущей способности соединения «дерево-дерево», по СП.64.13330.2017 и Еврокод 5, дало аналогичные значения. Необходимо сравнить и расчет несущей способности для типа соединения «сталь-дерево». Отсюда возможна гармонизация применения двух стандартов в расчетах с коэффициентом пересчета. Актуальна разработка методов расчета и проведение экспериментов для типа соединения «сталь – дерево» с несколькими стальными пластинами.

#### **1.4. Российский и зарубежный опыт расчета узловых соединений с использованием самонарезающих нагелей.**

Крепежная система WS в Европе является распространенным типом соединения. Данным соединением успешно сопрягаются отпавочные марки ферм, балок, колонны с основанием, узлы рам и других конструкций. Применяется в строительстве спортивных комплексов (конных сооружений, бассейнов, спортивных залов), жилых зданий. В России же имеются единичные случаи применения таких соединения в узлах деревянных конструкций.

Область применения – конструкции ферм различного пролета, стоек, балок, колонн, конструкций малоэтажного строительства, мостов, смотровых башен, балконных балюстрад, вышек для лыжных спусков и в других конструкциях. Данный вид проектируется в узловых соединениях элементов конструкций.

Опыт исследования узловых соединения с использованием нагелей в России и за рубежом: Kroon, M., Andreasson, E., Persson Jutemar, E., Petersson, V., Persson, L., Dorn, M., & Olsson, P. A. T., Rossi S., Crocetti R., Honfi D., Frühwald Hansson E, K.W. Johansen (1949), П.А. Дмитриева, А. Mischler (2001), Quenneville and Mohammad (2000), Soltis L. A., Wilkinson T. L., Jan-Willem van de Kuilen (2010), Misconel, A.; Ballerini (2016), Dorn, M., de Borst, K., & Eberhardsteiner, J. Yurrita M., Cabrero J. M. [84, 85, 86, 87, 104, 114, 116, 117, 118, 119].

В России исследования известных учёных: В.М. Коченова (1953), Б. Л. Николаи, В. Ф. Иванова, А. Я. Найчука, В. В. Большакова, А. В. Павлика, Г. Г. Никитина, В. А. Кононова, С. М. Чернявского, Ю. В. Пискунова, А. Г. Черных и других [35, 36, 37, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 61]. Вопросам нагельных соединениям деревянных конструкций, посвящены работы Ю.В. Пискунова, Т. П Черновой, А. Б. Шмидта, В.П. Забродина, А. А. Серегина, М. В. Суханова, А. Б. Портакова, [33, 49, 61, 62, 63].

Две деревянные конструкции соединяются металлическими пластинами с помощью нагелей. Отделённые пропилами части деревянной конструкции остаются неподвижными и подвергаются только смятию. В процессе растяжения, за счет податливости соединения изменяется расстояние между двумя соединяемыми деревянными конструкциями [3, 72, 73, 74]. Или другими словами, передача усилий между элементами происходит дискретно от одного к другому, по площади контакта соединяемых конструктивных элементов соединений.

Блок схема зависимости несущей способности от конструктивных параметров соединения представлена на Рис. 1.18.

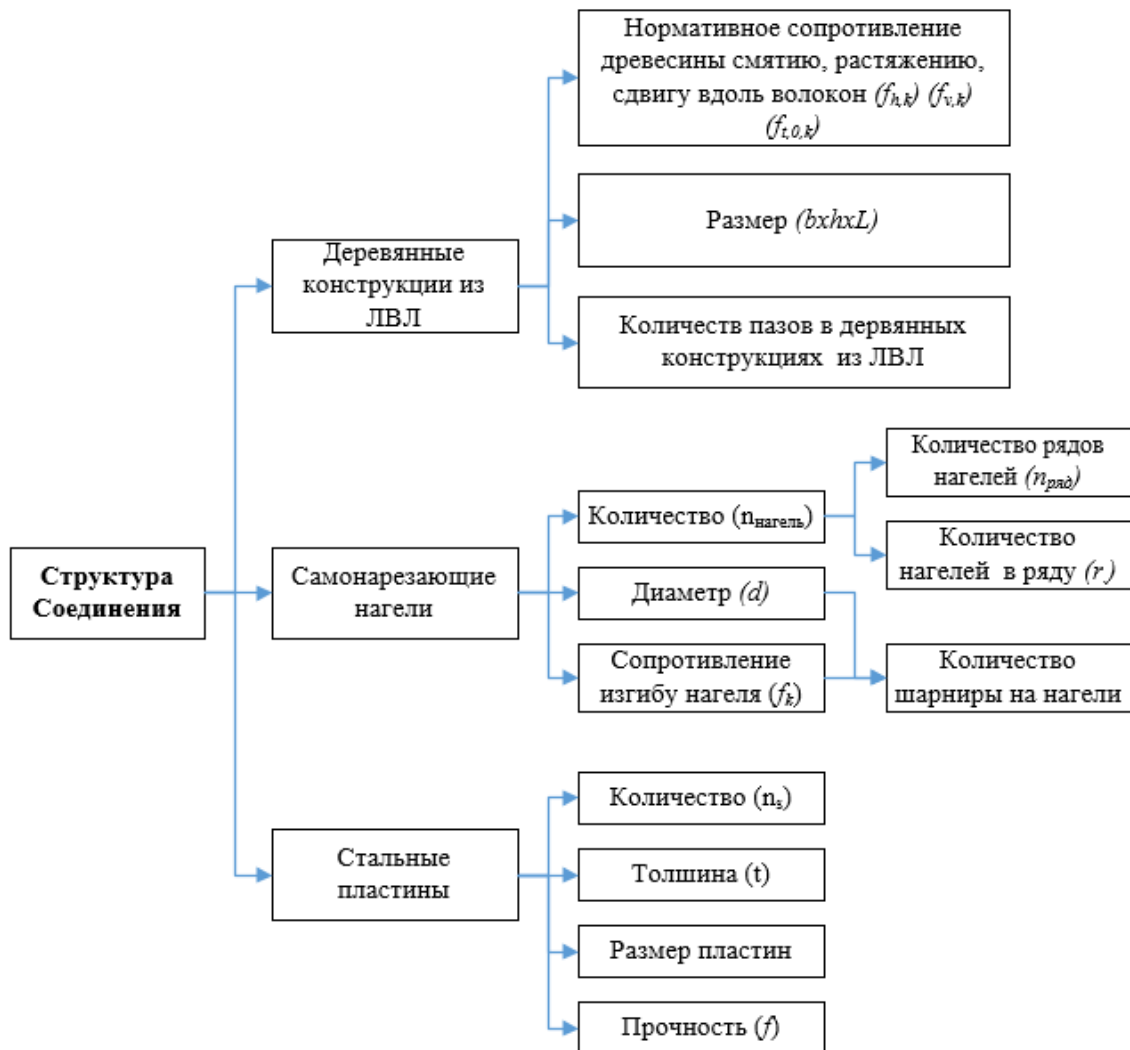


Рис. 1.18. Структура соединения с применением самонарезающих нагелей и параметры, влияющие на несущую способность соединения

Оптимальное соединение – такое, при котором рабочие элементы соединения достигают предельной несущей способности одновременно. Это первое правило построения оптимальных соединений на основе варьирования параметрами соединений.

### 1.5. Напряженно-деформированное состояние элементов соединений «сталь-дерево».

В исследование компонентов нагельного соединения включают: стальные пластины, самонарезающие нагели, клееные деревянные конструкции из ЛВЛ. Многие теории и вычислительные модели нагельных соединений, разработанные в прошлом, основаны на изгибе и срезе нагелей, хрупком и пластическом механизме разрушения соединения.

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние соединения «сталь-дерево» при растяжении или сжатии, разделяя его на разные рабочие части, включая внутреннюю и внешнюю части соединения. Затем, поперечное рабочее сечение и несущая способность деревянных элементов в различных частях рассчитываются по формулам. [66, 69, 71].

Внешняя часть: рассчитывается как нормальный элемент при растяжении

$$A_{раст} = b \cdot h; F_{раст} = A_{раст} \cdot f_{t,0,k} \quad (1.6)$$

Часть соединения: рассчитывается с учетом сокращения сечения

$$A_{раст} = b \cdot h - l_{нагель} \cdot n_{ряд} \cdot d - l_{пластин} \cdot t_{пластин} \cdot n_{пластин} \quad (1.7)$$

$$F_{раст} = A_{раст} \cdot f_{t,0,k} . \quad (1.8)$$

где  $A_{раст}$  - рабочая площадь поперечного сечения;

$F_{раст}$  - несущая способность деревянных конструкций на растяжение;

$f_{t,0,k}$  - нормативное сопротивление древесины растяжению вдоль волокон;

$b, h$  - ширина и высота элемента;  $l_{\text{нагель}}, d, n_{\text{ряд}}$  - длина, диаметр и количество нагелей в одном ряду;  $l_{\text{пластин}}, t_{\text{пластин}}, n_{\text{пластин}}$  - длина, толщина и количество пластины в соединении.

В соединениях нагель монтируется под углом по направлению к действующей нагрузке, чаще всего перпендикулярно. При нагрузке нагель прижимается к окружающим его деревянным элементам, оказывая на них давление [10] (см. рис. 2.1).

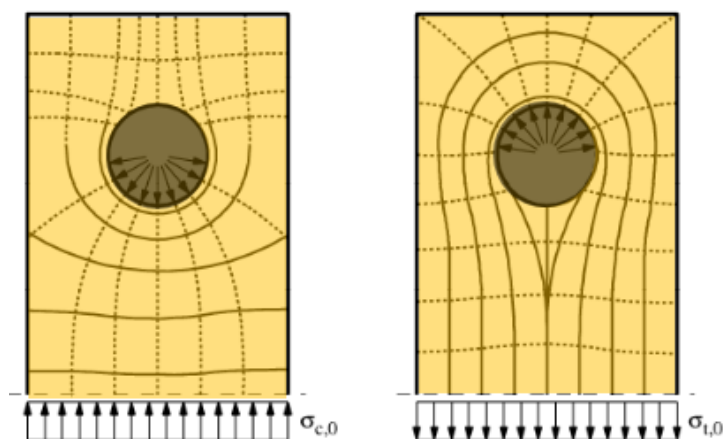


Рис. 1.19. Области растяжения (прямые линии) и сжатия (ломаные линии) в деревянных конструкциях под давлением, переданные от нагеля

Нагель в данном случае будет действовать как балка с распределенной нагрузкой от давления заделки (балка на упругом основании). Если нагель имеет сравнительно большой диаметр, он не будет изгибаться. При меньшем диаметре нагель будет деформироваться при изгибе, в конечном итоге создавая один или несколько пластичных шарниров. После деформации сдвиговое воздействие может быть дополнено растягивающим действием в нагеле [8, 102].

Напряжения смятия неравномерны по контуру нагельного гнезда (Рис 1.20). Равнодействующие радиальных напряжений  $R_l, R_n$  слева и справа от продольной оси дают продольные  $T_l, T_n$  и поперечные  $Q_l, Q_n$  составляющие,



которые, соответственно, вызывают скалывание по площадкам  $a-a$ ,  $a'-a'$  и раскалывание по площадке  $b-b$  [19].

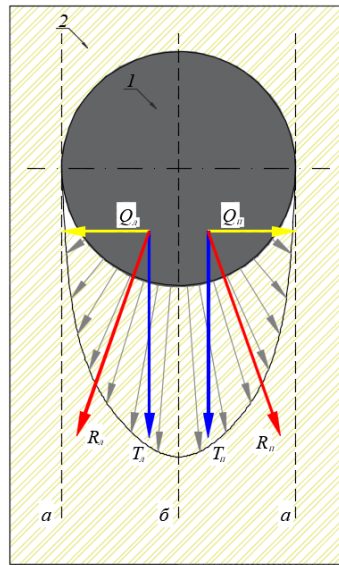


Рис. 1.20. Распределение напряжений в деревянных конструкциях по контуру нагельного гнезда; 1- цилиндрический нагель; 2- деревянные конструкции

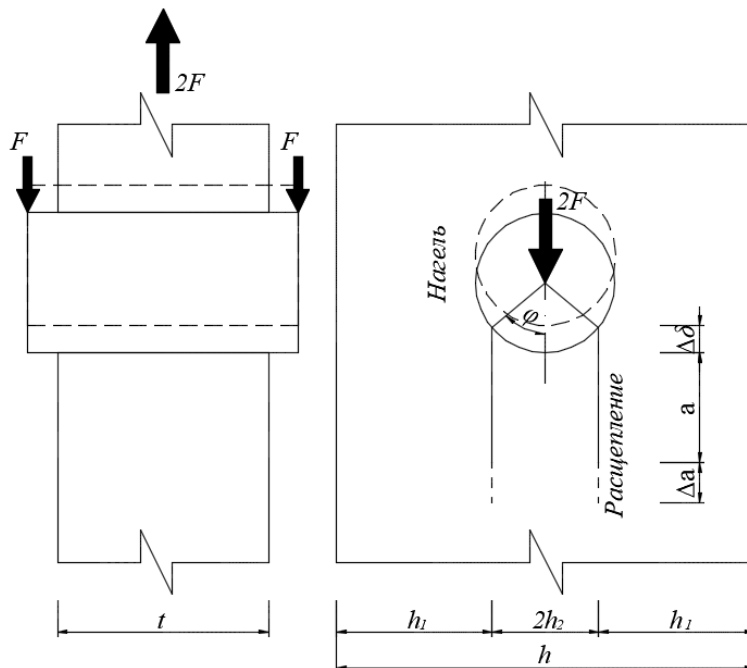


Рис. 1.21. Расположение предполагаемых трещин и напряжений с параллельными волокнами (Jorissen, 1998) [7]

На рисунке 1.21. показано расположение трещин. Длина трещин обозначается как  $a$ ,  $\Delta a$  – рост трещин, возникающий в результате смещения нагельного элемента на длину  $\Delta \delta$ .

Край нагельного отверстия можно разделить на три зоны, как показано на рис. (Reynolds, Sharma, Harries, & Ramage, 2016) [10]. В области контакта, трение между стальным нагелем и деревянной конструкцией не преодолевается, следовательно, стальной нагель и деревянная конструкция двигаются вместе. В области скольжения трение преодолевается, что вызывает скольжение нагеля относительно деревянной конструкции. Нагрузка не передается в область отсутствия контакта. (см. рис. 1.22)

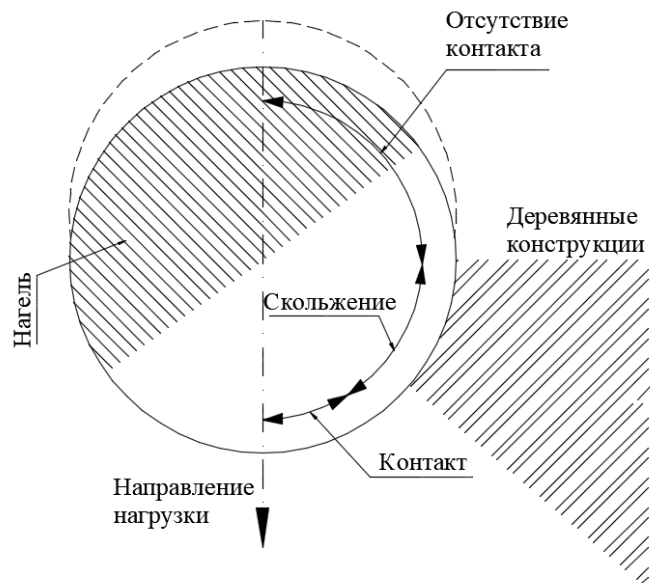


Рис. 1.22. Визуализация области «контакт», «скольжение» и «отсутствие контакта» (Reynolds, Sharma, Harries, & Ramage, 2016)

На рис. 2.3 угол трения обозначается как  $\varphi$ . Длины  $h_1$  и  $h_2$  зависят от этого угла трения и задаются уравнением (1.9) и равенством (1.10).

$$2h_2 = d \cdot \sin \varphi \quad (1.9)$$

$$h_1 = \frac{h - d \cdot \sin \varphi}{2} \quad (1.10)$$

Из анализа угла  $\alpha$  воздействия силы, передаваемой от цилиндрического нагеля на поверхность отверстия в деревянной конструкции, определены значения  $h_1$ ,  $h_2$ , учитываемые в методе баланса энергии.

Рассматриваемая модель прочности нагельного соединения описана Jorissen (1998) [101], получена по энергетическому балансу и основана на работе Gustafsson [104], который провел исследование прочности деревянных конструкций. Энергетический баланс для распространения трещины определяется ( $W_{e1}$ ) работой, выполняемой постоянной внешней нагрузкой, ( $W_{e2}$ ) энергией упругой деформации древесины и ( $W_{e3}$ ) энергией, выделяющейся при развитии трещины [101].

Работа, выполняемая внешней нагрузкой  $2F$ , определяется по формуле (1.11)

$$W_{e1} = 2F(\delta_2 - \delta_1) = 2F \cdot \Delta\delta \quad (1.11)$$

Энергия упругой деформации древесины ( $W_{e2}$ ) определяется по формуле (1.12)

$$W_{e2} = \frac{1}{2} 2F(\delta_2 - \delta_1) = F \cdot \Delta\delta \quad (1.12)$$

Энергия, выделяющаяся на поверхности трещины ( $W_{e3}$ ), задается по формуле (1.13)

$$W_{e3} = G_c t \Delta a \quad (1.13)$$

где  $G_c$  – энергия разрушения, зависящая от материала.

Высвобожденная энергия должна равняться потребляемой энергии для получения энергетического баланса. Это соотношение показано в формуле (1.14)

$$W_{e3} = W_{e1} - W_{e2} \quad (1.14)$$

$$G_c t \Delta a = F \Delta\delta \leftrightarrow G_c t da = F d\delta \quad (1.15)$$

$$G_c t da = F^2 d\left(\frac{\delta}{F}\right) \rightarrow F = \sqrt{\frac{2G_c t}{d\left(\frac{\delta}{F}\right) da}} \quad (1.16)$$

Стальной нагель оказывает постоянную нагрузку  $2F$  на деревянные конструкции, которая заставляет материал двигаться вниз и сжимать область между трещинами ( $A_{inside} = 2h_2t$ ), в то время как материал вне трещин движется вниз, потому что он растянут ( $A_{outside} = 2h_1t$ ). Смещение крепежного элемента на длину  $\Delta\delta$  приводит к росту трещины  $\Delta a$ , как показано на рис. 2.3. Из этого можно сформулировать соотношение для  $\Delta\delta$ , что показано в формуле (1.17)

$$\Delta\delta = \frac{2F\Delta a}{E_0 2h_2t} + \frac{2F\Delta a}{E_0 2h_1t} \quad (1.17)$$

$$\frac{d\left(\frac{\delta}{F}\right)}{da} = \frac{2h_1t + 2h_2t}{E_0 2h_1h_2t^2} \quad (1.18)$$

$$2F = 2t\sqrt{\frac{G_c E_0 d \sin(\varphi) [h - d \sin(\varphi)]}{h}} \quad (1.19)$$

Значение  $F$  определено по формуле (1.19) – это сила, действующая на цилиндрический нагель, вызывающая раскалывание древесины. Несущая способность соединения в этом механизме разрушения принимается равной значению  $F$ .

Пределом текучести называется пластический момент в стальной конструкции. Это момент, необходимый для создания пластического шарнира в нагеле, который определяется путем испытания нагелей в соответствии с SS-EN 408, см. рис. 2.24, или путем расчета пластического момента для нагеля.

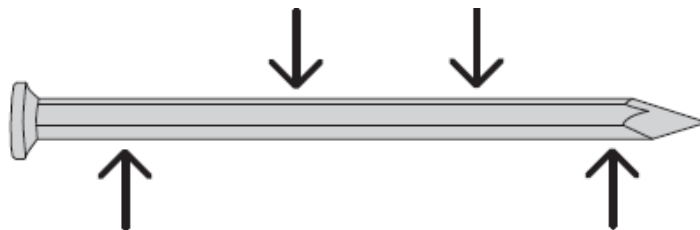


Рис. 1.23. Определение момента текучести для нагелей.

Исследование напряженно-деформированного состояния нагелей начинается с теоретического обоснования соотношения между изгибающим моментом  $M$  и углом изгиба  $\alpha$  для стального нагеля с круглым поперечным сечением [9].

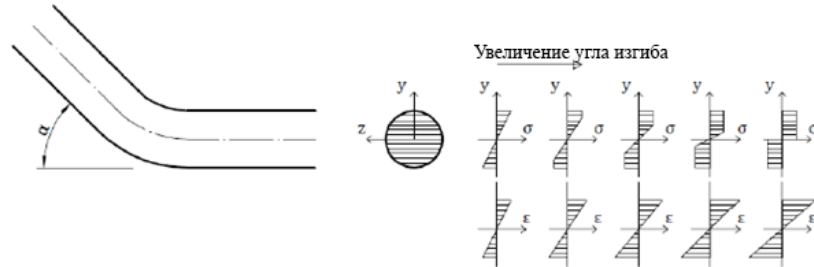


Рис. 1.24. Развитие напряжений и относительных деформаций нагеля в зависимости от увеличения угла изгиба

Прочность изгибающего момента линейно увеличивается до тех пор, пока не будет достигнут упругий момент ( $M_{el}$ ). После достижения упругого момента изгибающий момент асимптотически приближается к пластическому изгибающему моменту ( $M_{pl}$ ). Формулы, используемые для расчета упругого и пластического изгибающего момента, приведены в уравнениях (1.20) и (1.21) соответственно.

$$M_{el} = \frac{\pi}{32} f_y d^3 \quad (1.20)$$

$$M_{pl} = \frac{1}{6} f_y d^3 \quad (1.21)$$

Анализ относительной деформации в зависимости от угла изгиба

$$\frac{\rho}{ds} = \frac{\rho - y}{ds^*} \rightarrow ds^* = \frac{\rho - y}{\rho} ds$$

$$\varepsilon = \frac{l + \Delta l - l}{l} = \frac{ds^* - ds}{ds} = \frac{\frac{\rho - y}{\rho} ds - ds}{ds}$$

$$\Leftrightarrow ds^* = \frac{\rho - y}{\rho} - 1 = \frac{-y}{\rho}$$

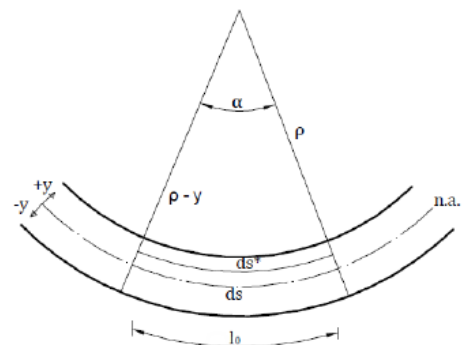


Рис. 1.25

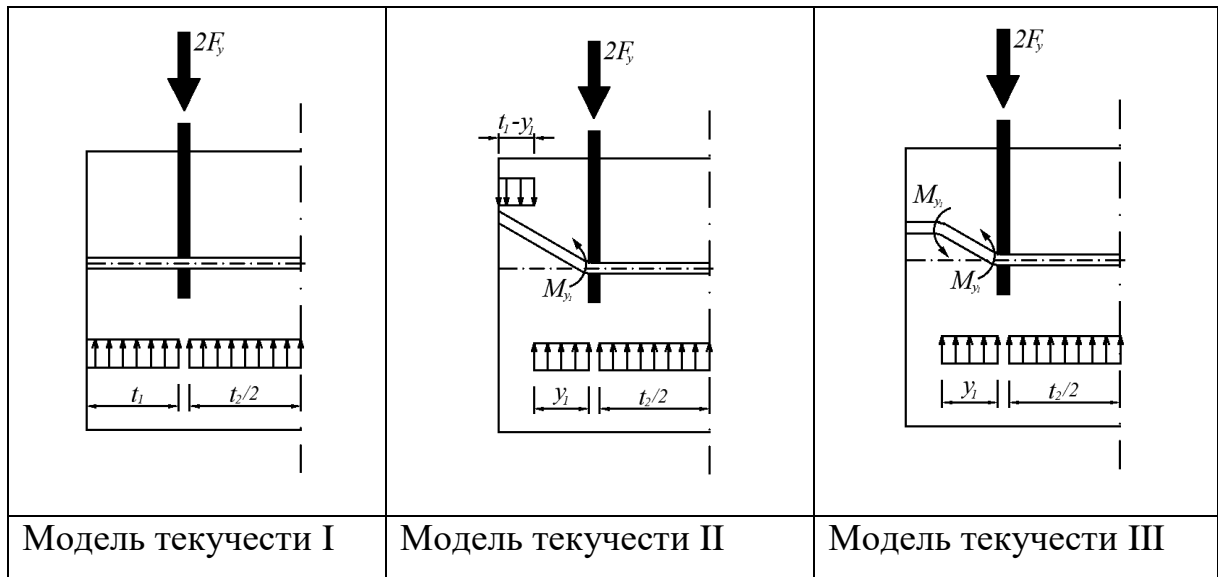
$$\frac{l_0}{\rho} = \alpha \rightarrow \varepsilon = -\frac{\alpha}{l_0} y$$

$$\sigma_e = E\varepsilon = -Ey \frac{\alpha}{l_0} \quad (1.22)$$

где  $\sigma_e$  - упругое напряжение,  $\sigma_p$  - предел текучести

Определение момента текучести нагельного соединения для нагелей. Характерное значение момента текучести  $M_{y,Rk}$  элемента нагельного типа зависит от диаметра нагельного элемента  $d$  (мм) и материала нагеля, представленного  $f_u$  предельной прочностью стали (Н/мм<sup>2</sup>). Ниже приведены эмпирические выражения для определения момента текучести для нагелей

$$M_{y,Rk} = \frac{f_u}{600} 180d^{2,6} [\text{Нмм}] \text{ для цилиндрического нагеля} \quad (1.23)$$



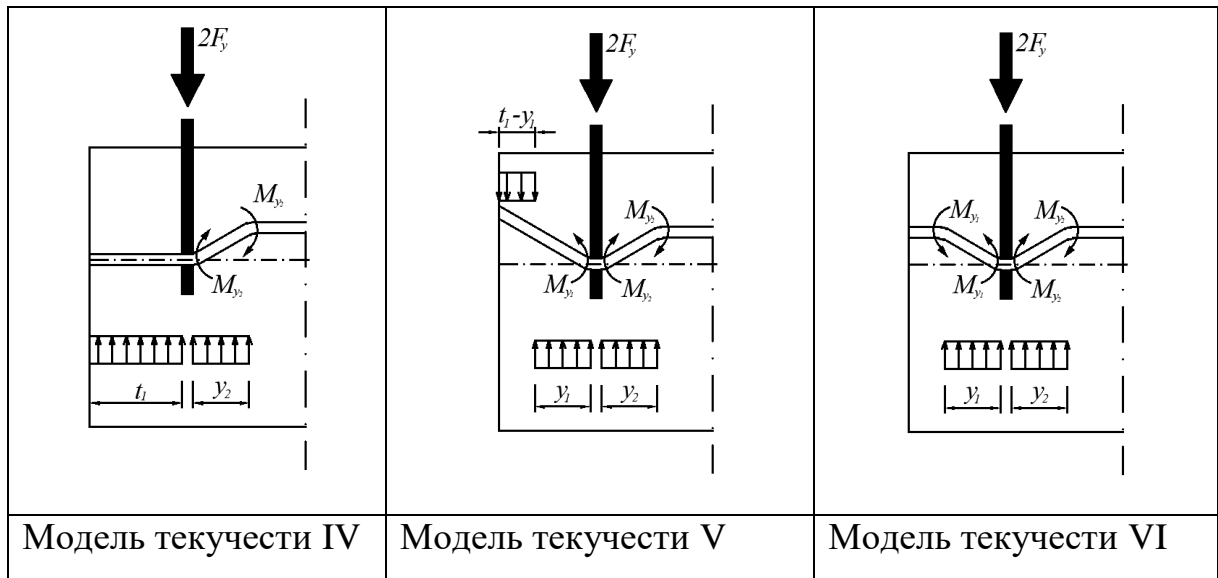


Рис. 1.26. Условия текучести деревянной конструкции и нагеля при соединении со стальными пластинами

Модель текучести I

$$2F_y = \left( t_1 + \frac{t_2}{2} \right) \cdot f_e \cdot d \quad (1.24)$$

Модель текучести II

$$2F_y = \left( 2y_1 - t_1 + \frac{t_2}{2} \right) \cdot f_e \cdot d ; \quad M_{y_1} = \left( y_1^2 - \frac{t_1^2}{2} \right) \cdot f_e \cdot d \quad (1.25)$$

Модель текучести III

$$2F_y = (t_1 + y_2) \cdot f_e \cdot d ; \quad M_{y_2} = \frac{y_2^2 \cdot f_e \cdot d}{4} \quad (1.26)$$

Модель текучести IV

$$2F_y = \left( y_1 + \frac{t_2}{2} \right) \cdot f_e \cdot d ; \quad M_{y_1} = \frac{y_1^2 \cdot f_e \cdot d}{4} \quad (1.27)$$

Модель текучести V

$$2F_y = (2y_1 - t_1 + y_2) \cdot f_e \cdot d ;$$

$$M_{y_1} = \left( y_1^2 - \frac{t_1^2}{2} \right) \cdot f_e \cdot d ; \quad M_{y_2} = \frac{y_2^2 \cdot f_e \cdot d}{4} \quad (1.28)$$

Модель текучести VI

$$2F_y = (y_1 + y_2) \cdot f_e \cdot d \quad ;$$

$$M_{y_1} = \frac{y_1^2 \cdot f_e \cdot d}{4} ; \quad M_{y_2} = \frac{y_2^2 \cdot f_e \cdot d}{4} \quad (1.29)$$

$F_y$  – предел текучести нагельного соединения;

$f_e$  – прочность заделки древесины;

$d$  – диаметр нагеля;

$M_{y_1}, M_{y_2}$  – момент текучести нагеля.

Механизмы изгиба нагеля и значения для каждого вида изгиба зависят от его физико-механических свойств, геометрических параметров нагеля и деревянных конструкций в соединении. Расчет несущей способности нагелей приведен в следующих европейских нормах [88, 89, 90]. Этого необходимо для разработки методов расчета соединений с применением самонарезающих нагелей.

*Напряженное состояние стальных пластин в соединениях элементов деревянных конструкций.* Стальные пластины необходимо проверять на растяжение по ослабленному сечению и на смятие под нагелем в соответствии с указаниями СП 16.13330.2017 [38, 39] (п.6.2.3).

Расчет на прочность элементов, подверженных центральному растяжению, следует выполнять по формуле:

$$\frac{N}{A_n} \leq R_y \cdot \gamma_c \quad (1.30)$$

где  $R_y$  – расчетное сопротивление стали растяжению, принимаемое по прил. 2 – 4 [2];

$N$  – продольная сила;

$A_n$  – площадь сечения нетто;

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы, принимаемый в соответствии с таблицей 6 [39]:



для растянутых элементов в сварных стержневых конструкциях покрытий и покрытий  $\gamma_c = 0,95$ ;

для затяжек и подвесок, выполненных из прокатной стали  $\gamma_c = 0,9$ ; выполненных на болтах в стержневых конструкциях покрытий и покрытий  $\gamma_c = 1,05$ .

Стальные пластины, соединяющие деревянные элементы, имеют преимущество в увеличении несущей способности соединения, поскольку изгибающий момент в соединителях обычно уменьшается при той же внешней нагрузке, поскольку стальная пластина дает меньший эксцентриситет по сравнению с деревянным элементом с той же прочностью.

Стальные пластины в соединении действуют как растягивающая структура, напряжения сосредоточены в отверстиях стальной пластины. В данном исследовании (соединение при растяжении) нестабильность стальных пластин не учитывается.

Деформация стальной пластины в направлении нагрузки влияет на общую деформацию соединения. В соединении с использованием несколькими стальными пластинами, нагрузки распределены во многих сечениях. Поэтому деформация отверстий в стальной пластине мала. Для экономической эффективности и обеспечения несущей способности соединения автор предлагает выбирать подходящую толщину стальной пластины в соответствии значениям ( $t_{\text{пластина}} = 3-5$  мм).

Кроме того, допустимое отклонение между просверленным отверстием в стальной пластине и диаметром нагеля влияет на напряженно-деформированное состояние пластин. Если допуск равен нулю, то усилие от нагеля будет передаваться по максимальной поверхности контакта нагеля с отверстием в стальной пластине, тем самым уменьшая деформацию и сжимающее напряжение растяжения вокруг отверстия. Чем меньше допустимое отклонение, тем больше сопротивление растяжению и сжатию по окружности отверстия.

*Анализ соотношения нагрузки и перемещения в соединении.* Соединения деревянных конструкций в зданиях и сооружениях выполняются, как правило, с помощью креплений болтами, шурупами или нагелями диаметром от 5 до 24 мм, в редких случаях до 30 мм. Использование таких соединений требует предварительного просверливания отверстий диаметром чуть большим, чем диаметр нагеля [78, 79]. Этот допуск, как правило, влечет за собой неравномерное распределение нагрузки на элементы соединения. Кривая зависимости скольжения и нагрузки соединительного элемента приобретает вид, представленный на рис. 2.5а.

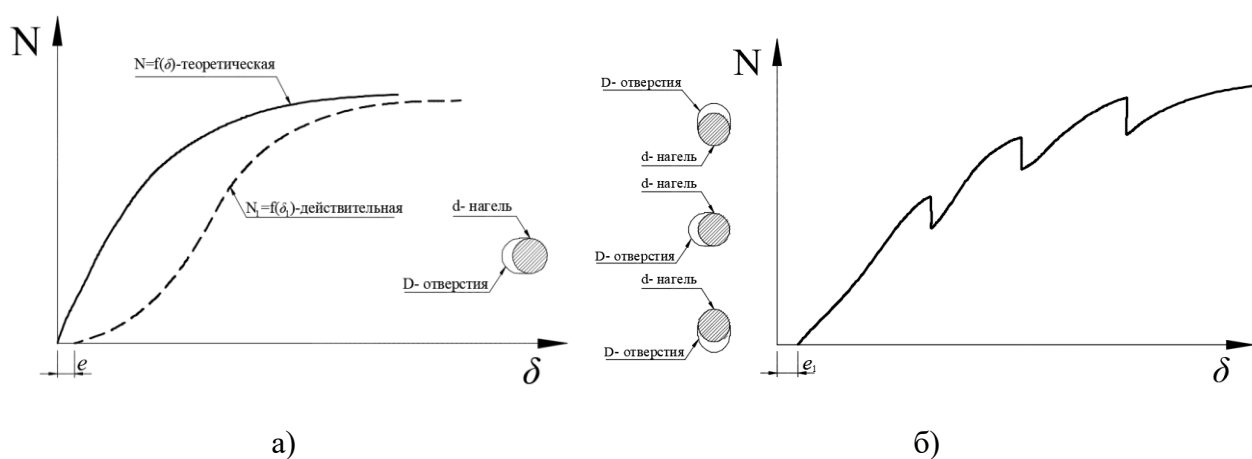


Рис. 1.27. Действительная и теоретическая зависимость «нагрузка-перемещение»: а) для одного нагеля в узле; б) для нескольких нагелей в узле.

Для всего соединения, состоящего из 3 или 4 соединительных элементов зависимость  $N = f(\delta)$  представлена на рис. 2.5б.

Элемент соединения, который имеет наименьший первоначальный допуск, должен переносить наибольшую нагрузку, что в результате ведет к его постоянным деформациям вследствие прижима к древесине или срыва узла. В результате сильное скольжение узла крепления ведет к постоянным перемещениям и образованию трещин в соединении.

Появляющееся в результате действия реологических процессов, изменения влажности, люфты и прогрессирующее по мере эксплуатации здания расстояние

между трещинами  $\Delta$ , влечет за собой разгерметизацию здания, следовательно, ухудшение его тепловлажностных условий [13, 16].

## 1.6. Выводы

На основании проведенного анализа следует, что развитие деревянных конструкций сопровождается появлением новых современных конкурентоспособных материалов, при этом разработка и внедрение деревянных пространственных конструкций из клееной древесины приобретают более широкое значение в строительстве жилых и гражданских зданий.

Применение конструкций из ЛВЛ популярно в Европе и России, помимо использования в качестве балочной конструкции, возрастают объемы строительства также в качестве несущих стержней в рамах и фермах.

Использование самонарезающих нагелей и стальных пластин становится востребованным, чаще всего используется в каркасных и рамных конструкциях. Преимущества этого типа соединения являются важной основой для инженеров при выборе соединителей, для использования в деревянном домостроении.

Сравнение соединений с применением самонарезающих нагелей и различными соединениями с использованием цилиндрическими нагелей показало преимущества этого типа связи по несущей способности, эстетике и экономике.

Обзор российских и зарубежных исследовательских работ по теме нагельных соединений деревянных конструкции со стальными пластинами свидетельствует о необходимости уточнения и расширения области проведенных исследований, а также определения свойств клееных деревянных материалов, методов расчета, режимов разрушения при нагрузке и конкурентных преимуществ соединений.

В результате анализа физико-механических свойств основных строительных материалов для дальнейших научных исследований принимаются деревянные конструкции из ЛВЛ бруса и самонарезающие нагели WS.

**Цель работы.** Развитие методов расчета соединений деревянных конструкций из ЛВЛ с применением стальных пластин и самонарезающих нагелей, с учетом наступления одновременного пластического разрушения компонентов системы при растяжении.

Для достижения заданной цели исследования необходимо решить следующие **задачи**:

1. Анализ состояния вопроса по теории и практике применения самонарезающих нагельных соединителей для деревянных конструкций из ЛВЛ.

2. Провести анализ и предложить математические модели напряженно-деформированного состояния (НДС) деревянных конструкций из ЛВЛ, с применением самонарезающих нагельных элементов соединения.

3. Исследовать влияние величины допустимого отклонения в отверстиях ЛВЛ и металлической пластине на работу нагельного соединения.

4. Разработать оригинальную экспериментальную оснастку и провести лабораторные исследования напряженно-деформированного состояния соединений «сталь-дерево».

5. Выполнить численное моделирование, с использованием программы Ansys 18.2, и сравнить с результатами экспериментальных исследований.

6. Обобщить результаты теоретических и экспериментальных исследований, определить алгоритм расчета соединений «сталь-ЛВЛ».

7. Предложить рекомендации по проектированию деревянных конструкций из ЛВЛ с применением самонарезающих нагельных соединителей.

## **ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО - ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ (НДС) СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ (ЛВЛ).**

Основные параметры, которые влияют на несущую способность соединений с применением самонарезающих нагелей: несущая способность нагелей на изгиб; прочность деревянных конструкций; несущая способность нагелей на срез. Чтобы соединения работали надёжно, при заданной проектной прочности и в пределах допустимых смещений, в общей конструкции необходимо достигать наилучшего значения несущей способности соединений, при этом важно оптимизировать количество, размеры и расположение стальных пластин.

Внедрение в практику расчёта несущей способности соединения с использованием самонарезающих нагелей при растяжении, сжатии по направлению вдоль волокон деревянных конструкций, обусловленные сопротивлением нагелей на изгиб и срез, требуется уточнение аналитических зависимостей в соответствии с различными моделями отказа. Необходимо разработать методику расчета несущей способности соединения в рабочем состоянии в области предела упругости (расчет по несущей способности (прочность, устойчивость), и в пластичном предельном рабочем состоянии (расчет по деформации (прогибам, перемещениям)).

### **2.1. Несущая способность нагельных соединений «сталь-дерево»**

Несущая способность нагельных элементов может быть описана так называемой европейской моделью текучести (EYM). Эта модель основана на анализе предельного состояния пластичности. Johansen (1949) [102], который первым опубликовал эту модель, предположил идеальное жесткопластическое

поведение нагеля. Также предполагается, что не происходит преждевременного хрупкого разрушения деревянных конструкций, такого как раскалывание, сдвиг ряда или разрушение при растяжении в уменьшенном поперечном сечении, прежде чем нагельные детали достигнут своего предельного сопротивления (несущая способность нагеля). Компоненты соединения существенно влияют на несущую способность нагеля. В соединении с двумя стальными пластинами нагель ведет себя как простая балка со стальными пластинами в качестве опор.

Другим важным фактором ЕУМ является коэффициент гибкости нагеля  $\lambda$ . Jorissen A. (1998) [101] пришел к выводу, что коэффициент гибкости является одним из наиболее важных параметров для нагельных соединений, нагруженных параллельно волокнам. Толстые нагели с гибкостью  $\lambda_{ef} < \lambda_{пред}$  при нагружении соединения остаются прямыми. Тонкие нагели с  $\lambda_{ef} > \lambda_{пред}$  изгибаются в соединении. В зависимости от вида соединения образуются два или более пластических шарниров (см. рис. 2.1). Нагели системы WS с высокой гибкостью  $\lambda_{ef}$  считаются тонкими.

Ниже приводится анализ механизма работы одного нагеля на плоскость среза, для определения условий пластичности деревянной конструкции и нагеля, при соединении со стальными пластинами в зависимости от коэффициента гибкости.  $\lambda_{ef} = t / d$

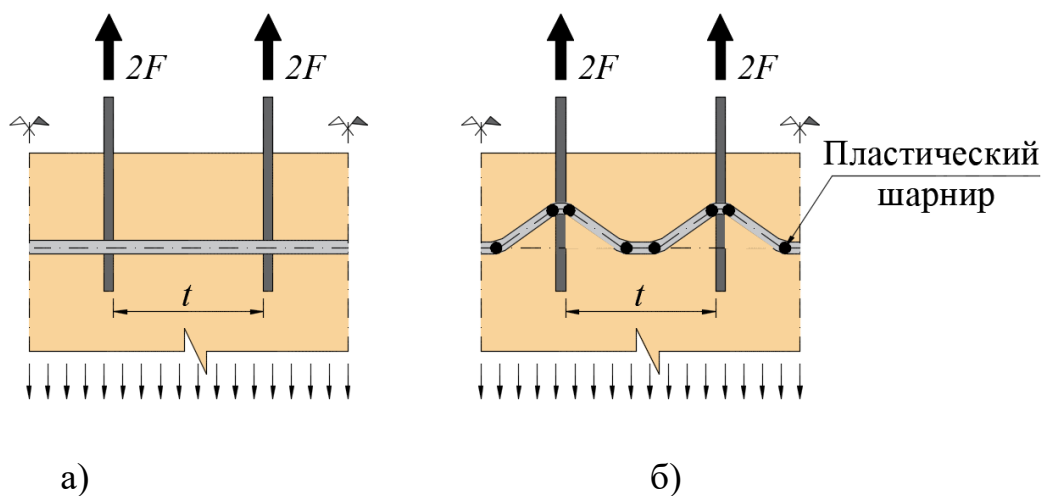


Рис. 2.1. Влияние на изгиб условий опоры и коэффициента гибкости нагеля;

Коэффициент предела гибкости нагеля для соединений с несколькими стальными пластинами определяется по формуле

$$\lambda_y = 4 \cdot \sqrt{\frac{M_u}{f_h \cdot d^3}} \quad (2.1)$$

$\lambda_{ef} < \lambda_y \rightarrow F = 0,5 f_h \cdot t \cdot d$  Небольшая деформация нагеля, вызывает смещение деревянной конструкции за счет смятия (рис. 2.1 а)

$\lambda_{ef} > \lambda_y \rightarrow F = 2 \sqrt{M_u \cdot f_h \cdot t}$  При большей деформации нагель работает на изгиб, пластические шарниры соединения появляются по длине нагеля (рис. 2.1 б)

где:  $M_u$  – предел текучести нагеля;

$F$ - несущая способность для одного нагеля в одной плоскости сдвига.

Соединения с тонкими нагелями позволяют достичь высокой несущей способности. Пластичное поведение элементов соединения обычно возможно только в том случае, если хрупкое разрушение деревянных конструкций, наступает после значительной пластической деформации стальных нагелей (пластическое разрушение нагелей) [98, 99, 100].

Допуски изготовления существенно влияют на несущую способность соединений. В случае тонких нагелей и большого расстояния между нагелями, эффект неравномерного распределения нагрузки между нагелями может быть уравновешен. Для этого необходима определенная деформация пластичности нагеля, чтобы уравновесить усилия между нагелями и деталями. Соединения, изготовленные с высокой точностью, имеют более равномерное распределение нагрузки между нагелями деталями.

Соединения с меньшим расстоянием между нагелями возможны, когда отверстия в деревянных конструкциях и в стальных пластинах просверлены с высокой точностью [93, 94].

## 2.2. Анализ механизмов разрушения соединения «сталь-дерево»

При действии поперечного усилия на соединение «сталь-дерево» возможны различные варианты отказа за счет пластической деформации элементов соединения.

Такие варианты для одно и двухсрезных соединений показаны на рисунке 2.2. Варианты а-е характерны для односрезных соединений, f-m - для двухсрезных

При схемах а, с, f, j/l отказ обусловлен исключительно разрушением/деформацией деревянного элемента (отказ заделки). Такие типы отказа называют отказом Первого типа. Если имеют место отказ заделки и отказ, вызванный пластической деформацией крепежной детали в одном структурном элементе односрезного соединения или в среднем элементе двухсрезного соединения, то такие отказы классифицируются как отказ Второго типа. Если имеет место отказ заделки и пластическая деформация нагелей во всех элементах соединения, то такой отказ называют отказом Третьего типа. Если отношение длины нагеля к его диаметру велико (так называемые «тонкие» крепежные элементы), то минимальная несущая способность соединения будет соответствовать отказу Третьего типа.

В соответствии с изложенным выше – варианты а, с, f, j/l относятся к отказам Первого типа; b, d, g, k – к отказам Второго типа; e, h, m – к отказам Третьего типа [89].

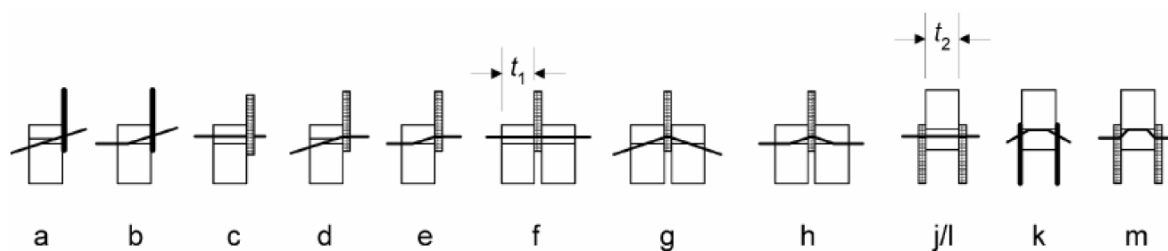


Рис. 2.2. Виды отказа соединений древесины со стальными пластинами



На базе экспериментальных исследований разработана теория расчета на основе разрушающего механизма соединения [89, 91, 92, 96, 97, 110, 111, 115]. На рисунке 2.3 представлена блок-схема механизмов разрушения.

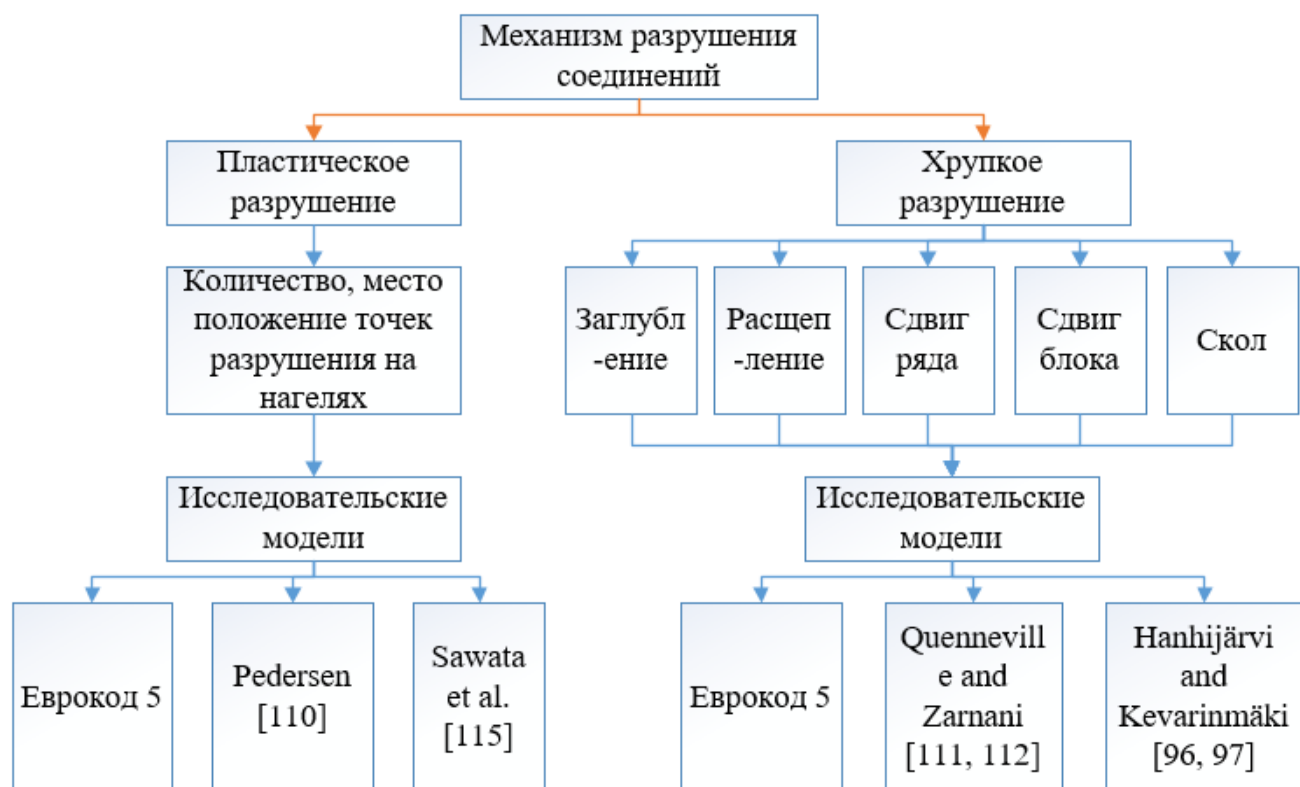
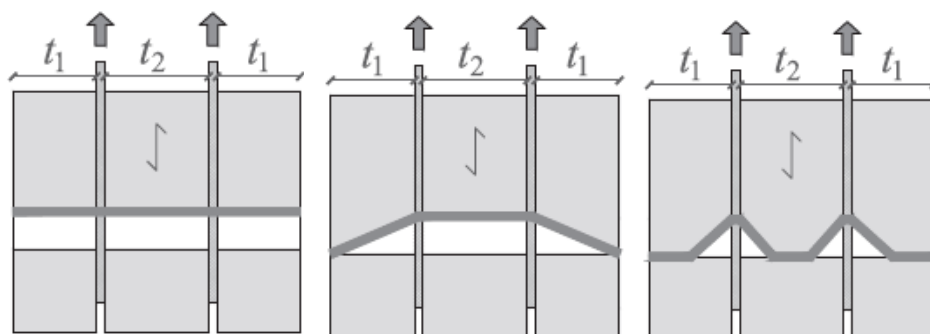


Рис. 2.3. Алгоритм механизма разрушения соединения «сталь-дерево»

### 2.2.1. Режим пластичного разрушения

Как было указано выше, в существующих стандартах не предусмотрен метод расчета режима пластического разрушения при многократных соединениях плоскостей среза. Ниже (Рис.2.4.) представлены модели, предложенные Педерсеном [110], с четырьмя связями плоскостей среза, и Савадом и др. [115] для соединений любого числа плоскостей среза.



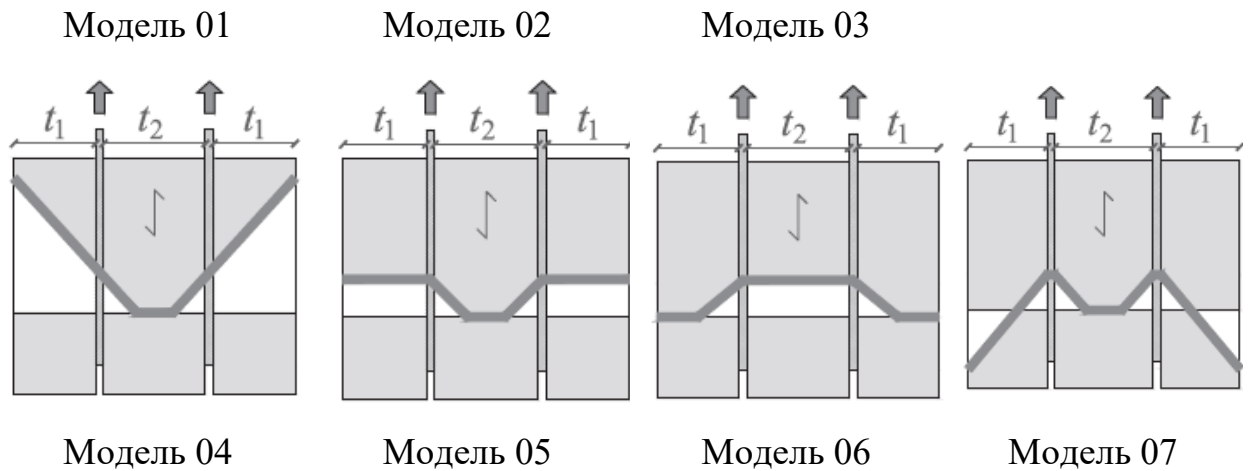


Рис. 2.4. Модели пластичного разрушения

В соответствии с пунктом 8.1.3 (2) стандарта EN 1995-1-1 (Еврокода 5) [89] несущая способность многосрезного соединения в каждой плоскости среза определяется исходя из предположения, что каждая плоскость среза является частью нескольких соединений из трех элементов. Таким образом, четырехсрезное соединение вычисляется как сумма двухсрезных и односрезных соединений

В случае многих плоскостей среза между деревом и стальными пластинами различают внутреннюю (плоскость А, рис. 2.5) и внешнюю (плоскость В, рис. 2.5). На плоскости сдвига соединитель ведет себя как балка, закрепленная на обоих концах, тогда как на внешней плоскости сдвига он ведет себя как консоль, конец которой закреплен в стальной пластине. [7]

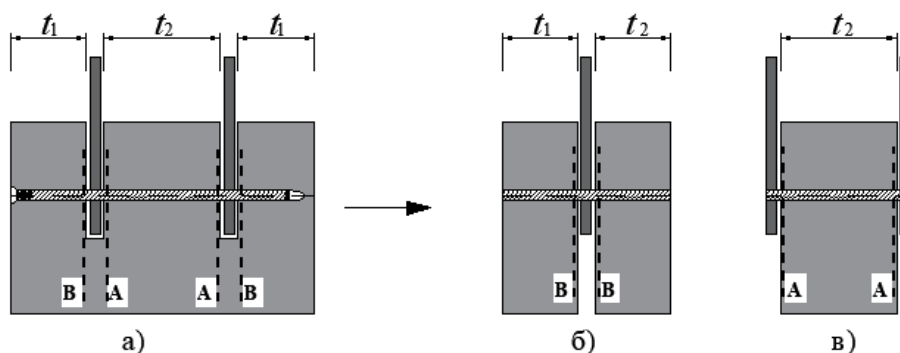


Рис. 2.5. Плоскости среза в нескольких срезных соединениях

$$F_{v,Rk} = 2F_{v,Rk(\delta)} + 2F_{v,Rk(\epsilon)} \quad (2.2)$$

$$F_{v,Rk}(\delta) = \min \begin{cases} f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d & \text{(f)} \\ f_{h,1,k} \cdot t_1 \cdot d \left[ \sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h,1,k} \cdot d \cdot t_1^2}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(g) (2.3)} \\ 2,3 \sqrt{M_{y,Rk} f_{h,2,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(h)} \end{cases}$$

$$F_{v,Rk}(\epsilon) = \min \begin{cases} 0,5 f_{h,2,k} \cdot t_2 \cdot d & \text{(j/l) (2.4)} \\ 1,15 \sqrt{2M_{y,Rk} f_{h,2,k} d} + \frac{F_{ax,Rk}}{4} & \text{(m)} \end{cases}$$

Педерсен [110] предложил метод, основанный на ЕУМ (европейская модель текучести), модификацию уравнения для случая соединений с четырьмя плоскостями среза. Несущая способность соединения, учитывая пластическое разрушение, может быть определена как:

$$F_D = F_y n_s n_c n_r \quad (2.5)$$

где  $F_D$  - несущая способность соединения при пластическом разрушении,  $n_s$  - число плоскостей среза,  $F_y$  - несущая способность каждой плоскости среза в одном нагеле или элементе, определяемая как:

$$F_y = \min \begin{cases} \frac{1}{4}(2t_1 + t_2) \cdot d \cdot f_{h,0} & \text{(Модель 01)} \\ \left( -\frac{1}{2}t_1 + \frac{t_2}{4} + \sqrt{\frac{1}{2}t_1^2 + \frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} \right) \cdot d \cdot f_{h,0} & \text{(Модель 02)} \\ \sqrt{4M_y \cdot d \cdot f_{h,0}} & \\ \left( \frac{1}{2}t_1 + \frac{1}{2}\sqrt{t_1^2 + \frac{2M_y}{d \cdot f_{h,0}}} \right) \cdot d \cdot f_{h,0} & \text{(Модель 03)} \\ \left( \sqrt{\frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} + \frac{1}{2}t_1 \right) \cdot d \cdot f_{h,0} & \text{(Модель 04)} \\ \left( \sqrt{\frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} + \frac{1}{4}t_2 \right) \cdot d \cdot f_{h,0} & \text{(Модель 05)} \\ \left( \sqrt{\frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} + \frac{1}{4}t_2 \right) \cdot d \cdot f_{h,0} & \text{(Модель 06)} \\ \left( -\frac{1}{2}t_1 + \frac{1}{2}\sqrt{t_1^2 + \frac{2M_y}{d \cdot f_{h,0}}} + \sqrt{\frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} \right) \cdot d \cdot f_{h,0} & \text{(Модель 07)} \end{cases} \quad (2.6)$$

где  $f_{h,0}$  (нормативное сопротивление смятию древесины) и  $M_y$  (нормативный момент пластической деформации нагеля) – эти значения, определены в Еврокоде 5 [89].

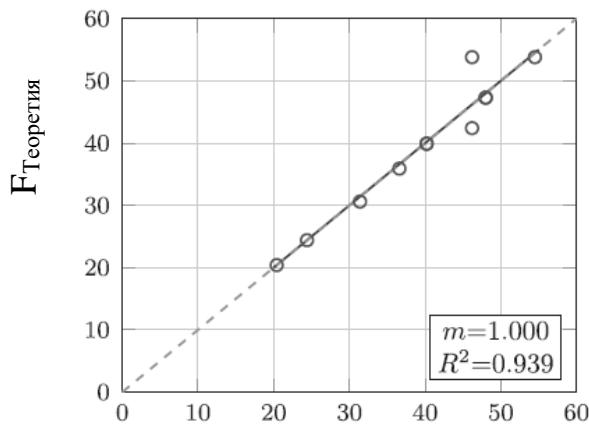
*Sawata et al.* [115] разработали аналогичный метод, основанный на ЕУМ. Вместо того чтобы получить значение для каждой плоскости среза, они предложили набор уравнений, который обеспечивает эффективную толщину  $t_{ef}$  нагельного элемента вдоль всего соединения, которая определяется как:

$$t_{ef} = \min \begin{cases} 2t_1 + (n_s - 1)t_2 & \text{(Модель 01)} \\ 2t_1 \left( \sqrt{2 + \frac{2}{3} \cdot \frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}} \left( \frac{d}{t_1} \right)^2} - 1 \right) + (n_s - 1)t_2 & \text{(Модель 02)} \\ n_s \cdot d \cdot \sqrt{\frac{8}{3} \cdot \frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} & \text{(Модель 03)} \\ 2t_1 + (n_s - 1) \sqrt{\frac{8}{3} \cdot \frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} & \text{(Модель 05)} \\ d \sqrt{\frac{8}{3} \cdot \frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} + (n_s - 1)t_2 & \text{(Модель 06)} \\ 2t_1 \left( \sqrt{2 + \frac{2}{3} \cdot \frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}} \left( \frac{d}{t_1} \right)^2} - 1 \right) + (n_s - 1) d \sqrt{\frac{8}{3} \cdot \frac{M_y}{d \cdot f_{h,0}}} & \text{(Модель 07)} \end{cases} \quad (2.7)$$

Общая пластическая способность соединения  $F_D$  определяется как:

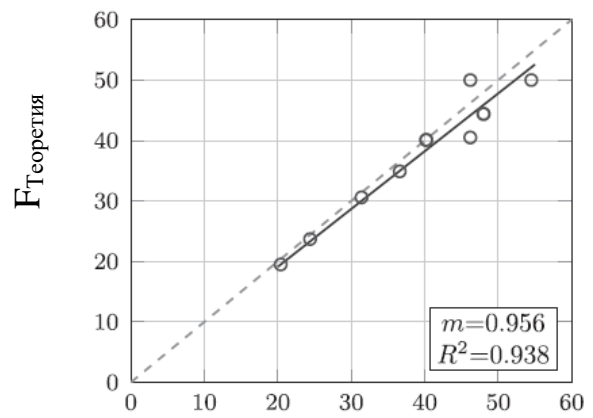
$$F_D = t_{ef} f_{h,0} d n_c n_r \quad (2.8)$$

Чтобы проверить точность двух описанных моделей, их предсказания были сопоставлены с тестами, проведенными в России и др. [80, 82]. Оба метода показали очень хорошее соответствие с результатами теста. Поскольку метод Педерсена [110] более точен, он был использован в данной работе для определения пластической способности соединений при выполненных испытаниях (см. рис. 2.6).



$F_{\text{Эксперимент}}$  (кН)

Педерсен [110]



$F_{\text{Эксперимент}}$  (кН)

Сагата и др.[115]

Рис. 2.6. Сравнение результатов испытаний, выполненных в [89], и двух методов, предложенных по [110, 115].

На рис. 2.7 показан типичный пример соединения со стальными пластинами и четырьмя плоскостями сдвига. Основные параметры деревянных конструкций определяются: ширина и толщина  $b \times h$  (мм<sup>2</sup>) [21]. Две стальные пластины (толщиной  $t_p$ , толщина древесины  $h$ ) разделены на три части: два наружных элемента толщиной  $t_1$  и один в центре – толщиной  $t_2$ .

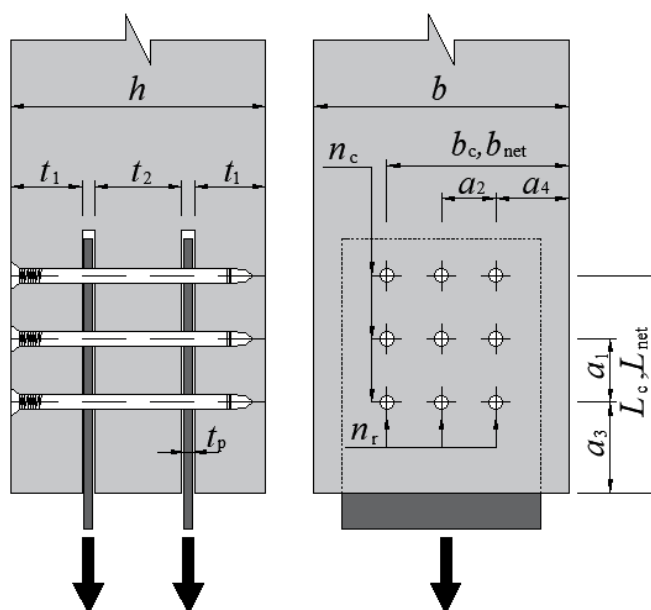


Рис. 2.7. Соединение «сталь-дерево» с применением самонарезающих нагелей

### 2.2.2. Режим хрупкого разрушения

Хрупкость соединений является недостатком, нередко вызывающим разрушение конструкции, причиной которого являются непредусмотренные в расчетах перенапряжения одних частей составного элемента за счет разгрузки других. В настоящее время не существует метода, обеспечивающего расчетную методику хрупкого разрушения соединений с несколькими плоскостями сдвига. Ханхярви и Кеваринмяки (2007, 2008) [96, 97] предположили, что каждое соединение может быть разложено как сумма мощностей простых соединений (дерево – сталь - дерево для внешних элементов и сталь - дерево - сталь для внутренних элементов соединения). Это предложение основано на том, что все элементы деревянной конструкции достигают своей предельной несущей

способности одновременно. Данное предположение вызывает сомнение, поскольку толщина элементов, а также соответствующая эффективная толщина из-за деформации нагеля могут быть различными, и деревянные элементы ряда могут не достигать своей отказоустойчивости одновременно.

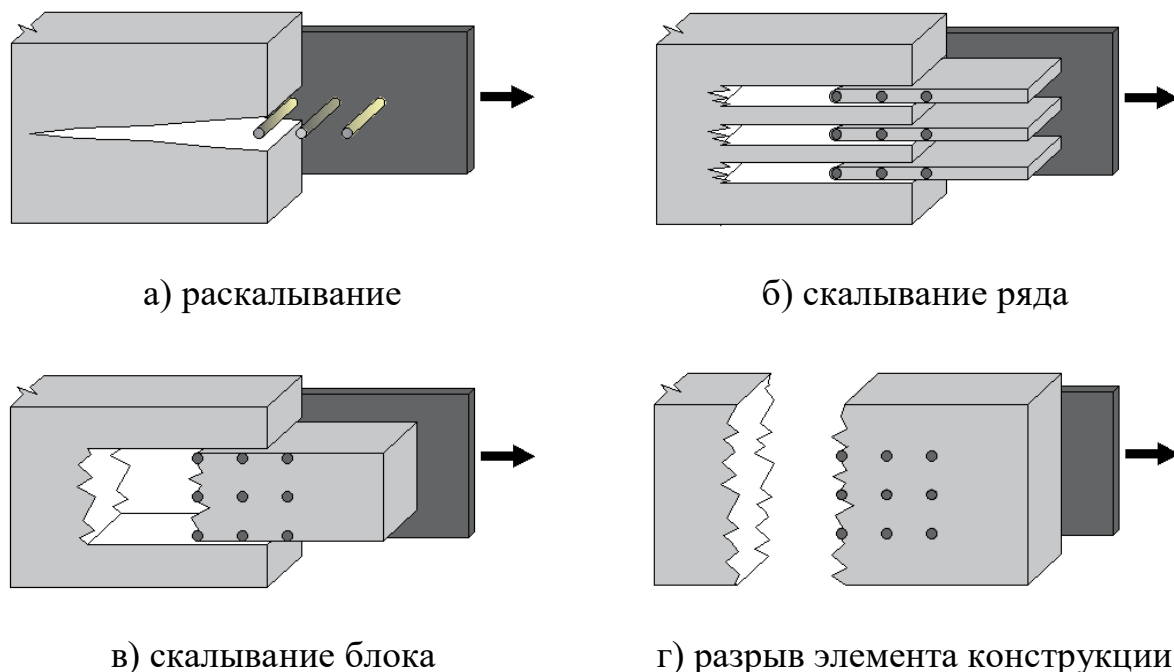


Рис. 2.8. Модели хрупкого разрушения

Скалывание ряда и раскалывание оба режима разрушения по Еврокоду 5 учитываются понижающим коэффициентом  $n_{ef}$ . Этот параметр, основан на исследованиях Йориссена [101], определяется для нагелей как:

$$n_{ef} = \min \left\{ \begin{array}{l} n_c \\ n_c^{0,9} \sqrt[4]{\frac{a_1}{13d}} \end{array} \right. \quad (2.9)$$

В результате, когда вместо приведенного параметра  $n_{ef}$  используется фактическое количество нагелей  $n_c$  в формуле. (2.9), несущая способность этих соединений для хрупких режимов отказа определяются согласно (2.10).

$$F_D = F_y n_s n_c n_r \quad (2.10)$$

Изменения в формуле

$$F_D = F_y n_s n_{ef} n_r \quad (2.11)$$

Нагрузка, вызывающая скалывание блока определяется в Приложении А (6.1.2 Еврокод 05) как максимальное значение между растягивающей способностью передней стороны и суммой сдвиговых способностей боковой и нижней плоскостей:

$$F_{B,block} = \max \begin{cases} 1,5 A_{net,t} f_{t,0,k} \\ 0,7 A_{net,v} f_{v,k} \end{cases} \quad (2.12)$$

где  $f_{t,0,k}$  и  $f_{v,k}$  – характерная прочность на растяжение, параллельная волокнам, и характерная прочность на сдвиг соответственно;

$A_{net,t}$  ;  $A_{net,v}$  – площадь нетто поверхности среза в плоскости, перпендикулярной волокнам и параллельной волокнам.

$$A_{net,t} = L_{net,t} t_1 \quad (2.13)$$

$$A_{net,v} = \begin{cases} L_{net,v} t_1 \\ \frac{L_{net,v}}{2} (L_{net,t} + 2t_{ef}) \end{cases} \quad (2.14)$$

$$L_{net,v} = \sum_i l_{v,i} ; L_{net,t} = \sum_i l_{t,i} \quad (2.15)$$

Для тонких стальных пластин

$$t_{ef} = \begin{cases} 0,4 t_1 \\ 1,4 \sqrt{\frac{M_{y,R_k}}{f_{h,k} d}} \end{cases} \quad (2.16)$$

Для толстых стальных пластин



$$t_{ef} = \begin{cases} 2\sqrt{\frac{M_{y,R_k}}{f_{h,k}d}} \\ t_1 \left[ \sqrt{2 + \frac{M_{y,R_k}}{f_{h,k}dt_1^2}} - 1 \right] \end{cases} \quad (2.17)$$

Несмотря на то что нет метода определения разрушения от растягивающего усилия, в разделе 6.1.2 Еврокода 5 установлено, что расчетное напряжение от растягивающих усилий вдоль волокон  $\sigma_{t,0,d}$  должно быть меньше или равно расчетному сопротивлению растяжения  $f_{t,0,d}$ . Это условие должно также выполняться и в соединениях деревянных конструкций:

$$\sigma_{t,0,d} = f_{t,0,d} \cdot \quad (2.18)$$

*Модель, предложенная Quenneville и Zarnani.* [111, 112] Рассмотрим каждый из возможных хрупких режимов разрушения отдельно. Расщепление не рассматривается, так как не ожидается режим разрушения в соединении элементов с двумя или более рядами нагелей. Несущая способность при хрупком разрушении деревянного элемента будет равна минимальной нагрузке и рассчитывается по следующим режимам отказа:

*Скалывание ряда.* Для соединения с несколькими рядами одинаковых  $n_r$  нагелей Quenneville и Zarnani определяют усилие сдвига  $F_B$ , соответствующее разрушению ряда деревянного элемента, по формулам:

$$F_{B,row} = R_v n_r; \quad (2.19)$$

$$R_v = 0,75 f_{v,k} K_{LS} n_c 2a_{cr} t, \quad (2.20)$$

где  $K_{LS}$  — коэффициент нагружения поверхности (равный 1 для средних элементов и 0,65 для боковых элементов), который учитывает эффективную толщину  $t_{ef}$ ;  $a_{cr}$  — минимальное из двух: расстояние между рядами нагелей  $a_1$  и расстояние до нагруженной кромки  $a_3$ .

*Скалывание блока.* Quenneville и Zarnani определяют разрушающую нагрузку скалывания  $F_{B,block}$  как сумму несущей способности двух плоскостей скалывания и плоскости растяжения:

$$F_{B,block} = R_v + 1,25f_{t,0,k}A_{net,t}, \quad (2.21)$$

где  $R_v$  – расчетное сопротивление скалыванию ряда нагеля, определяемое по формуле (2.21);  $A_{net,t}$  – площадь нетто поверхности скалывания в плоскости, перпендикулярной волокнам:  $A_{net,t} = b_{net} t$ .

Несущая способность при растяжении деревянного элемента соединения  $F_{B,net}$  определяется по формуле

$$F_{B,net} = f_{t,0,k}A_{net}, \quad (2.22)$$

где  $f_{t,0,k}$  – характеристическая прочность при растяжении;  $A_{net}$  – площадь нетто поперечного сечения деревянного элемента.

Hanhijärvi и Kevarinmäki [96, 97] предложили комплексный подход к решению обозначенной выше проблемы. Расчетная модель, разработанная авторами, учитывает все возможные режимы хрупкого разрушения для нагельных соединений. Как показано на рис. 2.9, стык деревянных элементов разделён на две части: наружную (квадратная штриховка) и внутреннюю (линейная штриховка). Каждая из частей соединения связана со своей соответствующей плоскостью разрушения (сплошные линии для внутренних частей и штриховые линии для внешних частей). Несущая способность наружной и внутренней части определяются отдельно, а прочность каждого деревянного элемента соединения рассматривается как сумма несущих способностей обеих частей.

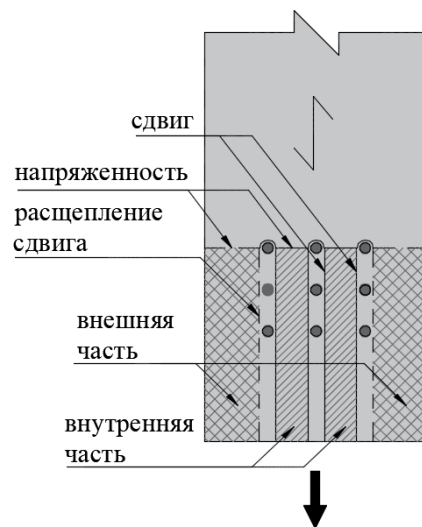


Рис. 2.9. Разделение соединения на внешнюю и внутреннюю части, выполненное Ханхиярви и Кеваринмяки [96, 97]

Различные режимы отказа рассматриваются в каждой части. Они также рассматривают возможное взаимодействие между сдвигом и растягивающим напряжением ( $F_j$  и  $F_k$ ), что уменьшает результирующую несущую способность ( $F_{j+k}$ ). Вследствие этого, результирующая несущая способность  $F_{j+k}$  получается из приведенного ниже уравнения, учитывающего коэффициент взаимодействия  $k_{inter}=0,3$

$$F_{j+k} = \begin{cases} F_j \left( 1 - k_{inter} \frac{F_j}{F_k} \right) & \text{if } F_j \leq F_k \\ F_k \left( 1 - k_{inter} \frac{F_k}{F_j} \right) & \text{if } F_k < F_j \end{cases} \quad (2.23)$$

Этот метод учитывает эффективное количество крепежных деталей (учет распределения нагрузки между крепежными элементами),  $n_{ef} = n_c^{0,9}$ . Кроме того, также происходит уменьшение фактической толщины  $t_{ef}$  (аналогично параметр  $K_{LS}$  от Quenneville и Zarnani [96] и  $t_{ef}$  из Еврокода 5 [89]):

$$t_{ef} = \min \left( 1, \frac{d}{0,6 \sqrt{\frac{1,5 f_{h,0}}{f_y} 2,45t}} \right) t \quad \text{внешняя часть} \quad (2.24)$$

$$t_{ef} = \min \left( 1, \frac{d}{0,5 \sqrt{\frac{1,5 f_{h,0}}{f_y} 1,23t}} \right) t \quad \text{внутренняя часть}$$

где  $f_y$  - предел текучести нагелей

Возможные режимы хрупкого разрушения: напряжение  $F_{t,int}$  (2.25) и сдвиг  $F_{v,int}$  (2.26)

$$F_{t,int} = k_{t,cnctr} \frac{n_{ef}}{n_c} (a_2 - d) t f_{t,0,k} \quad (2.25)$$

$$F_{v,int} = k_{v,cnctr} \frac{n_{ef}}{n_c} 2L_c t_{red} f_{v,k} \quad (2.26)$$

где  $k_{t,cnctr}$  и  $k_{v,cnctr}$  — коэффициенты концентрации напряжений, близкие к значениям 1,5 и 0,7, определенным в Еврокоде 5, которые зависят от типа инженерной древесины (КДК, ЛВЛ и др.), используемой в соединениях.

Несущая способность при хрупком разрушении определяется с учетом взаимодействия между скалыванием и растяжением  $F_{t+v,int}$

Возможные режимы хрупкого разрушения наружных деталей: растяжение  $F_{t,out}$  (2.27) и сдвиг  $F_{v,out}$  (2.28)

$$F_{t,out} = k_{t,cnctr} \frac{n_{ef}}{n_c} \left( a_4 - \frac{d}{2} \right) t f_{t,0,k} K_{t,outer} \quad (2.27)$$

$$F_{v,out} = k_{v,cnctr} \frac{n_{ef}}{n_c} L_c t_{red} f_{v,k} \quad (2.28)$$

$$F_{spl,hole} = \frac{k_{t90,cnctr} n_{ef} 10 f_{t,90,k} t_{red} a_3}{\max\left(1; 0,65 \frac{a_3}{a_4}\right)} \quad (2.29)$$

$$F_{spl,end} = \frac{k_{t90,cnctr} n_{ef} 10 f_{t,90,k} t_{red} a_3}{2,7 \cosh\left(\frac{a_3}{a_4} - 1,4\right)} \quad (2.30)$$

где  $k_{t,outer}$  – рассмотрена асимметрия распределения растягивающих напряжений и зависит от соотношения площадей растяжения и сдвига, и  $k_{t90,cnctr}$  м – это еще один фактор концентрации напряжений, который зависит от лесоматериала.

В первом выражении рассматривается отказ внешних элементов, а во втором отказ внутреннего деревянного элемента. Считается, что несущая способность соединения достигается тогда, когда один из его членов достигает своей собственной жесткости. В этот момент другой элемент достигнет пропорциональной нагрузки, связанной с отношением толщины, которая будет ниже, чем его несущая способность. Этот подход, основанный на жесткости, может быть применен для соединения с любым числом плоскостей сдвига.

В стандартах нет сведений о модели хрупкого разрушения для соединения с несколькими плоскостями скалывания. Hanhijärvi и Kevarinmäki [96, 97] в своих расчетах использовали метод определения несущей способности соединения, учитывающий четыре плоскости скалывания. Авторы предположили, что такое соединение можно рассчитать как сумму двух двойных скалывающих воздействий:  $F_{w-s-w-s-w} = F_{w-s-w} + F_{s-w-s}$ .

Согласно этому предложению, все элементы древесины должны достигать максимума своей несущей способности одновременно. Однако это невыполнимо в случае хрупкого разрушения, наступающего до того, как нагель достигнет предела текучести при разных толщинах деревянных элементов (внутреннего и

наружного). Для случая, когда несущая способность каждого деревянного элемента достигает предела хрупкого разрушения, *предложен метод жесткости* для расчета несущей способности соединения [115].

Модель хрупкого разрушения соединения, когда один из элементов (внешний или внутренний) достигает своей хрупкой стадии, можно представить в виде пружинной модели (рис. 2.10), где наружные элементы имеют жесткость  $K_1$ , а внутренние элементы —  $K_2$ . Предполагается, что соединение является симметричным, так как асимметричная конфигурация не будет иметь никакого смысла с точки зрения эффективного распределения нагрузки.

Жесткость каждого пружинного элемента может быть определена по закону Гука [22] как осевая жесткость деревянного элемента:

$$K = \frac{E_0 A}{L} = \frac{E_0 b t}{L}, \quad (2.31)$$

где  $A$  — площадь поперечного сечения древесины, определяемая его шириной  $b$  и толщиной  $t$ ;  $L$  — длина образца древесины;  $E_0$  — модуль упругости параллельно волокнам.

Следовательно, общая несущая способность соединения ( $F_B$ ) определяется как сумма нагрузок, приложенных к двум внешним элементам — ( $F_{b,1}$ ) и внутреннему ( $F_{b,2}$ ):

$$F_B = 2F_{b,1} + F_{b,2}. \quad (2.32)$$

Деформация  $\Delta$  всех пружин может быть принята равной:

$$\Delta_1 = \Delta_2. \quad (2.33)$$

Нагрузка на каждую пружину (то есть на каждый элемент) определяется по формуле

$$F_B = K\Delta. \quad (2.34)$$

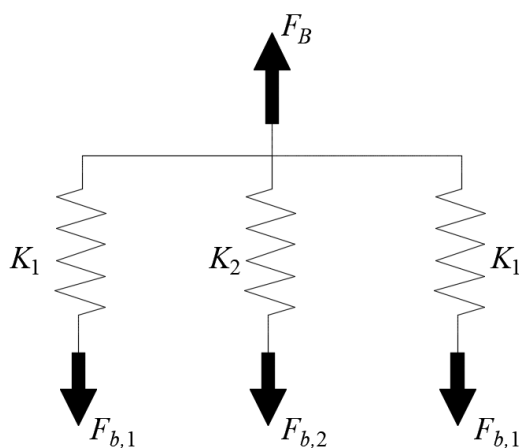


Рис. 2.10. Пружинная модель соединения деревянных элементов с четырьмя плоскостями сдвига со стальными пластинами.  $F_B$  – несущая способность соединения

Объединив представленные выше формулы (2.31), (2.33), (2.34), имеем:

$$\frac{F_{b,1}L_1}{E_1b_1t_1} = \frac{F_{b,2}L_2}{E_2b_2t_2} \quad (2.35)$$

Так как все свойства деревянных элементов, кроме толщины  $t$ , одинаковы, то формула (2.35) может быть упрощена до

$$F_{b,1} = F_{b,2} \frac{t_1}{t_2} \quad (2.36)$$

Результирующее выражение (2.36), полученное путем объединения равенств (2.32) и (2.35), справедливо для случая соединения с двумя стальными пластинами. Подобные выражения могут быть получены и для соединений с большим количеством плоскостей скалывания.

### 2.3. Расчет несущей способности соединений с использованием различных моделей пластического разрушения

Для исследования пластичности соединения с самонарезающими нагелями спроектирована модель соединения с переменными параметрами, включающими: положение стальных пластин в соединении, количество нагелей,

расположение нагелей в соединении (характеристический интервал). Для расчетов приняты следующие параметры: самонарезающие нагели *WS-7x133*,  $\varnothing 7$  мм,  $L = 133$  мм,  $f_u = 600$  Н/мм<sup>2</sup>,  $M_y = 31930$  Н·мм; две стальные пластины толщиной 5 мм с характерным пределом текучести  $f_{y,k} = 300$  Н/мм<sup>2</sup>; деревянная конструкция из ЛВЛ с геометрическими размерами  $b \times h = 140 \times 140$  мм<sup>2</sup>;  $f_{t,0,k} = 28,98$  Н/мм<sup>2</sup>;  $F_{v,k} = 2,6$  Н/мм<sup>2</sup> (параметры по СТО 36554501-021–2010).

Из формул предыдущих исследований следует [75, 76, 77, 79], что параметры  $t_1$  и  $t_2$  определяют зависимость несущей способности соединения от положения секций (положения стальных пластин). При наличии устойчивых к сжатию связей внешняя нагрузка симметрична, соотношение между  $t_1$  и  $t_2$  следует уравнению:

$$t_2 = h - 2(t_1 + t_p).$$

В структуре соединения рассмотрим изменение  $t_1$  с шагом 5 мм ( $10 \text{ мм} \leq t_1 \leq b = 140 \text{ мм}$ ). Несущая способность нагеля в соединениях, в зависимости от положения стальных пластин, представлена в табл. 2.1 и на рис. 2.11.

Таблица 2.1. Значение несущей способности нагелей с различными моделями НДС

А. По Еврокоду 5

№	t1	t2	Модель f	Модель g	Модель h	Модель l	Модель m	F <sub>v</sub> ,Rk(a)	F <sub>v</sub> ,Rk(б)	FЕu-5, кН
1	10	110	2,03	3,81	5,85	11,16	4,14	2,03	4,14	12,34
2	15	100	3,04	3,62	5,85	10,14	4,14	3,04	4,14	14,36
3	20	90	4,06	3,61	5,85	9,13	4,14	3,61	4,14	15,50
4	25	80	5,07	3,72	5,85	8,11	4,14	3,72	4,14	15,73
5	30	70	6,09	3,91	5,85	7,10	4,14	3,91	4,14	16,11
6	35	60	7,10	4,16	5,85	6,09	4,14	4,16	4,14	16,59
7	40	50	8,11	4,44	5,85	5,07	4,14	4,44	4,14	17,16
8	45	40	9,13	4,75	5,85	4,06	4,14	4,75	4,06	17,61
9	50	30	10,14	5,08	5,85	3,04	4,14	5,08	3,04	16,24
10	55	20	11,16	5,42	5,85	2,03	4,14	5,42	2,03	14,90
11	60	10	12,17	5,78	5,85	1,01	4,14	5,78	1,01	13,59

Б. По Pedersen [110]



№	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4	Модель 5	Модель 6	Модель 7	F <sub>Pe</sub> , кН
1	6,59	7,49	5,09	3,08	3,56	8,12	3,60	12,32
2	6,59	6,88	5,09	3,88	4,07	7,62	3,38	13,52
3	6,59	6,37	5,09	4,74	4,57	7,11	3,23	12,91
4	6,59	5,92	5,09	5,65	5,08	6,60	3,12	12,48
5	6,59	5,51	5,09	6,58	5,59	6,10	3,04	12,15
6	6,59	5,12	5,09	7,53	6,10	5,59	2,98	11,90
7	6,59	4,76	5,09	8,50	6,60	5,08	2,93	11,71
8	6,59	4,40	5,09	9,47	7,11	4,57	2,89	11,55
9	6,59	4,06	5,09	10,45	7,62	4,07	2,85	11,42
10	6,59	3,73	5,09	11,44	8,12	3,56	2,83	11,31
11	6,59	3,40	5,09	12,43	8,63	3,05	2,81	11,22

В. По Sawata et al. [115]

№	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 5	Модель 6	Модель 7	F <sub>Sa</sub> , кН
1	71,00	92,54	116,37	16,53	96,04	112,87	8,26
2	66,94	85,11	116,37	18,55	89,95	111,53	9,28
3	62,89	77,93	116,37	20,58	83,86	110,44	10,29
4	58,83	70,98	116,37	22,61	77,78	109,57	11,31
5	54,77	64,23	116,37	24,64	71,69	108,91	12,32
6	50,72	57,67	116,37	26,67	65,61	108,43	13,33
7	46,66	51,26	116,37	28,70	59,52	108,10	14,35
8	42,60	44,98	116,37	30,73	53,44	107,92	15,36
9	38,54	38,83	116,37	32,75	47,35	107,85	16,38
10	34,49	32,78	116,37	34,78	41,26	107,88	16,39
11	30,43	26,82	116,37	36,81	35,18	108,01	13,41

### Несущая способность нагеля

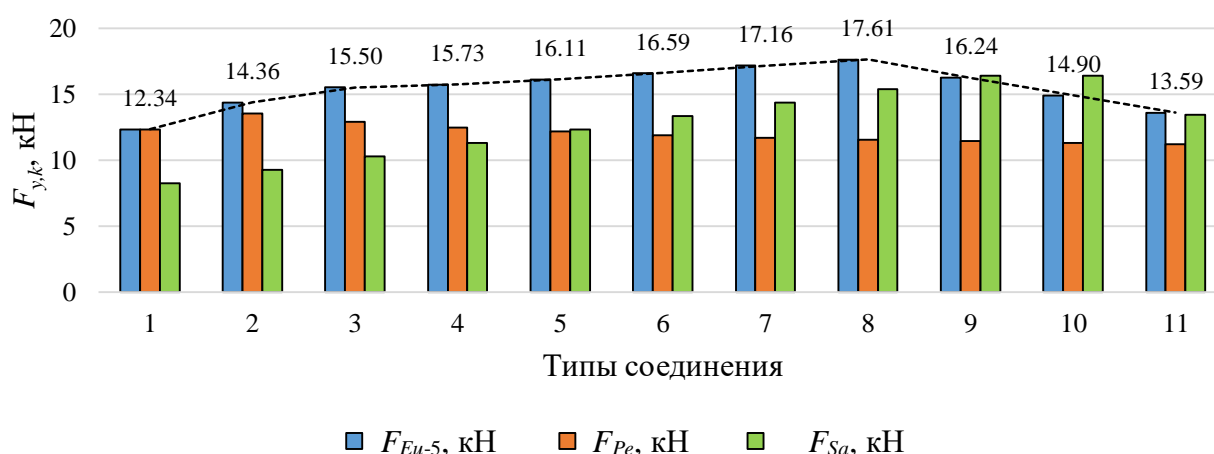
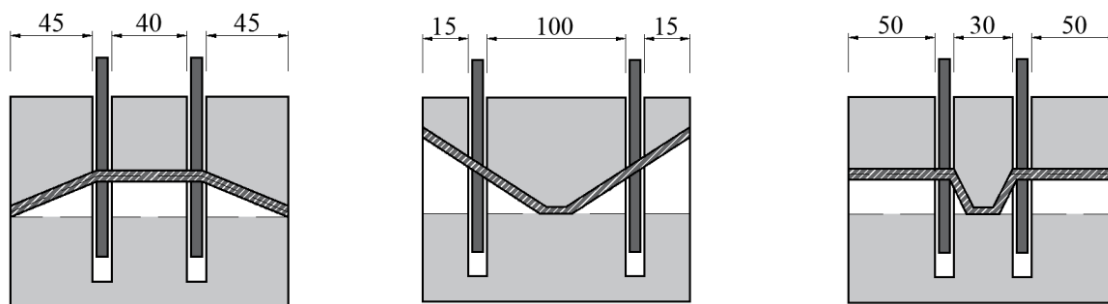


Рис. 2.11. Результаты расчета несущей способности нагеля в зависимости от типа соединения и метода расчета

В данном исследовании за основу принят способ расчета по Еврокоду 5, который сравнивается с другими расчетными моделями. Соединение является оптимальным, когда несущая способность соединения является наибольшей. При расчете получаем:  $F_{\max} = \max(F_{\min}) = 17,61$  кН, что соответствует значениям  $t_1 = 45$  мм;  $t_2 = 40$  мм, и  $F_{\max}$  достигается в модели пластического разрушения ( $g + l$ ). На рис. 2.12 показаны модели отказов, полученные по основанию расчетов.



Модель ( $g + l$ );  $F_{\text{нагель}} =$   
17,61 кН (по Еврокоду 5)

Модель 7;  $F_d = F_{\text{нагель}} =$   
13,52 кН (по Pedersen)

Модель 5;  $F_d = F_{\text{нагель}} =$   
16,38 кН (по Sawata et al.)

Рис. 2.12. Несущая способность соединения и геометрия соединения, полученные из результатов расчета

В результате каждый метод расчета предлагает различные оптимальные модели соединения с четырьмя плоскостями среза. Согласно [98] получено оптимальное соединение с пластическим разрушением по модели 7, и согласно [89] – по модели 5. По Еврокоду 5 суммой моделей  $g + l$  получен лучший результат несущей способности нагеля.

*Разработка методики расчета моделей пластического разрушения в соединении с несколькими плоскостями среза.* Расчетное уравнение для прочности на сдвиг нагельного соединения деревянной конструкции основаны на теории, первоначально предложенной Йохансеном (Johansen) [102]. При увеличении количества стальных пластин соединения, работающего на сжатие и растяжение, положение стальных пластин симметричное, для обеспечения равномерного распределения нагрузки. Поэтому два геометрических параметра,

влияющих на несущую способность соединения, по-прежнему равны  $t_1$  и  $t_2$  в соединении с несколькими стальными пластинами.

В исследовании [98], в котором рассматривается положение самой наружной стальной пластины, формулы (14) – (20) обеспечивают соотношение несущей способности нагеля одной плоскости среза в соединении на наружной и внутренней частях внешней стальной пластины (см. рис. 2.2). Несущая способность нагеля в соединении линейно зависит от количества стальных пластин  $n_s$  и рассчитывается по формуле (2.5).

В исследовании [115] несущая способность соединения учитывает все стальные пластины в соединении. Каждый случай пластического разрушения рассчитывается в зависимости от количества стальных пластин. Уравнение (2.8) выглядит как:

$$F_D = f(n_s) f_{h,0} d n_c n_r.$$

Согласно Еврокоду 5, несущая способность нагеля в соединении учитывается независимо от плоскостей среза. Формула (2.2) для соединения с несколькими стальными пластинами будет выглядеть как

$$F_{v,Rk} = 2F_{v,Rk(б)} + (2n_s - 2)F_{v,Rk(в)}, \quad (2.37)$$

где  $n_s$  — количество стальных пластин в соединении.

Из результатов расчета получаем оптимальные типы соединения по разным моделям (см. рис. 2.12). При увеличении количества стальных пластин вычисления выполняются для каждого типа соединения (оптимизированного с помощью расчетной модели) в соответствии с рассматриваемыми расчетными моделями. В табл. 2.2 показан пример расчета для соединения с двумя и тремя стальными пластинами.

Таблица 2.2. Пример расчета для различных типов соединения

Количество стальных пластин $n_s$	Варианты соединения	$F_{Eu-5}$ , кН	$F_{Pe}$ , кН	$F_{Sa}$ , кН
2	$t1 = 15; t2 = 100$	14,36	13,52	9,28
	$t1 = 45; t2 = 40$	17,61	11,55	15,36

	$t1 = 30; t2 = 50$	16,24	11,42	16,38
3	$t1 = 15; t2 = 100$	22,64	20,28	13,43
	$t1 = 45; t2 = 40$	25,73	17,32	19,52
	$t1 = 30; t2 = 50$	22,33	17,13	20,53

Согласно расчетным моделям, выполняем процесс расчета с увеличением количества стальных пластин в соединении. В результате получена диаграмма значения несущей способности нагеля в соединении при увеличении количества стальных пластин (рис. 2.13). Полученные формулы требуют экспериментальной проверки.

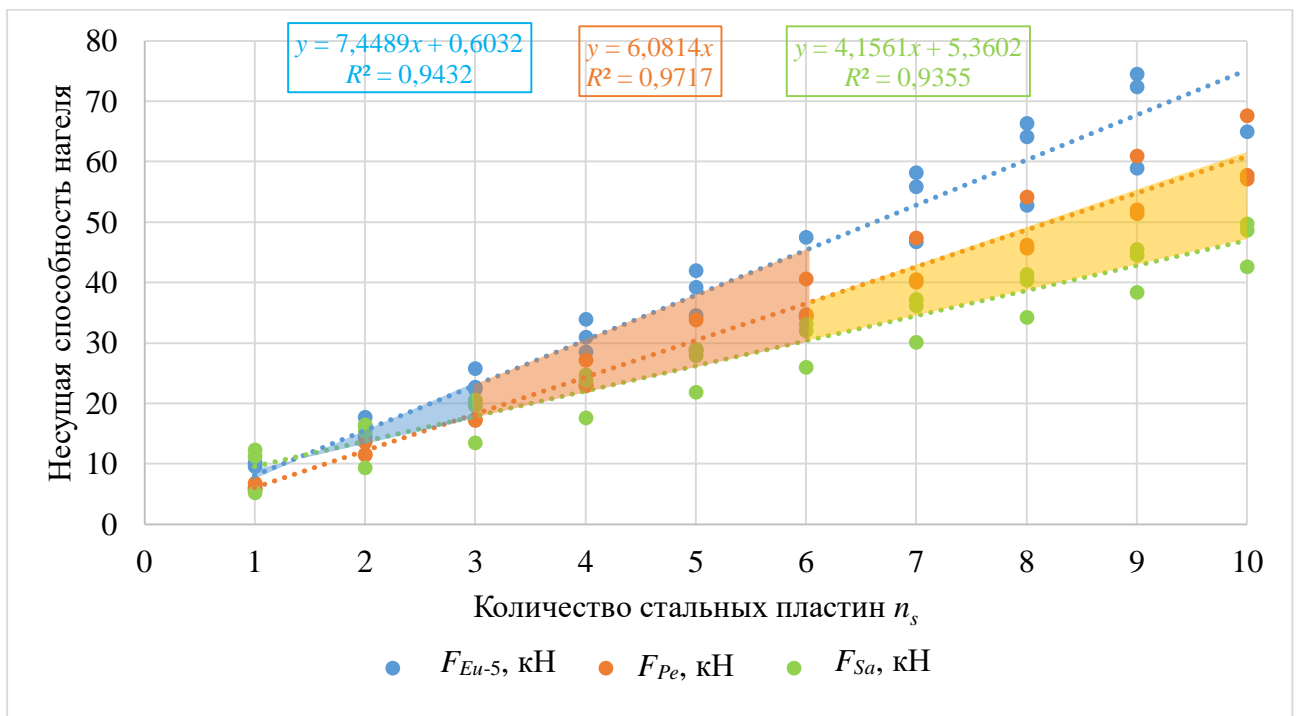



Рис. 2.13. Зависимость несущей способности нагеля от количества стальных пластин

Рекомендуемый выбор метода расчета в зависимости от количества стальных пластин  $n_s$ :

$n_s$  от 1 до 3 – значение несущей способности нагеля принимать по результатам расчета от  $F_{Pe}$  до  $F_{Eu-5}$ .

$n_s$  от 3 до 6 – значение несущей способности нагеля принимать по результатам расчета от  $F_{Pe}$  или  $F_{Sa}$  до  $F_{Eu-5}$ .

  $n_s$  от 6 до 10 – значение несущей способности нагеля принимать по результатам расчета по  $F_{Pe}$  до  $F_{Sa}$ .

В работе представлены модели расчета пластических разрушений соединений, в которых экспериментально проверяются две модели – Pedersen [98] и Sawata et al. [115]. Расчеты по Еврокоду 5 сравниваются с этими двумя моделями.

Расчеты по Еврокоду 5 соответствуют принципу распределения и передачи нагрузки для соединения с двумя стальными пластинами.

В методе Sawata et al. учитываются связи между поперечными сечениями на нагеле вместо учета несущей способности на каждом отдельном поперечном сечении, что увеличивает несущую способность нагелей. Согласно предыдущим исследованиям и результатам расчета, метод Sawata et al менее точен, чем метод Pedersen и Еврокод

Для расчета соединений, в зависимости от количества стальных пластин в соединении по российским нормам, целесообразно использовать методику, предложенную автором в п. 2.3.

### *2.3.1. Влияние диаметра нагеля и геометрического положения элементов на предел прочности соединения (при хрупком разрушении)*

На практике в соединениях деревянных конструкций применяют нагели диаметром от 5 до 30 мм. Выбор диаметра нагеля существенно влияет на несущую способность соединения и режим его разрушения за счет пластической деформации нагеля. При одинаковой несущей способности соединения требуемое количество нагелей уменьшается с увеличением их диаметра (рис. 2.14).

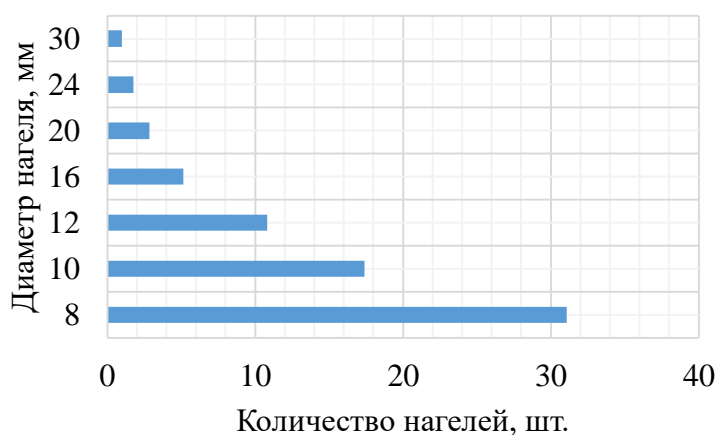


Рис. 2.14. Соотношение между количеством и диаметром нагелей при изгибающем моменте  $M_y = 1247 \text{ Н} \cdot \text{м}$  (нормативный момент пластической деформации одного нагеля  $d = 30 \text{ мм}$ ,  $f_u = 600 \text{ Н/мм}^2$ )

Для соединений деревянных конструкций выбор нагелей меньшего диаметра и увеличение их количества приведут к более равномерному распределению напряжений в древесине (принцип дробности). Кроме того, деформации при изгибе нагелей малого диаметра уменьшают эффективное напряжение и перераспределяют напряжение на элементы с большей жесткостью в структуре древесины. Это приводит к локальному разрушению в элементе деревянной конструкции.

Анализ рассматриваемых моделей соединений проведен методом конечных элементов в программе ANSYS 18.2 [28]. Входные параметры элементов деревянных конструкций приняты по [39]. Общий вид исследуемого соединения представлен на рис. 2.15. Результаты определения напряжений в элементах соединения показаны на рис. 2.16.

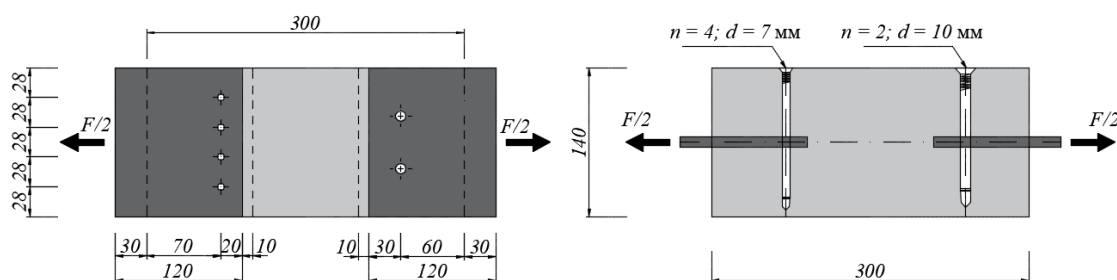


Рис. 2.15. Общий вид образцов деревянных конструкций с использованием различных диаметров нагелей

В табл. 2.3 представлены относительные деформации древесины в области отверстий для нагелей различных диаметров. Деревянные элементы в области А имеют большие по величине относительные деформации, чем в области Б. Максимальное значение деформаций всегда находится в области А в процессе увеличения нагрузки. Следовательно, в этой области произойдет хрупкое разрушение.

Таблица 2.3. Изополя относительных деформаций в отверстиях деревянных конструкций

Нагрузка	0,2 МПа	0,4 МПа	0,6 МПа	0,8 МПа	1,0 МПа
Относительные деформации в области А, d = 10 мм					
Относительные деформации в области Б, d = 7 мм					
$\epsilon_{\max}$ , мм/мм	8,3224e-002	8,3367e-002	8,3548e-002	9,417e-002	0,10402

Данный факт объясняется тем, что работа деревянного элемента зависит от совместной работы нагелей и стальных пластин в соединении. Аналитические результаты показывают, что напряжения сжатия в первой стальной пластине (область А) ( $\sigma_1 = -20,487$  МПа) меньше, чем во второй стальной пластине (область Б) ( $\sigma_2 = -31,739$  МПа). Напряжения в соединениях с меньшими по диаметру нагелями также меньше, поскольку деформации изгиба в нагелях уменьшают напряжения и деформации в деревянных элементах, что позволяет всему соединению достигнуть момента пластического разрушения (рис. 2.17).

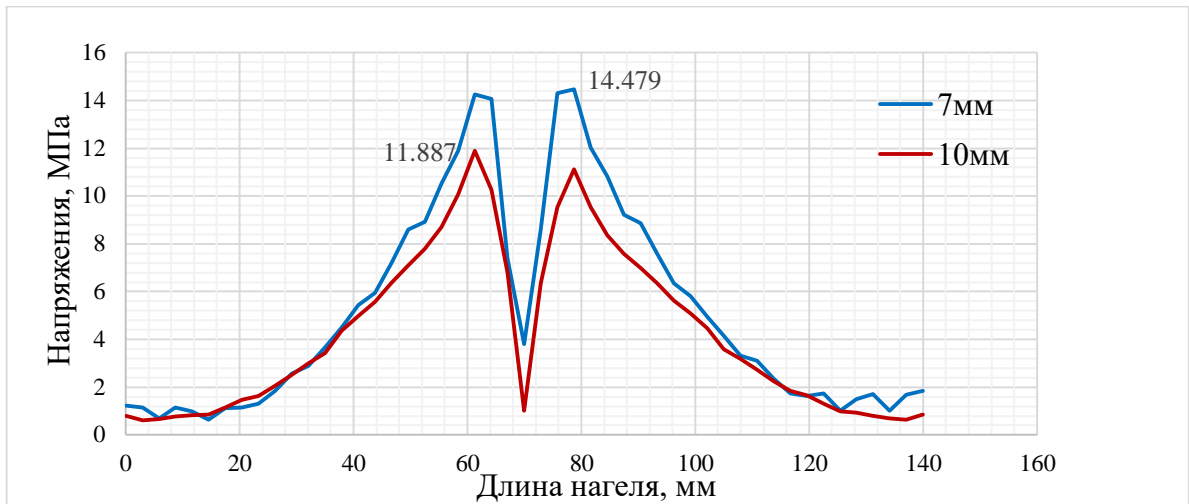


Рис. 2.16. Распределение напряжений по длине нагелей

Диаметр нагелей влияет на характер хрупкого разрушения в деревянных конструкциях. Результаты численного моделирования, представленные на рисунке 2.3 показывают, что для нагелей диаметром 10 мм возникает большая деформация, что может вызвать хрупкое разрушение по скалыванию ряда (см. табл. 2.3), в то время как в соединении с нагелями 7 мм деформации распределены по поверхности деревянного элемента за счет увеличения числа нагелей (согласно принципу дробности [15]) (табл. 2.4).

Таблица 2.4. Напряжения и относительные деформации в деревянном элементе

Напряжения в поперечном сечении по длине деревянного элемента, МПа		
Относительные деформации на поперечном сечении по длине деревянного элемента, мм/мм		
	область А ( $d = 10$ мм)	область Б ( $d = 7$ мм)



Как видно из результатов численного моделирования, нагрузка, передаваемая от нагелей в ряду ( $n_c$ ), концентрируется в поперечном сечении деревянной конструкции, таким образом увеличивая суммарное напряжение в зоне крепления нагелей.

При расчете соединения в условиях пластического разрушения все еще существуют противоречивые результаты. Для метода Еврокода 5 необходимо провести дополнительные исследования, чтобы определить соответствие расчетов фактической несущей способности соединений.

Расчет соединения в условиях пластического разрушения является основой для разработки схемы расположения нагелей и оптимизации их количества в соединении, при исключении возможности хрупкого разрушения.

На основании обобщения расчетных характеристик различных моделей выявлены факторы, вызывающие хрупкое разрушение в соединениях деревянных конструкций с самонарезающими нагелями и стальными пластинами. Численное моделирование показало, что уменьшение диаметра нагелей способствует распределению локальных напряжений в деревянных конструкциях, тем самым значительно уменьшая вероятность хрупкого разрушения соединения.

#### **2.4. Влияние допустимого отклонения между предварительно просверленным отверстием в деревянных конструкциях и нагелем**

Исходя из теоретического анализа, варианты допусков в соединениях с использованием самонарезающих нагелей и стальными пластинами показаны в таблице 2.5

Таблица 2.5. Варианты допусков в соединении на испытании по КЭМ

Схемы	а	б	в	г	д
Диаметр нагеля (мм)	5	7	7	7	12
Отверстия в деревянной конструкции (мм)	5	7	10	14	14

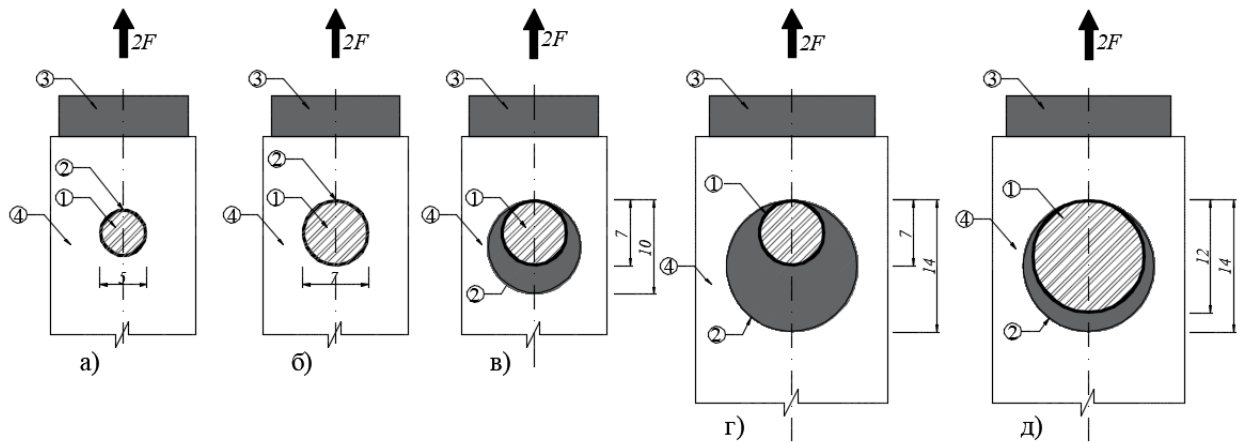
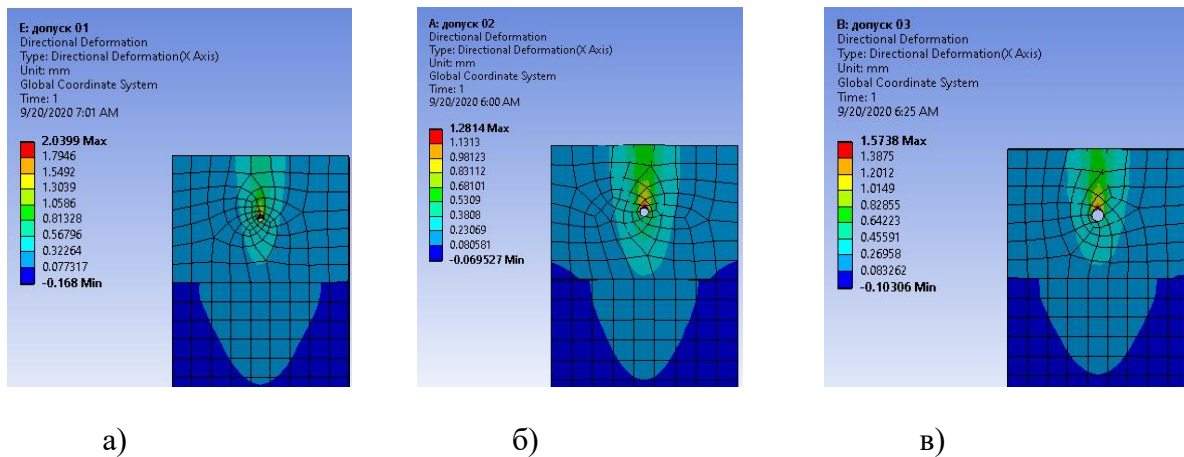
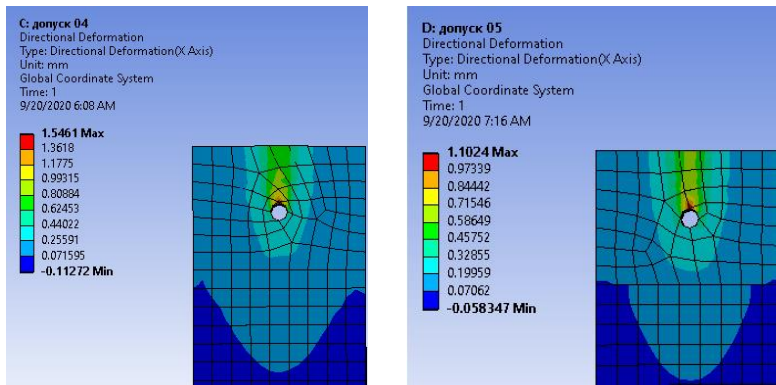


Рис. 2.17. Схемы расчета вариантов соединения с различными значениями допусков; 1 - нагель с диаметром  $d$  от 5 мм до 12 мм; 2 - предварительно просверленные отверстия; 3 - стальная пластина  $t = 10$ (мм); 4 - деревянная конструкция из ЛВЛ

Для моделирования работы соединения в реальных условиях в данной работе использовался метод конечных элементов. Для численного анализа использовалась программа ANSYS 18.2 (Finite Element Method - FEM). Размер образца деревянных конструкций для моделирования составлял  $140 \times 140 \times 250$  (мм), толщина стальных пластин S235;  $t = 10$  (мм). Все модели в этом исследовании имеют одинаковую размерность [6].

Результаты анализа напряжений, деформаций и зависимость нагрузки и максимальных деформаций в соединении представлены на рис. 2.18 и на рис. 2.19.





г)

д)

Рис. 2.18. Величина деформации в направлении растягивающей нагрузки в деревянных конструкциях в различных схемах

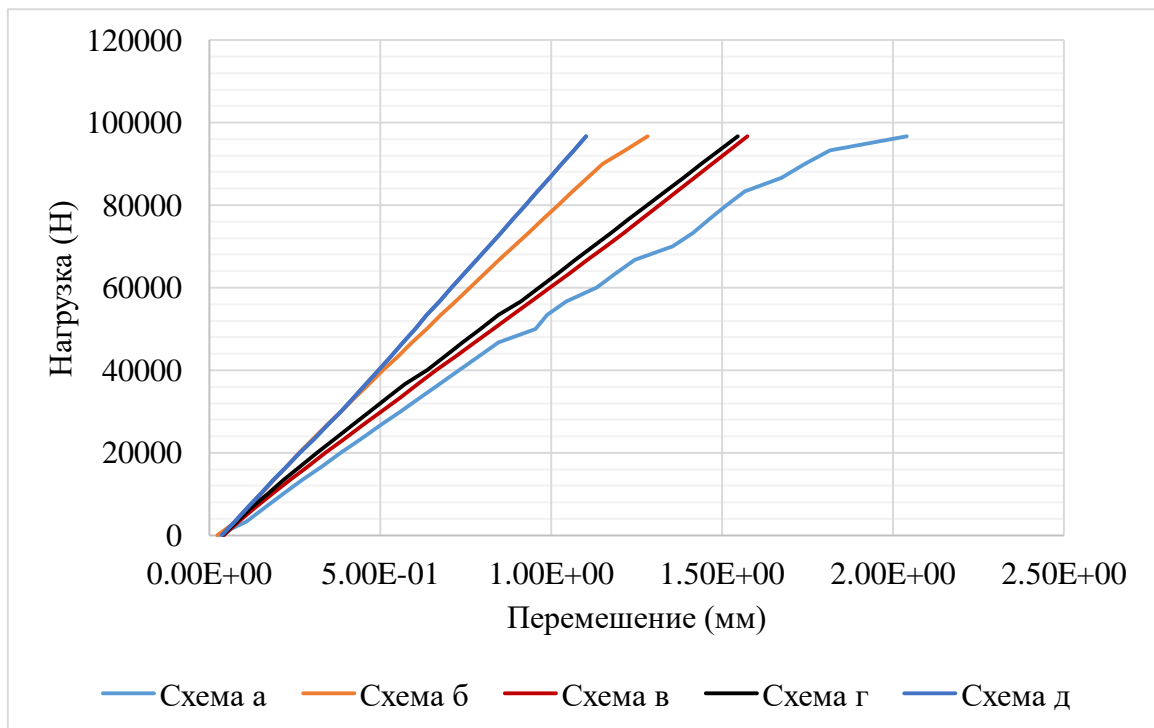


Рис. 2.19. Зависимость нагрузка – максимальное перемещение в соединении

Результаты анализа показали, что допустимое отклонение между предварительно просверленным отверстием в деревянных конструкциях и нагелем существенно влияет на развитие деформаций и трещин. На схеме (б) с нулевым допуском увеличение деформации происходит медленнее, чем на схеме (в); (г) с большим допуском при воздействии той же нагрузки с тем же диаметром

(7мм) (рис. 2.18). Наибольшее значение деформации на схеме (б) ( $\delta_b = 1,2814\text{мм}$ ) меньше, чем на схеме (в) и (г) ( $\delta_v = 1,5738\text{мм}$ ;  $\delta_g = 1,5461\text{мм}$ ).

Деформация изгиба нагеля в соединении также сильно влияет на деформацию деревянных конструкций. На схеме (д) с меньшей деформацией изгиба нагеля (диаметр нагеля 12 мм), на схеме (а) (диаметр 5 мм). Так, наибольшее значение деформации на схеме 5 ( $\delta_d = 1,1025\text{мм}$ ) меньше, чем на схеме (а) ( $\delta_a = 2,0399\text{мм}$ ). Однако использование нагелей меньшего диаметра (до 7 мм), эквивалентных по сопротивлению изгибу, может быть эффективнее по сравнению со нагелями большего диаметра, так как это снижает локальные напряжения в соединениях деревянных конструкций при равной внешней нагрузке.

На основании проведенного анализа выявлена необходимость для разработки методик расчета узловых соединений деревянных конструкций с применением нагелей, с учетом предельных состояний пластичности при действии кратковременной и длительной нагрузок, учитывающих изменение механических свойств древесины в зоне контакта с нагелем и влияние между предварительно просверленным отверстием и нагелем. Это является исходной предпосылкой для разработки соединения с применением самонарезающих нагелей, в которых допуски во всех элементах минимальные.

Результаты исследований показывают, что соединения с нагелями малых диаметров (до 7 мм) позволяют достичь высокой несущей способности. Хрупкое разрушение деревянных конструкций может произойти только после значительной пластической деформации стальных нагелей. Соединения с меньшим расстоянием между нагелями возможны, когда отверстия в деревянных конструкциях и в стальных пластинах просверлены с высокой точностью.

Допуски при изготовлении отверстий влияют на напряженно-деформированное состояние соединений. Для нагелей диаметром до 7 мм эффект неравномерного распределения нагрузки между нагелями, возникающий из-за допусков, может быть уравновешен за счет пластических деформаций нагеля при

изгибе. Соединения, изготовленные с высокой точностью, имеют более равномерное распределение нагрузки между нагелями и по поверхности деревянных конструкций.

## **2.5. Алгоритмы расчета узловых соединений деревянных конструкций (ЛВЛ) с применением самонарезающих нагельных**

Алгоритм по определению оптимальной математической модели расчета несущей способности нагелей на изгиб в соединениях со стальными пластинами представлена на рис. 2.20.

На основе анализа и сравнения экспериментальных и расчетных данных, полученных по различным математическим моделям, предлагается методика расчета соединений деревянных конструкций с использованием самонарезающих нагелей в следующей последовательности:

- расчет несущей способности деревянных конструкций из ЛВЛ при растяжении;
- расчет несущей способности деревянных конструкций из ЛВЛ при смятии;
- расчет несущей способности самонарезающих нагелей при изгибе;
- определение количества поперечных срезов по длине нагелей в соединении (зависит от количества стальных пластин и размера стальных пластин в соединении);
- выполняется сравнение значений несущей способности элементов из древесины при смятии и растяжении со значениями несущей способности нагелей при изгибе.

В данной методике по определению несущей способности деревянных элементов конструкций из ЛВЛ при растяжении и смятии рассчитываются в

соответствии с СП 64.13330.2017, с последующим сравнением значений с несущей способностью нагелей (расчёт по Еврокод 5 с учетом механизма пластического разрушения). Для расчета оптимальной несущей способности соединения сталь-дерево, предлагается совместное использование СП64.13330.2017 и Еврокод 5.

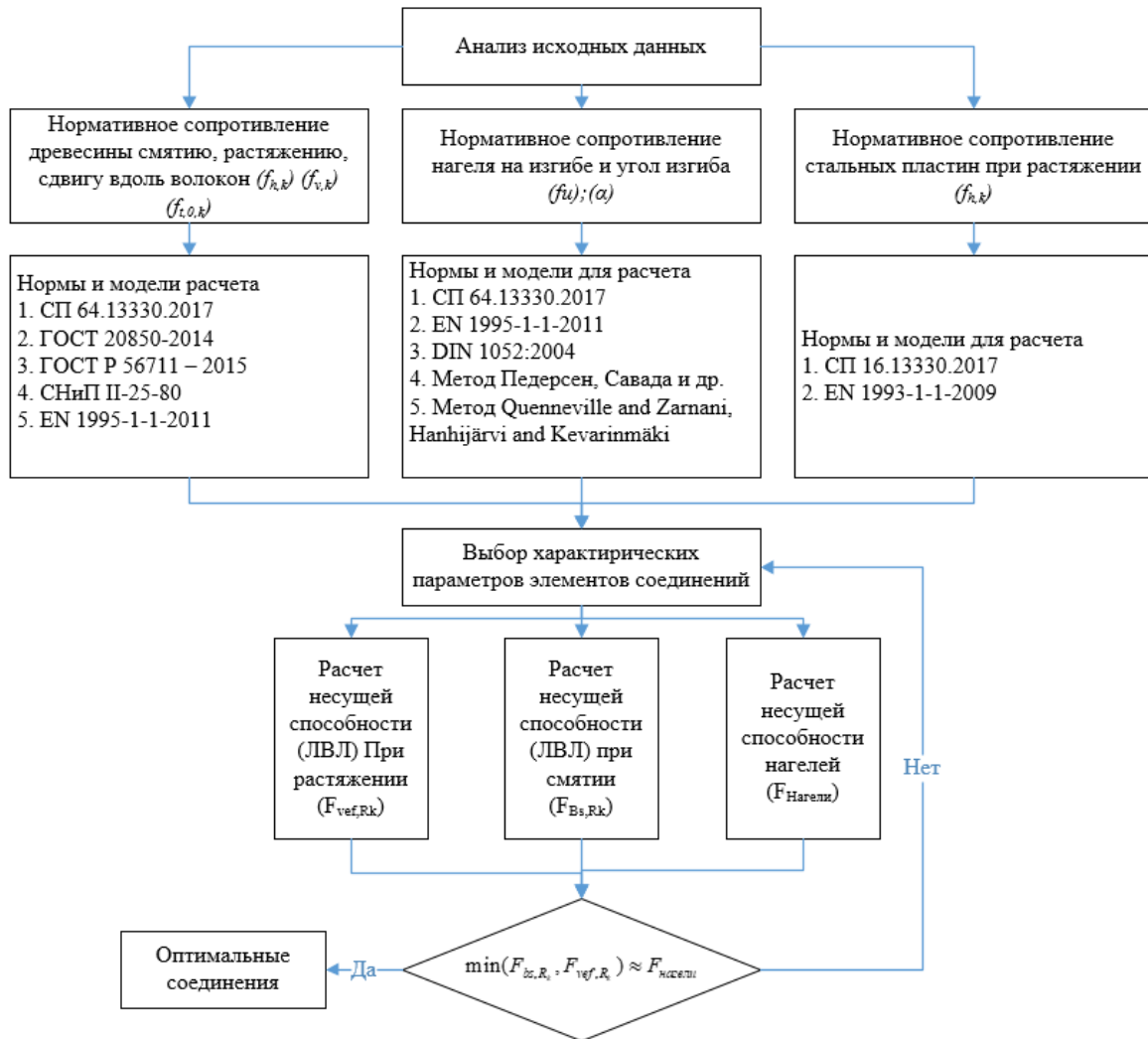


Рис. 2.20. Блок – схема алгоритма определения несущей способности

## 2.6. Выводы по главе

Проведен анализ теоретических моделей, учитывающих влияние количества нагелей и размеров пазов в конструкции из ЛВЛ, количества

стальных пластин в соединении, жесткостных и прочностных характеристик исходных материалов на несущую способность.

По результатам численного моделирования выявлена зависимость распределения напряжений в соединении от диаметра, показано влияние допустимого отклонения между просверленным отверстием в деревянных конструкциях ЛВЛ и диаметром нагеля на несущую способность соединения. Для проверки сделанных выводов целесообразно определить фактическую несущую способность посредством испытания соединений с цилиндрическими нагелями и самонарезающими и сравнить полученные результаты.

Установлено, что распределение напряжений в соединениях «деревосталь», зависит от геометрических размеров стальных пластин. Необходимо провести испытания соединений с использованием стальных пластин различных размеров.

Предложен алгоритм расчета деревянных конструкций с самонарезающими соединениями с учетом наступления одновременного пластического разрушения всех компонентов системы при растяжении.

### ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАКТИЧЕСКОЙ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ

Для подтверждения выводов и предположений, сделанных в теоретической части диссертации, сравнения расчетных значений несущей способности с фактическими был проведен комплекс испытаний моделей узловых нагельных соединений деревянных конструкций из ЛВЛ со стальными пластинами.

В качестве исходных материалов использовались образцы из бруса, однонаправленного, клеенного из шпона торговой марки ULTRALAM, изготовленные на заводе Таллион Терра в г. Торжке. В качестве соединителей на первом этапе применялись цилиндрические нагели (проволочные гвозди диаметром 6 мм), на втором этапе эксперимента – испытание соединений сталь-дерево проводилось с импортными самонарезающими нагельными. Для определения некоторых показателей физических свойств образцов ЛВЛ и металлических соединителей предварительно были проведены их испытания. (п. 3.1)

На первом этапе эксперимента было принято решение провести исследование несущей способности деревянных конструкций с различными конструктивными схемами соединений с металлическими пластинами и цилиндрическими нагельными (гвозди). Оценивалось напряженно-деформированное состояние элементов соединений при сжатии и растяжении, определялись фактические значения несущей способности для разных схем соединений. Рассматривались режимы разрушения соединений: хрупкое разрушение деревянных конструкций из ЛВЛ и разрушение цилиндрических нагелей путем изгиба. Было намечено провести сравнение несущей способности в различных схемах соединений с экспериментальными и теоретическими данными, полученными по разным методикам [5, 16, 18, 42, 43].



### 3.1. Определение плотности и предела прочности на сжатие ЛВЛ и прочности нагелей на растяжение

Изготовление опытных образцов было осуществлено в заводских условиях Таллион Терра в соответствии с заданными размерами. Образцы ЛВЛ были упакованы и размещены в механической лаборатории СПбГАСУ, где поддерживался комнатный температурно-влажностный режим, температура воздуха в лаборатории  $20 \pm 1$  °С, относительная влажность ( $63 \pm 10\%$ ). Для определения плотности и прочности на сжатие были изготовлены образцы из ЛВЛ в виде прямоугольной призмы основанием  $20 \times 20$  мм и высотой 30 мм (согласно ГОСТ 33124 - 2014). Испытания по определению плотности элементов из ЛВЛ проводились с помощью лабораторных весов Ohaus Pioneer PA413C (см. рис.3.1).



Рис. 3.1. Лабораторные весы PA413C с опытным образцом из ЛВЛ

Результаты определения веса и размера образцов и расчет плотности образцов ЛВЛ с помощью оборудования в лаборатории приведены в таблице 3.1

Таблица 3.1. Результаты определение плотности ЛВЛ

№	Длина, мм	Ширина, мм	Высота, мм	Вес, кг	Плотность, $\rho_k$ , кг/м <sup>3</sup>
1	29,35	19,45	19,55	0,0061	546,58
2	30,42	20,52	19,36	0,0068	562,68
3	29,65	20,10	19,81	0,0066	559,03
4	29,89	20,40	20,10	0,0068	554,83
5	30,55	20,65	19,78	0,0071	568,98
6	Среднее значение				558,42

Принимаем среднее значение плотности 558,42 кг/м<sup>3</sup>. В соответствии со стандартом ГОСТ – 33124 – 2014 [12], плотность ЛВЛ при изготовлении должна находиться в пределах от 400 до 700 кг/м<sup>3</sup> (см. п.5.11 [44]).

Испытания по определению предела прочности на сжатие поперек и вдоль волокон было выполнено по ГОСТ 168483.10-73\* [13], ГОСТ 16483.9-73\* [14], СТО 36554501-021-2010 [44].



Рис. 3.2. Экспериментальное определение прочностных показателей ЛВЛ

Результаты испытаний образцов при сжатии вдоль волокон и поперек волокон приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Результаты определения предела прочности при сжатии  
ЛВЛ.

Размеры образцов и результаты испытаний поперек волокон					
№	Ширина, мм	Высота, мм	Площадь, мм <sup>2</sup>	Максимальная нагрузка [кН]	Предел прочности [МПа]
1	19,45	19,55	380,25	5,44	13,72
2	20,52	19,36	397,27	2,90	7,31
3	20,10	19,81	398,18	3,68	9,33
4	20,40	20,10	410,04	3,20	7,81
5	20,65	19,78	408,46	3,13	7,82
Среднее значение					9,2
Размеры образцов и результаты испытаний вдоль волокон					
1	19,65	20,55	403,81	21,24	52,61
2	20,32	19,86	403,56	23,02	57,03
3	20,14	20,21	407,03	22,74	55,86
4	20,30	20,10	408,03	23,14	56,7
5	20,25	19,88	402,57	23,38	58,07
Среднее значение					56,05

По результатам испытания, определены средний предел прочности деревянных конструкций ЛВЛ 9,2 МПа на сжатие поперек волокон и 56,05 МПа на сжатие вдоль волокон в соответствии по [44]. Показатели предела прочности (временного сопротивления) различных типов Ультралам должны быть не менее минимальных значений, указанных в табл. 5 СТО 36554501 -021 -2010 [44].

*Определение предела прочности цилиндрических нагелей (гвоздь) и самонарезающих нагелей при растяжении.* При проведении данных испытаний определяют следующие характеристики [12, 15, 38, 46, 88]

- модуль упругости стали;
- предел текучести условный и физический;
- относительное равномерное удлинение образца;
- относительное сужение поперечного сечения образца после разрыва.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории механических испытаний строительных материалов и конструкций в СПбГАСУ, с использованием универсальной испытательной машины NSTRON 5982 (см. 3.4), имеющей максимальный режим работы до 100, кН. Относительная влажность –  $60\pm 10\%$ , температура  $20\pm 1$  °С. Скорость нагружения при непрерывном увеличении нагрузки составляла 2 мм/мин.

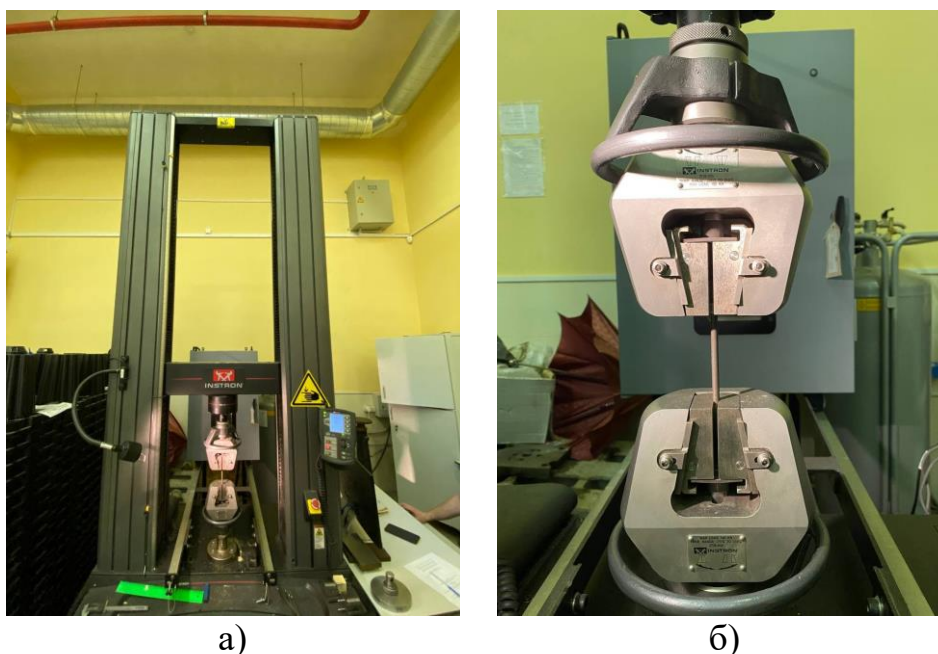


Рис. 3.3. В лаборатории механических испытаний строительных материалов и конструкций в СПбГАСУ: а) машина NSTRON 5969; б) испытание самонарезающих нагелей на растяжение

Гвозди использовались для соединений на первом этапе эксперимента. Экспериментально были установлены их исходные параметры (временное сопротивление, Предел текучести, модуль упругости...) для проверки качества материала и последующего использования в расчетах и численном моделировании МКЭ. Количество образцов испытаний составляло 5 шт. Результаты испытаний образцов гвоздей при растяжении приведены в таблице 3.3 и 3.4.

Таблица 3.3. Результаты определения прочностных характеристик гвоздей (временное сопротивление, предел текучести; МПа)

	Примечание	Максимальная нагрузка [kN]	Предел текучести [MPa]	Временное сопротивление [MPa]	Относительное удлинение [%]
1	Г1	17,87	353,36	627,87	13,43
2	Г2	17,64	393,78	617,86	12,56
3	Г3	17,61	366,27	614,57	12,93
4	Г4	17,61	477,46	610,68	16,05
5	Г5	17,75	435,87	617,45	14,25
Среднее		17,70	405,35	617,68	13,84

Табл. 3.4. Результаты по определению модуля упругости; МПа)

	Примечание	Диаметр (мм)	Модуль упругости [MPa]
1	Г1	6,03	19492,16
2	Г2	6,05	21732,95
3	Г3	6,02	22026,34
4	Г4	6,06	21178,04
5	Г5	6,04	21710,26

Диаграмма зависимости «нагрузка-перемещение» при растяжении по определению предела текучести гвоздей, показано рис. 3.4

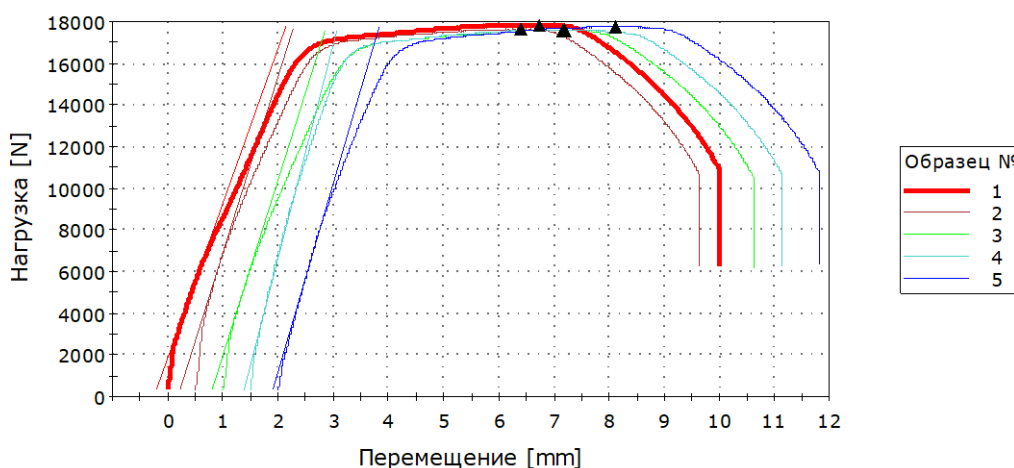


Рис. 3.4. Зависимость «нагрузка-перемещение» для гвоздей при растяжении.

Результаты испытаний гвоздей на растяжение соответствуют исходным параметрам производителя. Для расчетов использованы средние значения.

Проведены были также механические испытания самонарезающих стальных нагелей WS-T 7 мм от производителя SFS intec. Нагели согласно паспортных данных должны обладать следующими характеристиками:

временное сопротивление (нормативное значение) 550 Н/мм<sup>2</sup>; момент пластической деформации (нормативное значение) 31930 (Н·мм)



Рис. 3.5. Испытание самонарезающих нагелей на растяжение

График зависимости «нагрузка-перемещение» самонарезающих нагелей (WS-7мм) при растяжении по определению предела текучести самонарезающих нагелей, показан на рис. 3.6

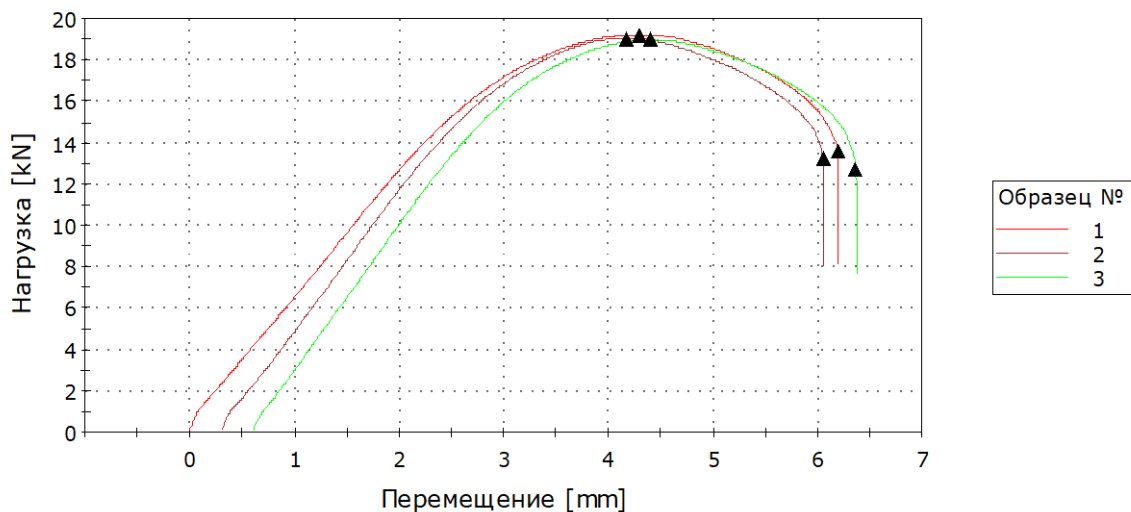


Рис. 3.6. Зависимость «нагрузка-перемещение» самонарезающих нагелей WS-7мм

Результаты испытаний образцов самонарезающих нагелей при растяжении приведены в таблице 3.5 и 3.6.

Таблица 3.5. Результаты определения параметров самонарезающих нагелей (временное сопротивление, предел текучести; МПа)

	Максимальная нагрузка [кН]	Временное сопротивление [МПа]	Предел текучести [МПа]	Относительное удлинение [%]	Площадь [мм <sup>2</sup> ]
1	19,23	653,67	591,56	3,80	29,4
2	19,05	633,01	568,76	3,75	30,1
3	18,97	655,42	575,39	5,04	28,9
Среднее	19,08	647,37	578,57	4,20	29,5

Таблица 3.6. Результаты определения параметров самонарезающих нагелей (модуль упругости; МПа)

	Метка образца	Модуль (По выделенному участку аппроксимированный - Курсор) [МПа]	Диаметр [мм]	Длина [мм]
1	1	34489,17	6,12	163,00
2	2	35210,41	6,19	153,00
3	3	27828,86	6,07	114,00
Среднее		32509,48	6,13	143,33

По значениям, полученным в ходе испытания, были определены средние значения, получена зависимость «нагрузка-перемещение» по определению предела текучести самонарезающих нагелей на растяжение, которая приведена на рисунке 3.6. Согласно этой зависимости видно, что средняя максимальная нагрузка 18,7 кН соответствует перемещению 4,3 мм. Данные средние значения были использованы для расчетов и идентификации материалов в программе ANSYS 18.2

### **3.2. Определение фактической несущей способности для различных схем узловых соединений конструкций из ЛВЛ с несколькими стальными пластинами на сжатие.**

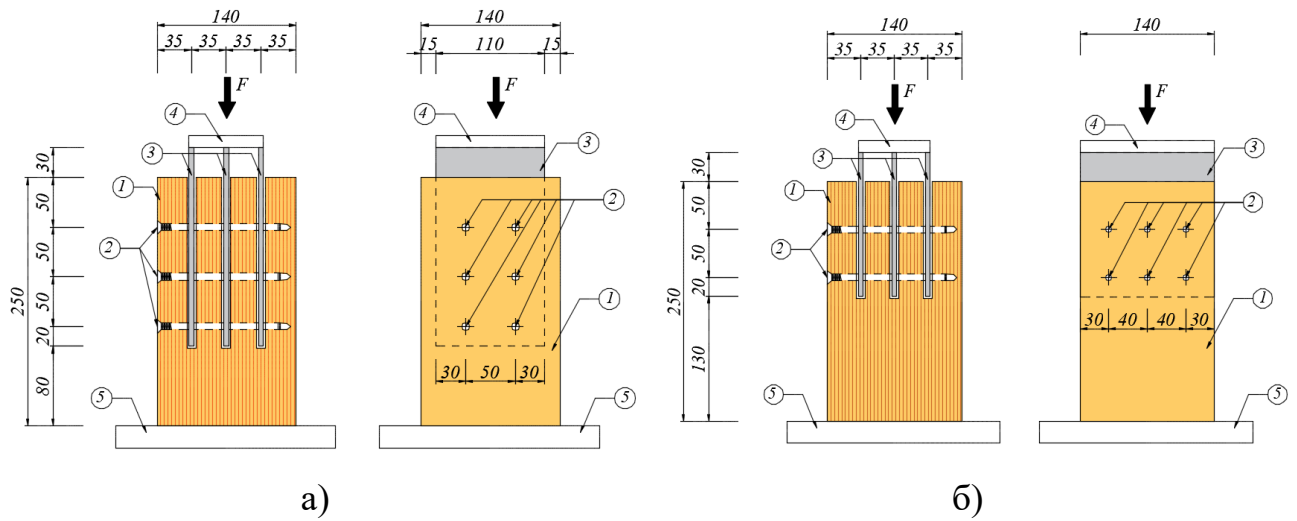
Целью исследования узловых соединений деревянных конструкций из ЛВЛ с применением цилиндрических нагелей и стальных пластин при действии кратковременной нагрузки является: изучение действительной картины напряженно-деформированного состояния соединения в зависимости от параметров соединения; определение угла  $\alpha$  при деформации нагелей на изгиб в соединениях; сравнение несущей способности с различным расположением нагелей в структуре соединений.

Для проведения эксперимента разработана методика и порядок проведения эксперимента с соблюдением правил безопасной работы на оборудовании большой грузоподъемности [45, 47, 64].

### 3.2.1. Методика и схемы испытаний.

Размеры образцов деревянных конструкций из ЛВЛ 140x140x300мм для схем С04, С05 (см. рис. 3.7) выбраны с учетом доступности для испытаний на имеющемся в лаборатории оборудовании. В схеме С04 для стальных пластин размеры пропиленных пазов на конструкции ЛВЛ составляют 6x185 мм и с тремя рядами цилиндрических нагелей. В схеме С05 размеры пазов 6x125 мм и два ряда цилиндрических нагелей (гвозди). Количество нагелей в двух схемах одинаковое. Испытания направлены на определение несущей способности соединения деревянных конструкций из ЛВЛ с цилиндрическими нагелями (проволочные гвозди диаметром 6 мм длиной 200 мм, материал Сталь С245, значение предела текучести гвозди (см. п 3.1).





- |                                |                      |
|--------------------------------|----------------------|
| 1. Деревянный образец (ЛВЛ)    | 3. Стальные пластины |
| 2. Самонарезающие нагели (7мм) | 4. Стальная накладка |

Рис. 3.7. Схемы проведения испытаний соединений: а) для трех рядов нагелей;  
б) для двух рядов нагелей

На рисунке 3.8 показан образец, установленный для испытания нагельного соединения, путём продавливания пластин внутрь ЛВЛ (сжатие). Для измерения перемещения пластин относительно ЛВЛ установлены пять тензорезисторных датчиков на поверхности деревянных конструкций ЛВЛ.



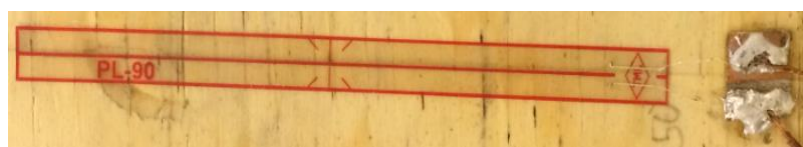
а) С-04



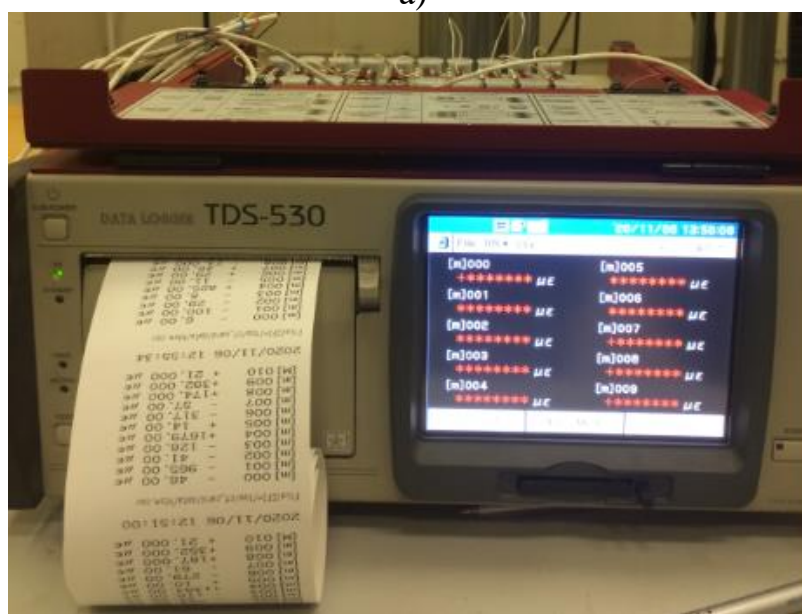
б) С-05

Рис. 3.8. Расположение тензодатчиков на элементах деревянных конструкций при испытании соединений на продавливание пластин (сжатие)

Относительные деформации измеряли тензорезистором PL-90-11 (номинальное сопротивление и коэффициент тензочувствительности тензодатчиков составляли  $R = 120 \text{ Ом}$ ,  $\gamma = 2.15$  соответственно) с ценой деления 0,01 мм. Продольные деформации элементов измеряли тензодатчиками с длиной 90 мм, в соответствии со стандартной методикой, с применением многоканальной микропроцессорной тензометрической системы ММТС-64.01 (см. рис. 3.9) [17].



а)



б)

Рис. 3.9. Датчики относительной деформации на деревянных конструкциях: а) тензорезистор PL-90-11 на конструкции ЛВЛ; б) измерительно-вычислительный комплекс (ИВК) Tokyo Sokki Kenkyujo Co.

С помощью формулы 3.1 сопротивление, измеренное датчиком, преобразуется в относительную деформацию деревянной конструкции:

$$\varepsilon = \frac{\Delta R}{R \cdot k \cdot \Phi} \quad (3.1)$$

где:  $\Delta R$  - изменение сопротивления датчика;

$k$  - коэффициент чувствительности проволоки  $k = 2,15$ );

$R$  - омическое сопротивление датчика.

Нагружение образцов соединения проводилось по схеме, приведенной на рис 3.10 в следующей последовательности в соответствии с [13, 14, 16, 18]

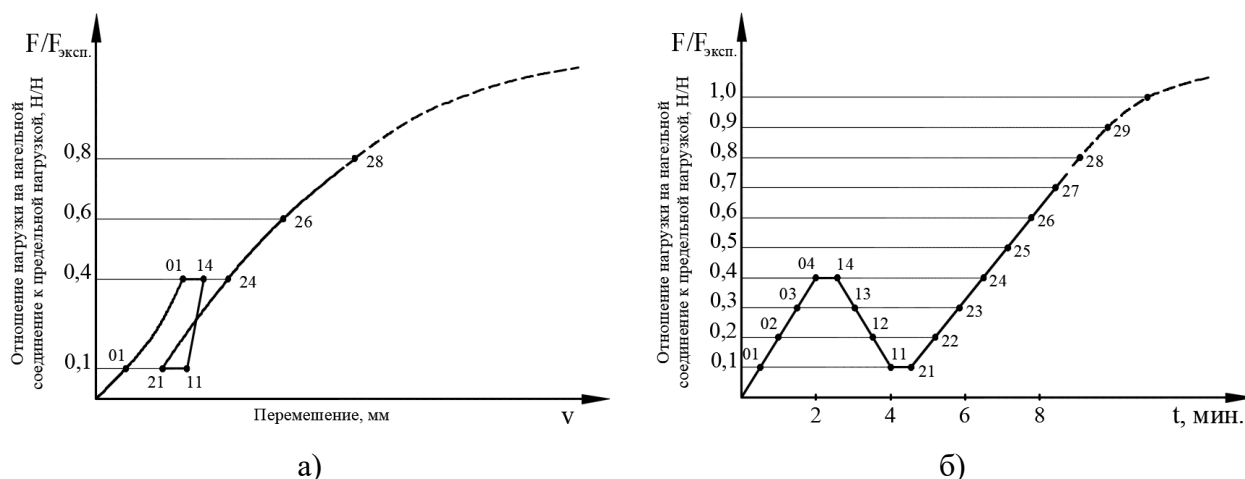


Рис. 3.10. а) зависимость «нагрузка - перемещение»; б) режимы нагружения

Вначале устанавливается нагрузка 40% от  $F_{\max}$ . Эта нагрузка выдерживается в течение 30 секунд, после чего нагрузка уменьшается до 10% в течение 30 секунд. Затем нагрузка увеличивается до 70% от контролируемого усилия, после чего испытание будет продолжено при контролируемом смещении до тех пор, пока испытуемый образец не выйдет из строя (разрушение соединения). При применении этой схемы загрузки соединение должно выйти из строя в течение 10-15 минут. [83, 90]

### 3.2.2. Последовательность проведения опытов. Результаты эксперимента

Для исследований образцов ЛВЛ при сжатии использовалась универсальная испытательная машина INSTRON 5989 с максимальной нагрузкой до 600 кН, которая находится в лаборатории механических испытаний

строительных материалов и конструкций. Температура в лаборатории во время испытаний –  $22 \pm 1$  °С, относительная влажность –  $63 \pm 10\%$ ).

Первый образец каждой схемы испытывался при сжатии с простым режимом нагружения (значение линейной силы относительно времени) для определения значения максимальной нагрузки. Затем проводилось нагружение последующих образцов в соответствии с пунктом 3.2.2. Результатом испытания (рис. 3.10 для схемы С04 и Схемы С05) являются графики зависимостей «нагрузка - перемещение» на сжатие пластин в соединении

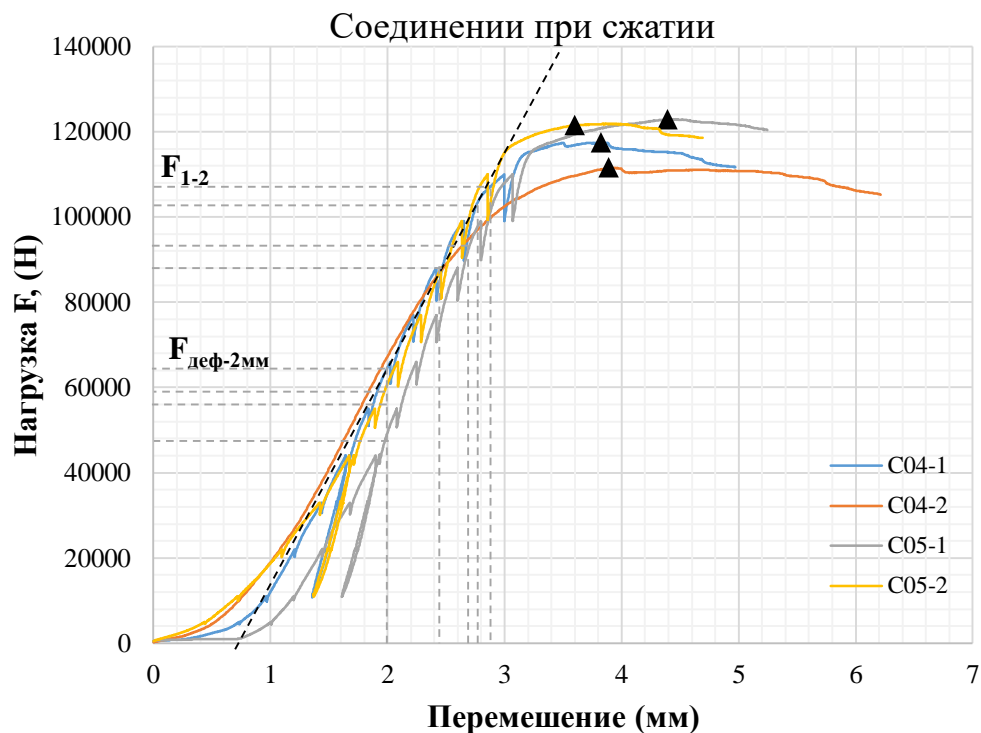


Рис. 3.11. Зависимость «нагрузка – перемещение» соединений «сталь-дерево» при сжатии.

Значения нагрузки в схеме С05 оказались выше, чем в схеме С04 зависимости от расположения, количества, несущей способности нагелей в каждом ряду в соединения см. таблицу 3.7.

Табл. 3.7. Экспериментальные результаты определения несущей способности соединения при сжатии.

Наименование параметра	Для Схемы С04			Для Схемы С05		
	$F_{1-2}$ , кН	$F_{деф-2мм}$ , кН	$F_{max}$ , кН	$F_{1-2}$ , кН	$F_{деф-2мм}$ , кН	$F_{max}$ , кН

образец 1	91,12	53,11	117,46	105,37	58,79	122,89
образец 2	101,08	48,51	111,62	118,65	66,92	121,88
Сходимость результатов, % ( $F_{1-2} - F_{\text{деф-2мм}}$ )/ $F_{1-2}$	47,13%			43,88%		

где  $F_{\text{max}}$  – максимальная несущая способность соединения при растяжении.

$F_{1-2}$  – несущая способность соединения в зоне упругости;

$F_{\text{деф-2мм}}$  – несущая способность соединения до предельного смещение 2мм

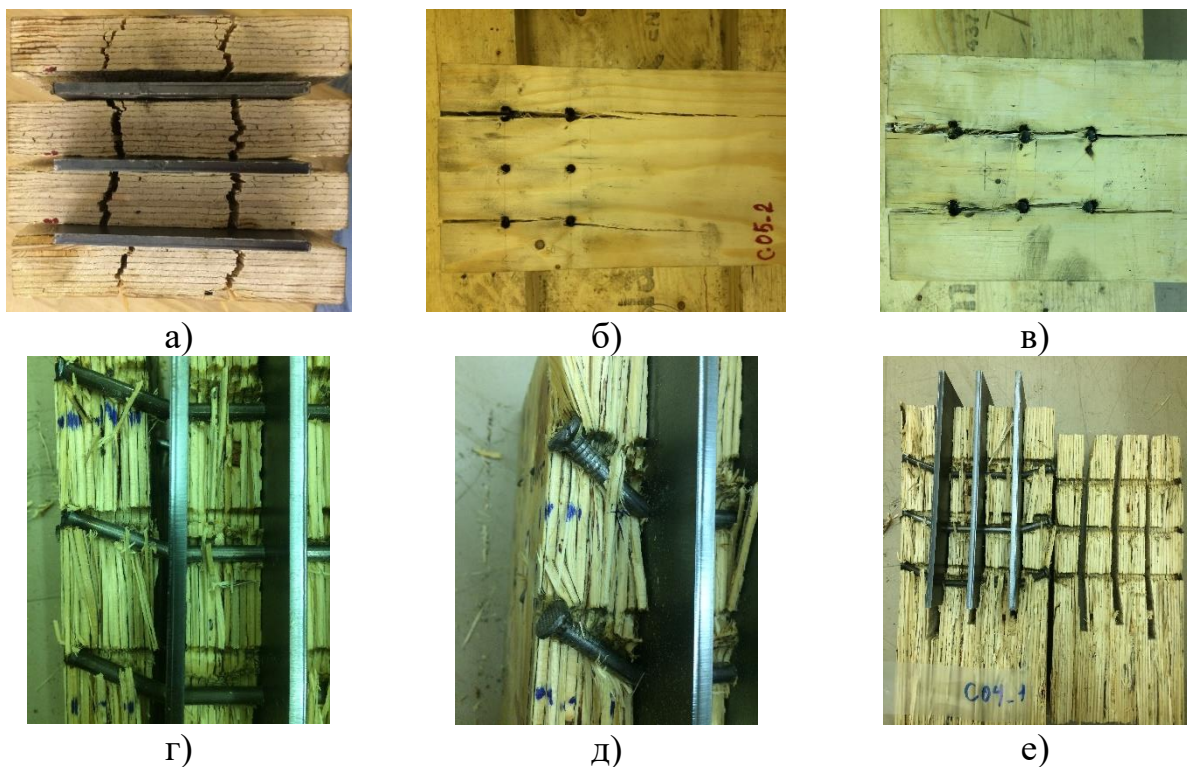


Рис. 3.12. Виды разрушения соединения при сжатии: а,б,в)

скалывание ЛВЛ; г, д, е) изгиб нагеля

При анализе полученных результатов, можно заметить разные величины смятия ЛВЛ в соединении, при неодинаковом количестве нагелей в ряду, для случая сжатия вдоль направления волокон (рисунок 3.12).

По графику (Рис. 3.11) «нагрузка-перемещение», в точке пересечения касательной с верхней границей области упругих деформаций, определены значения несущей способности соединения в зоне упругости. ( $F_{1-2} = 96,1$  кН для

схемы С04;  $F_{1-2} = 112,01$  кН для схемы С05). По результатам видно, что несущая способность соединений до предельного смещения по СП64.13330.2011 ( $F_{\text{деф-2мм}} = 50,81$  кН для схемы С04;  $F_{\text{деф-2мм}} = 62,94$  кН для схемы С05) для схемы С05 выше чем для схемы С04. Это подтверждает влияние просверленных отверстий в стальных пластинах на величину деформаций в соединении.

Разрушение образцов наступало с исчерпанием нагрузки, а смещение все ещё увеличивалось во времени. На рисунке 3.12 видно, что происходит одновременное разрушение структуры дерева (а, б, в) и изгиб (увеличение угла изгиба) нагеля (г, д, е). Элементы конструкций из ЛВЛ в соединении скалываются вдоль волокон и имеют тенденцию раскалывать ряд при росте нагрузки, так же как происходит скалывание блока в хрупкой теории разрушения (см. п. 2.2)

### **3.3. Определение фактической несущей способности для различных схем узловых соединений конструкций из ЛВЛ с несколькими стальными пластинами и гвоздевыми нагелями на растяжение**

Основной задачей эксперимента было определение несущей способности и изучение напряженно-деформируемого состояния соединения вплоть до разрушения. При этом необходимо было изучить характер разрушения соединения при растяжении, построить зависимости «нагрузка-перемещение» сравнить несущую способность на границе упругой и пластической областей деформаций при разных схемах расстановки пластин

На основе теоретического анализа, приняты различные схемы соединения в зависимости от факторов, влияющих на несущую способность: количество нагелей, расположение, размер и толщина стальных пластин. Для исследования используются стальные пластины различных размеров для перераспределения напряжений в деревянной конструкции из ЛВЛ [14].



### 3.3.1. Методика и схемы испытаний

Выбрано три схемы соединения с различными стальными пластинами: С-01 ( $^{140}140^{140}$ ); С-02 ( $^{140}175^{140}$ ); С-03 ( $^{175}140^{175}$ ). Числа в скобках ( $^{140}140^{140}$ ) – глубина заделки стальных пластин в деревянную деталь.

На Рис. 3.13-3.16 представлены, разработанные автором, схемы испытаний соединений деревянных конструкций из ЛВЛ сталь-дерево на растяжение. На схемах обозначены все размеры образцов, показано расположение тензодатчиков. Расстояния для расстановки нагелей были выбраны согласно СП 64 13330 2017, данные испытаний сведены в таблице 3.8 и 3.9.

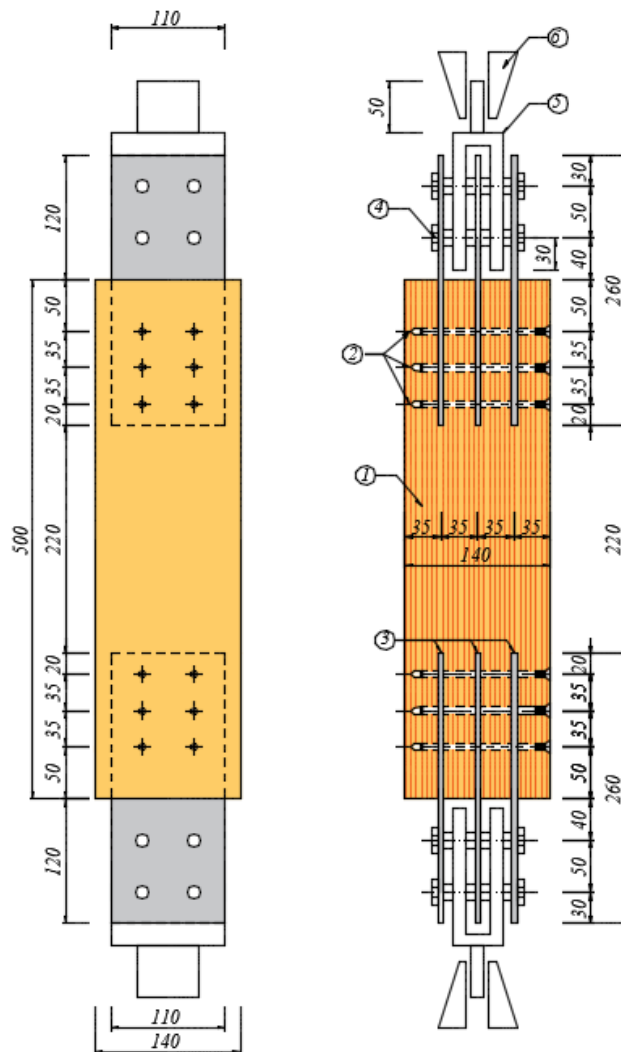


Рис. 3.13. Схема испытания соединения на растяжение для схемы С-01

1. Деревянный образец (ЛВЛ)

4. Стальная накладка

- |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|
| 2. Самонарезающие нагели (7мм) | 5. Захват                      |
| 3. Стальные пластины           | 6. Захватное устройство машины |

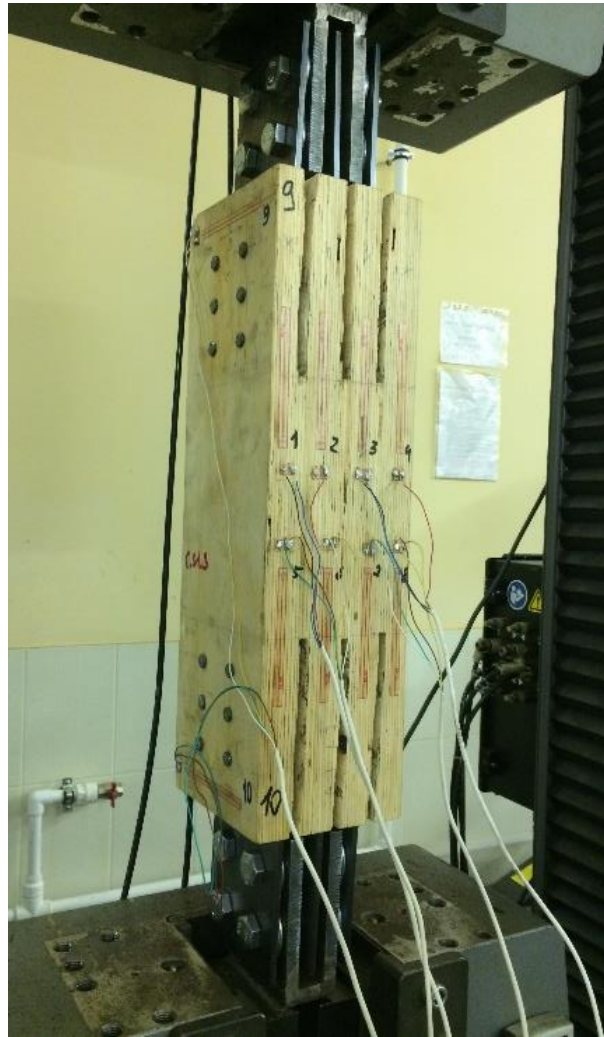


Рис. 3.14. Расположение тензодатчиков на элементах деревянных конструкций С-01 при испытании на растяжение.



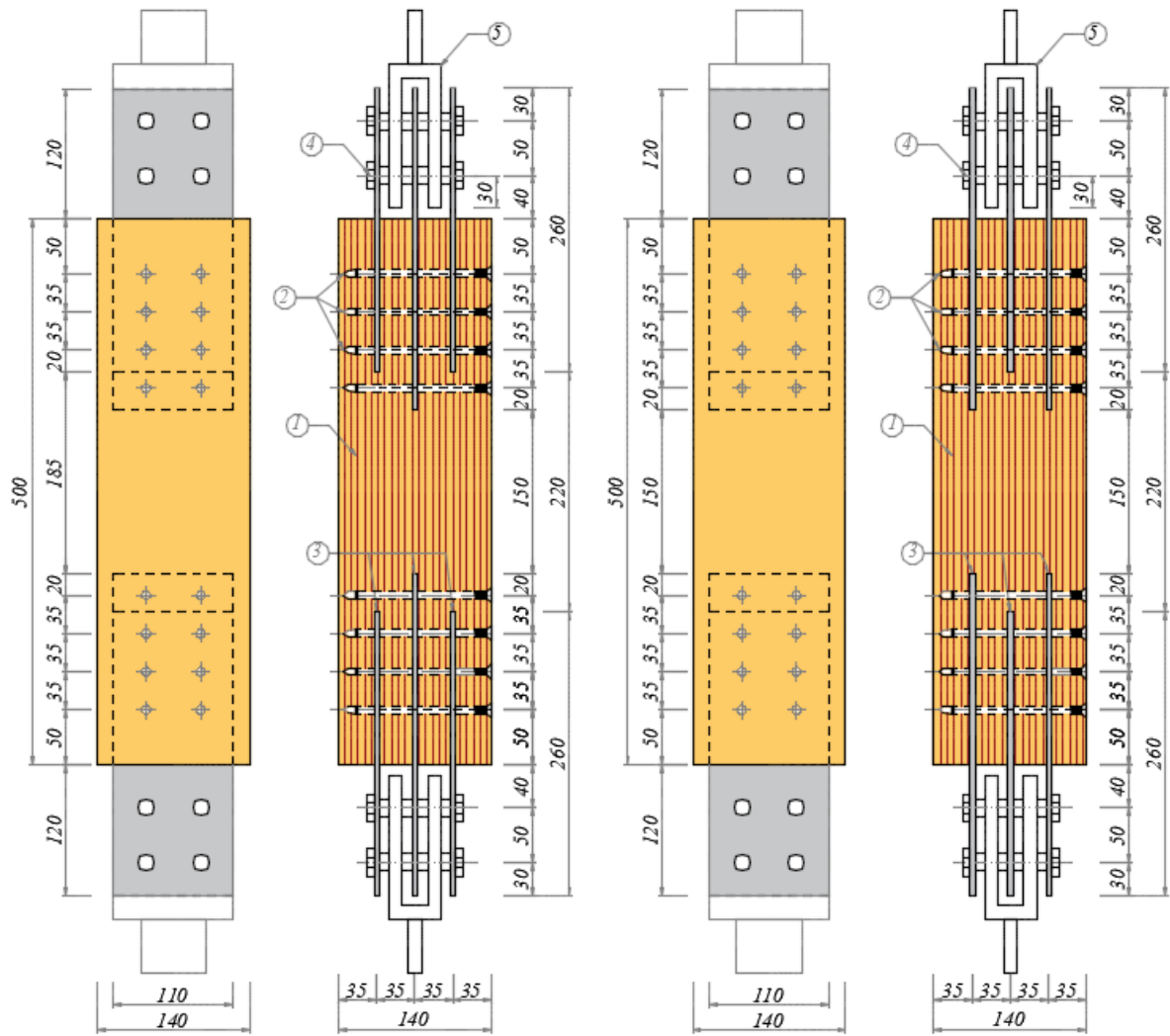


Рис. 3.15. Схема испытания соединений «сталь-дерево» на растяжение:  
геометрические параметры соединений

Схема С-02

Схема С-03

1. Деревянный образец (ЛВЛ)
2. Самонарезающие нагели (7мм)
3. Стальные пластины

4. Стальная накладка
5. Захват

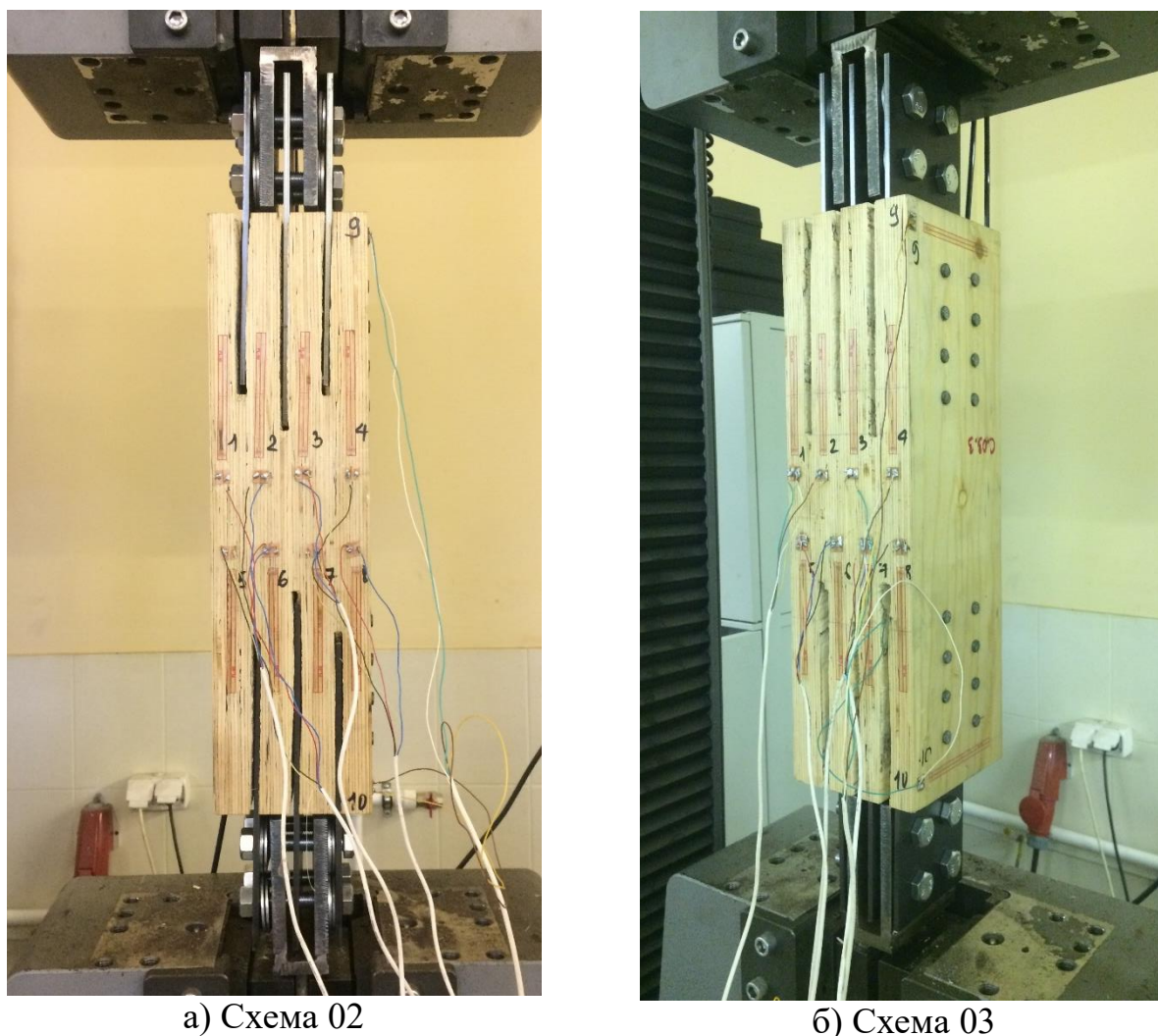


Рис. 3.16. Расположение тензодатчиков на элементах деревянных конструкций при испытании соединения на растяжение

Испытания проводились в СПбГАСУ в лаборатории механических испытаний строительных материалов и конструкций, с целью получения запланированных экспериментальных результатов и рассмотрения механизмов разрушения элементов соединения, я. Для исследований образцов конструкций из ЛВЛ при растяжении использовалась универсальная испытательная машина INSTRON 5989 с максимальной нагрузкой до 600 кН. Плотность образцов из ЛВЛ составила  $560 \text{ (кг/м}^3\text{)}$  [22]. Температура в лаборатории во время испытаний –  $22 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ , относительная влажность –  $63 \pm 10\%$ ). Режим нагружения образцов такой же, как и в разделе 3.2.2.

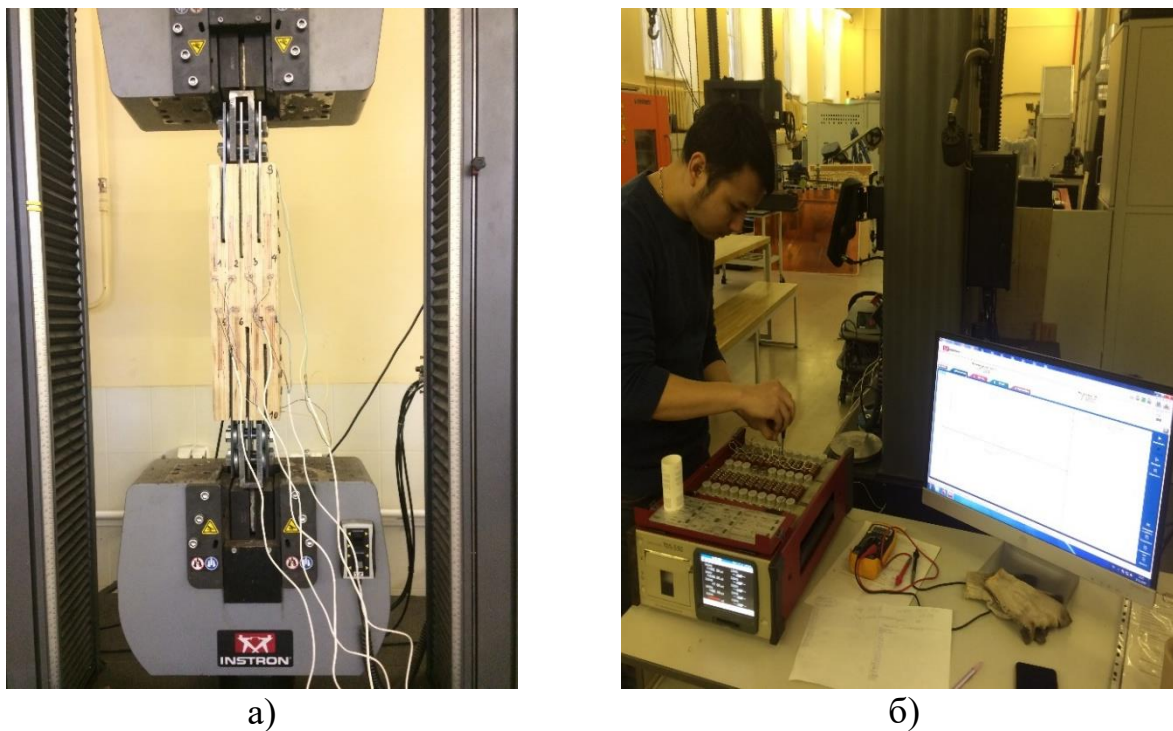


Рис. 3.17. Образец перед испытанием. а) Экспериментальная машина INSTRON 5989; б) измерительно-вычислительный комплекс с тензорезисторными датчиками (ИБК) Tokyo Sokki Kenkyujo Co;

Испытание образцов соединений схемы С-01 провели по режиму нагружения согласно п.3.2.2. В результате получена зависимость «нагрузка – перемещение», см. рисунок. 3.18.

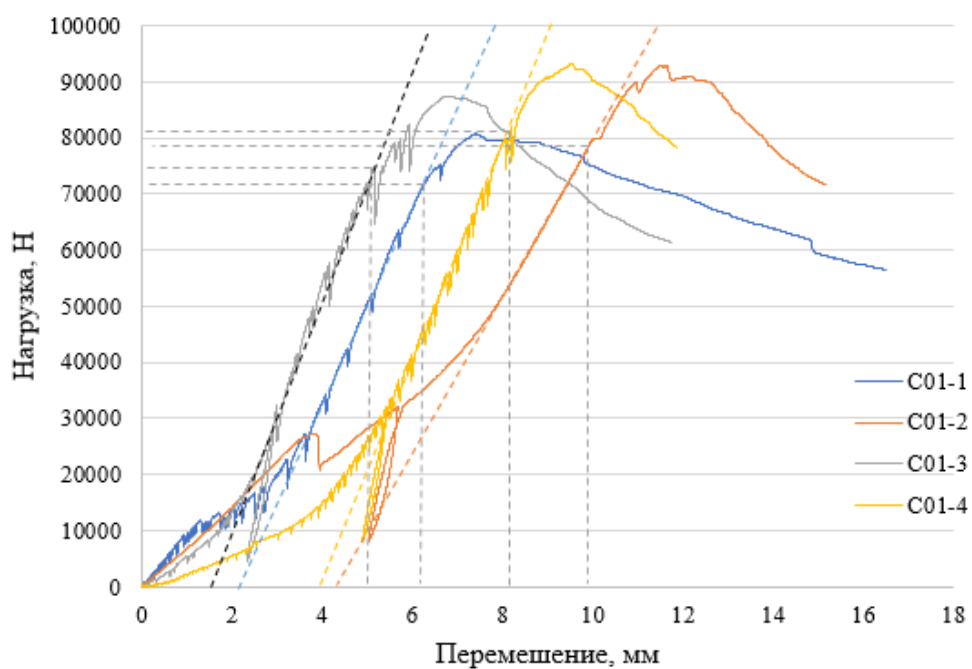


Рис. 3.18. Зависимость «нагрузка – перемещение» при растяжении соединений «сталь-дерево» схемы - 01

Экспериментальные результаты образцов соединений для каждой схемы имеет отклонение по сравнению другими схемами нагельных соединений. Для оценки достоверности результатов испытаний испытывалось четыре образца, определялись средние значения несущей способности, стандартное отклонение, коэффициент вариации по формулам (3.5; 3.6) Опытные данные в соответствии с требованиями [80], представлены в таблице. 3.8 и 3.9. Для выполнения расчётов и обработки результатов наблюдений использовалась программа Microsoft Excel.

Стандартное отклонение просчитано при значении выходных параметров

$$\text{по формуле } s = \sqrt{\frac{\sum_i (y - y_{cp})^2}{(n-1)}} \quad (3.5)$$

Коэффициент вариации рассчитан для выходных параметров нагрузки и перемещения по формуле  $u = \frac{s}{y_{cp}} (\%)$ , (3.6)

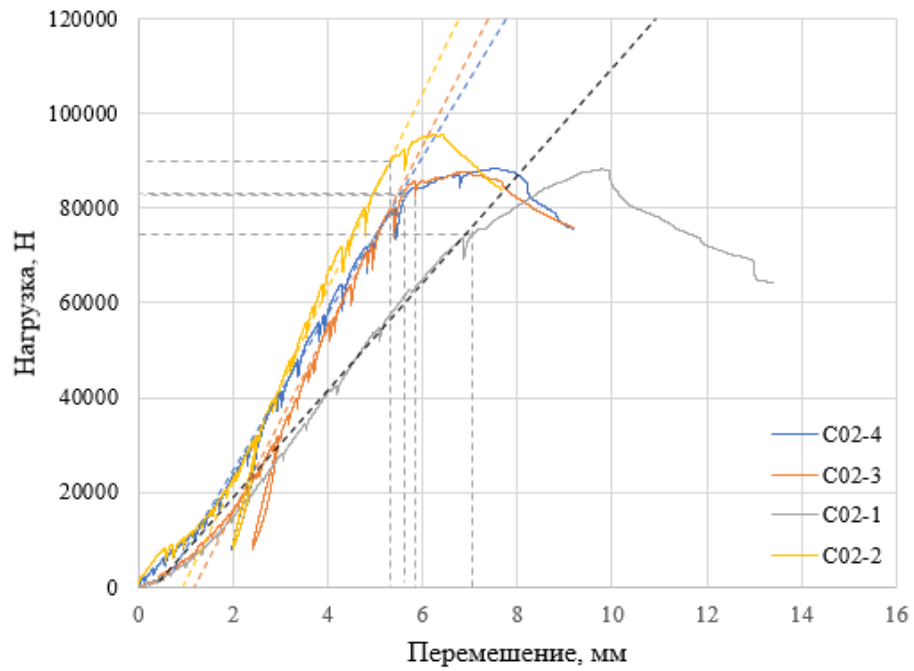
где  $n$  – объём выборки по каждой схеме соединения.

Табл. 3.8. Экспериментальные значения несущей способности нагельных соединений с тремя стальными пластинами (Схема – 01)

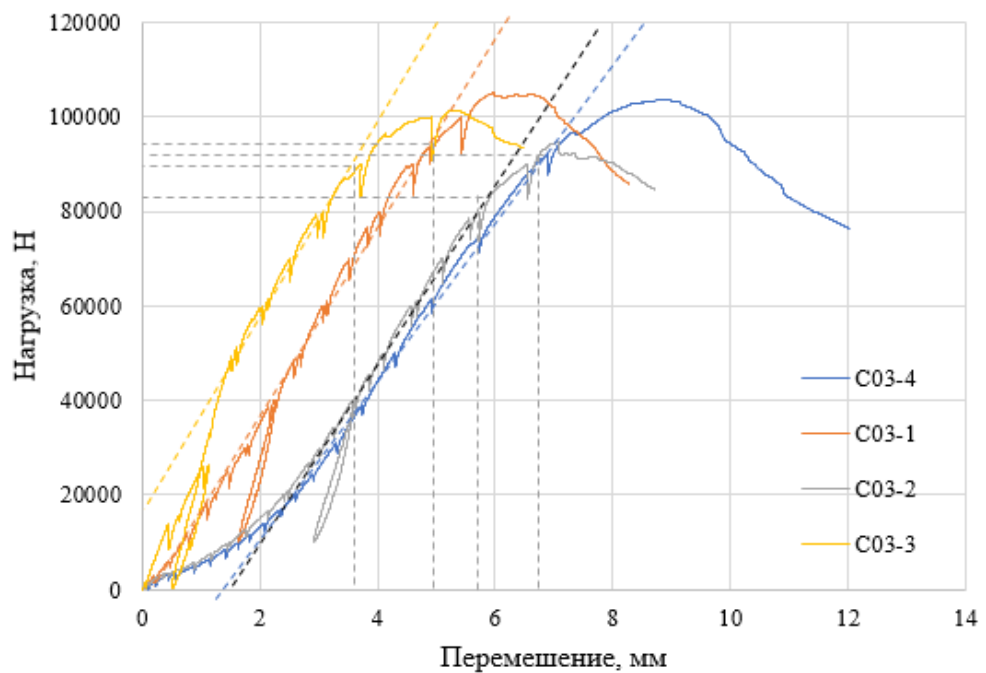
№ опыта	Обозначение выходных параметров	Несущая способность, (кН, мм, кН)				Среднее уср (кН, мм, кН)	Стандартное отклонение s(кН, мм, кН)	Коэфф. вариации u, (%)
		1 (y1)	2 (y2)	3 (y3)	4 (y4)	уср	S	u
Схема С-01	$F_{12}, \text{кН}$	74.47	79.57	75.02	81.51	77.64	3.45	4.44%
	$U_{I-2}, \text{мм}$	6.49	9.98	5.16	8.18	7.45	2.09	28.04%
	$F_{max}, \text{кН}$	80.76	92.95	87.52	93.3	88.63	5.88	6.63%

Примечания:  $F_{1-2}$  – несущая способность соединения в зоне упругости;  $U_{1-2}$  – значение смещения соответствует значению нагрузки  $F_{1-2}$ ;  $F_{\max}$  – максимальная несущая способность соединения при растяжении.

Графики зависимости «нагрузка-перемещение» при растяжении соединений С-02 и С-03 приведены на рисунке 3.19.а и 3.19 б



а)



б)

Рис. 3.19. Зависимость «нагрузка – перемещение» при растяжении соединений «сталь-дерево»: а) схемы С – 02; б) схемы С– 03

Определение верхней границы упругих деформаций, перемещений и максимальной нагрузки ( $F_{1-2}$  и  $U_{1-2}$ ) производилось графоаналитическим методом. На диаграмме (рис. 3.19) зависимости перемещений от нагрузки, точка окончания прямолинейной части графика определялась построением касательных линий. Таким образом, были получены значения  $F_{1-2}$  и  $U_{1-2}$  для каждого образца (см. табл. 3.8 и 3.9).

Экспериментальные значения несущей способности нагельных соединений при растяжении приведены в таблице 3.9.

Табл. 3.9. Экспериментальные значения несущей способности нагельных соединений для схемы С-02 и С-03

№ опыта	Обозначение выходных параметров	Несущая способность, (кН, мм, кН)				Среднее уср (кН, мм, кН)	Стандартное отклонение s(кН, мм, кН)	Кoeff вариации u, (%)
		1 (y1)	2 (y2)	3 (y3)	4 (y4)			
Схема С-02	$F_{I-2}, кН$	75.87	90.27	84.12	84.34	83.65	5.92	7.07%
	$U_{I-2}, мм$	7.35	5.35	5.64	5.9	6.06	0.89	14.67%
	$F_{max}, кН$	88.27	95.76	87.84	88.5	90.09	3.79	4.20%
Схема С-03	$F_{I-2}, кН$	98.6	83.62	94.02	96.32	93.14	6.62	7.10%
	$U_{I-2}, мм$	4.81	5.44	3.46	6.77	5.12	1.38	26.87%
	$F_{max}, кН$	105.17	94.69	101.48	103.67	101.25	4.63	4.57%

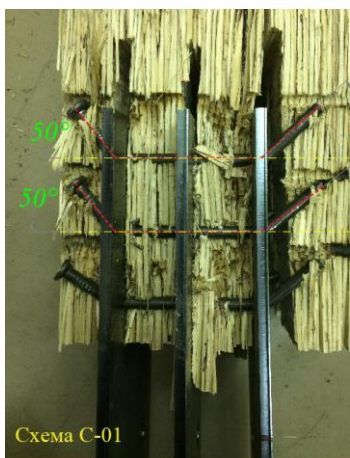
Значения символов в таблице 3.9 объяснены по таблице 3.8.



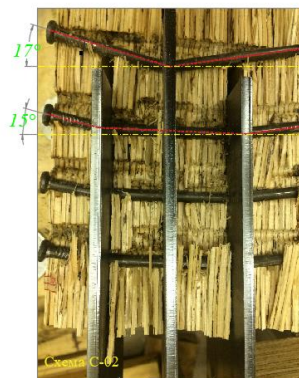
С добавлением одного ряда нагелей в соединении (от 6 нагелей в схеме С-01 до 8 нагелей на схемах С-02 и С-03) несущая способность увеличивается, но не пропорционально количеству нагелей, так как равняется сумме распределенных нагрузок на рабочие поверхности поперечных сечений. В схемах С-02, С-03 рассредоточенное расположение пластин способствует изменению несущей способности и жесткости соединения на линейном участке упругости ( $F_{1-2}$ ). Для схемы С-03 несущая способность ( $F_{1-2} = 93,14$  кН) больше, чем несущая способность в схеме С-02 ( $F_{1-2} = 83,65$  кН), а деформация ( $U_{1-2} = 5,12$  мм) в схеме С-03 меньше, чем в схеме С-02 ( $U_{1-2} = 6,06$  мм).

Кроме того, экспериментальные результаты также показывают, что положение нагелей в соединении оказывает влияние на механизм разрушения деревянных конструкций. Как показано на рисунке 3.20, все разрушения произошли в виде скалывания вдоль ряда нагелей.

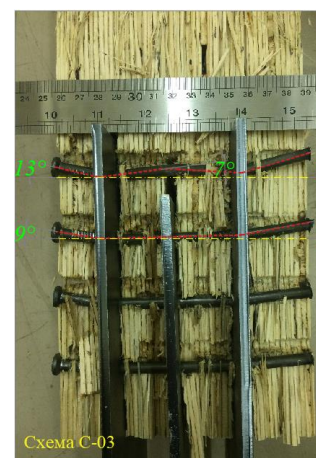
Характер разрушения – изгиб нагеля преимущественно наблюдается на внешней части деревянной конструкции ЛВЛ. В месте контакта поверхности отверстия в деревянной конструкции ЛВЛ с цилиндрическими нагелями, распределяемая нагрузка от нагелей приводит к разрушению ЛВЛ при смятии. При увеличении напряжения, наблюдается реализация модели скалывания с разрушением рядов (см. рис. 3.20).



а)



б)



в)

Рис. 3.20. Виды разрушения сталь-дерево при растяжении: а, б, в) стальные нагели на изгибе

Это можно объяснить тем, что в случае соединения с рассредоточенным расположением пластин, режимы работы нагелей изменяются, в результате происходит перераспределение нагрузки на рабочие поверхности поперечных сечений. Это решение увеличивает несущую способность соединения за счет уменьшения действия механизмов разрушения деревянных конструкций.

Значения расчетной несущей способности нагельных соединений, полученных по российским нормативам ( $T_{сп}$ ), Европейским нормам ( $F_u$ ), Педерсена методикам ( $F_w$ ), и экспериментальные данные ( $F_{1-2}$ ) приведены в таблице 3.10.

Табл. 3.10. Расчетные и экспериментальные значения несущей способности соединений

№ опыта	Параметры соединения		$F_{1-2}$ (кН) (Эксперимент)	$T_{сп}$ (кН) (СП64-13330)	$F_u$ (кН) (Еврокод 05)	$F_w$ (кН) (Педерсен)
	Размеры пластин в схеме, мм	Количество нагелей, шт				
Схема 1	<sup>140</sup> 140 <sup>140</sup>	6	77.64	29.75	48.45	51.18
Схема 2	<sup>140</sup> 175 <sup>140</sup>	8	83.65	33.25	56.49	62.55
Схема 3	<sup>175</sup> 140 <sup>175</sup>	8	93.14	33.06	59.82	68.24

Для оценки несущей способности соединения по результатам испытаний, определено соотношение между расчетными и экспериментальными результатами, полученные значения для различных методик расчета значительно больше, чем 1,3 [15] – см. табл. 3.11.

Табл. 3.11. Отношение значений фактической несущей способности к расчетным для разных схем соединений

№ опыта	Отношение $F_{1-2} / F_{расчет}$		
	$(F_{1-2} / T_{сп})$	$(F_{1-2} / F_u)$	$(F_{1-2} / F_w)$
Схема 1	2.61	1.60	1.52



Схема 2	2.52	1.48	1.34
Схема 3	2.82	1.56	1.37

$F_{\text{расчет}}$  – Значение несущей способности соединения по различным методикам расчета (СП 64.13330.2017-  $T_{\text{СП}}$ ; Еврокод 05 -  $F_u$  и Педерсен метод -  $F_w$ ).

Графическая интерпретация полученных значений фактической и расчетной несущей способности для разных схем соединений при растяжении представлено на рисунке 3.21.

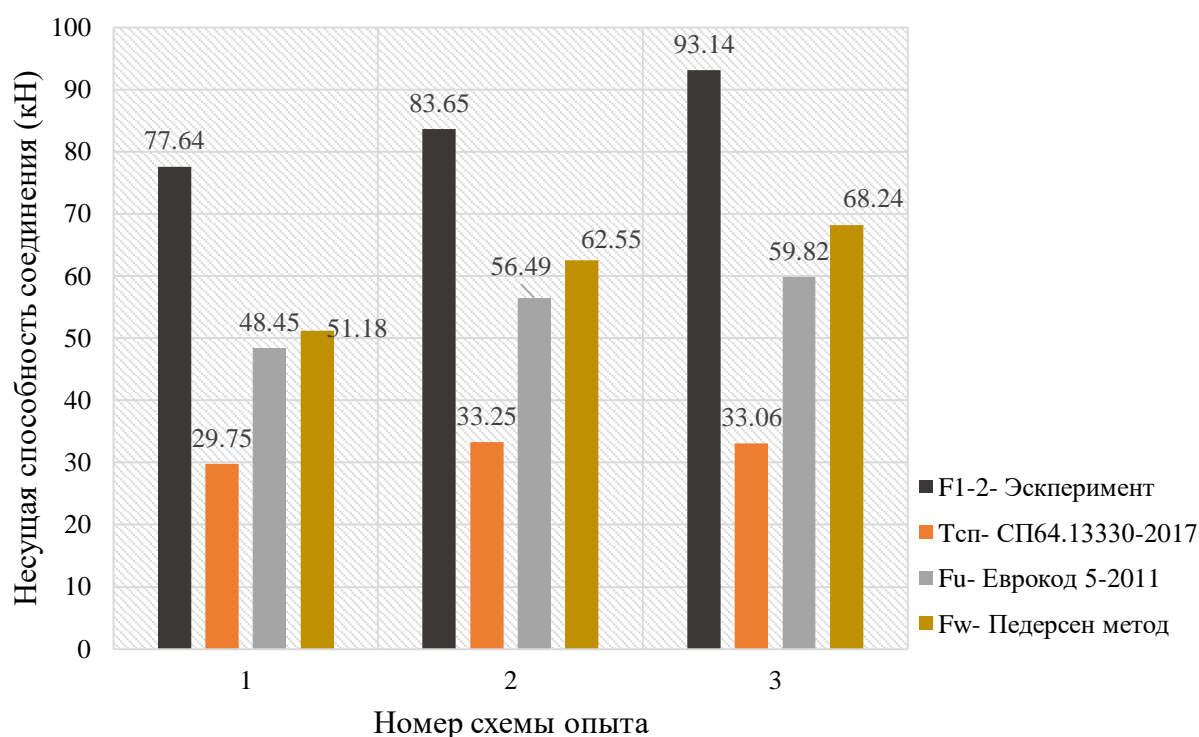


Рис. 3.21. Фактическая и расчетные значения несущей способности соединений «сталь-дерево» при растяжении.

Из табл. 3.10, 3.11 и рис. 3.21. хорошо видно, что прослеживается расхождение результатов между теоретическими и фактическим значениями несущих способностей в зависимости от параметров соединения. В результате наибольшее соотношение между фактической и теоретической несущей способностью получено при использовании методики СП 64.13330.2017. Следовательно, можно сделать вывод о завышенном запасе несущей способности, что требует уточнения расчетных формул для нагельных

соединений с использованием нескольких стальных пластин (соединения «сталь-дерево») в данной методике.

Для экономии образцов при проведении поисковых испытаний соединений "Сталь-ЛВЛ" пластины располагались с обоих торцов образцов. В этой связи, сложно было измерить деформации отдельных элементов соединения и сравнить с предельно допустимыми по второй группе предельных состояний согласно Табл. 17-СП.64.13330.2017. Поэтому несущая способность соединения определялась только по первой группе предельных состояний с целью сравнения расчетных значений, полученных по разным методикам (Еврокод 5, СП.64.13330.2017 и Педерсен метод (шведский Handbook)), с фактическими значениями (экспериментальными), найденными по графику (Рис. 3.21) "нагрузка-перемещение" в точке пересечения касательной с верхней границей области упругих деформаций.

Оценка несущей способности по второй группе предельных состояний в соответствии с СП 64.13330.2017 проведена в п.3.4, когда испытания соединений с самонарезающими нагелями были выполнены при установке пластин с одного торца образцов.

#### **3.4. Влияние количества и схем установки пластин на несущую способность соединения сталь-дерево с самонарезающими нагелями.**

Проведение экспериментальных исследований на втором этапе с похожими конструктивными схемами, обусловлено необходимостью испытания импортных самонарезающих нагелей в соединениях сталь – дерево. Главной отличительной особенностью является, то что предварительно перед сборкой соединения пластины и деревянные элементы конструкции не просверливаются. Благодаря особой конструкции самонарезающего нагеля с твердосплавной насадкой (Рис. 3.22) и специальной дрели с мощным редуктором просверливаются деревянные элементы и металлические пластины

одновременно, не нарушая соосность и перпендикулярность расположения нагеля в гнезде по отношению к продольной оси образца. Таким образом, достигается высокая точность и быстрота сборки при плотной заделке нагеля в пластине и ЛВЛ, практически при нулевом допуске между поверхностью нагеля и просверленным отверстием в стальной пластине.

*Задачей второго этапа экспериментальных исследований является определение при разных конструктивных схемах несущей способности самонарезающего нагельного соединения, а также изучение механизмов разрушения соединений и режимов работы самонарезающих нагелей, а также сравнение результатов с предыдущими теоретическими и экспериментальными исследованиями.*

*Образцы и сборка соединений для испытаний.* Использовано оборудование: электрическая пила Makita UC3041A, Дрель-шуруповерт аккумуляторная для вкручивания самонарезающих нагелей в элементы соединений из ЛВЛ и металлические пластины.

Для обеспечения точного соединения и для наименьшего влияния на результаты испытаний, необходимо было исключить смещение элементов деревянной конструкции ЛВЛ при нагружении. Для этого были применены угловые стальные упоры (толщина 14 мм), закрепленные с помощью двух болтов большого диаметра (20 мм) (Рис 3.22). Это обеспечивает большую прочность закрепления образца, чем возникающее усилие в соединении при испытании. Структура схемы испытания образцов показана на рисунке 3.22.

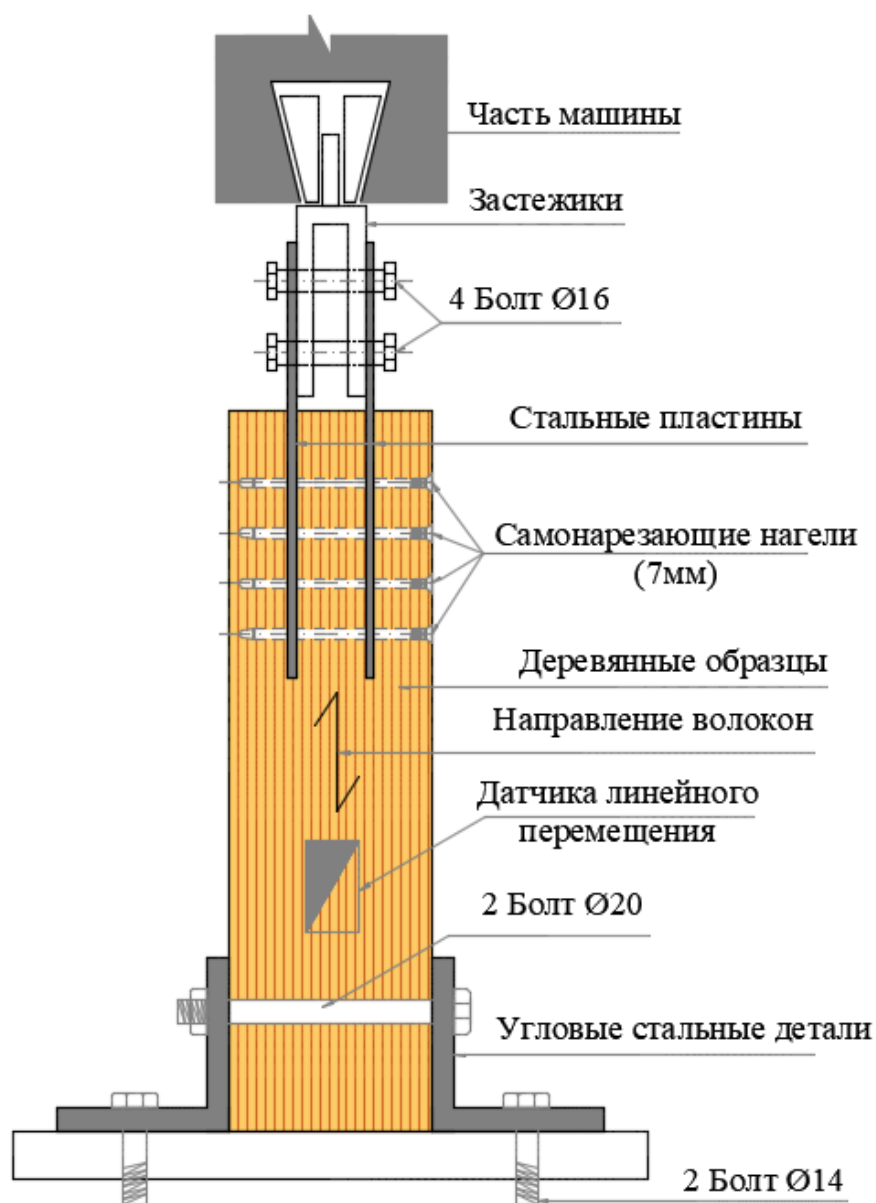


Рис. 3.22. Схема экспериментальной установки испытания опытных образцов соединений «сталь-дерево» с самонарезающими нагелями на растяжение

На втором этапе было испытано пять схем нагельных соединений с применением самонарезающих нагелей при растяжении, в зависимости от количества стальных пластин, и их размеров. Структура, обозначение и размеры каждой схемы показаны на рисунке 3.23.

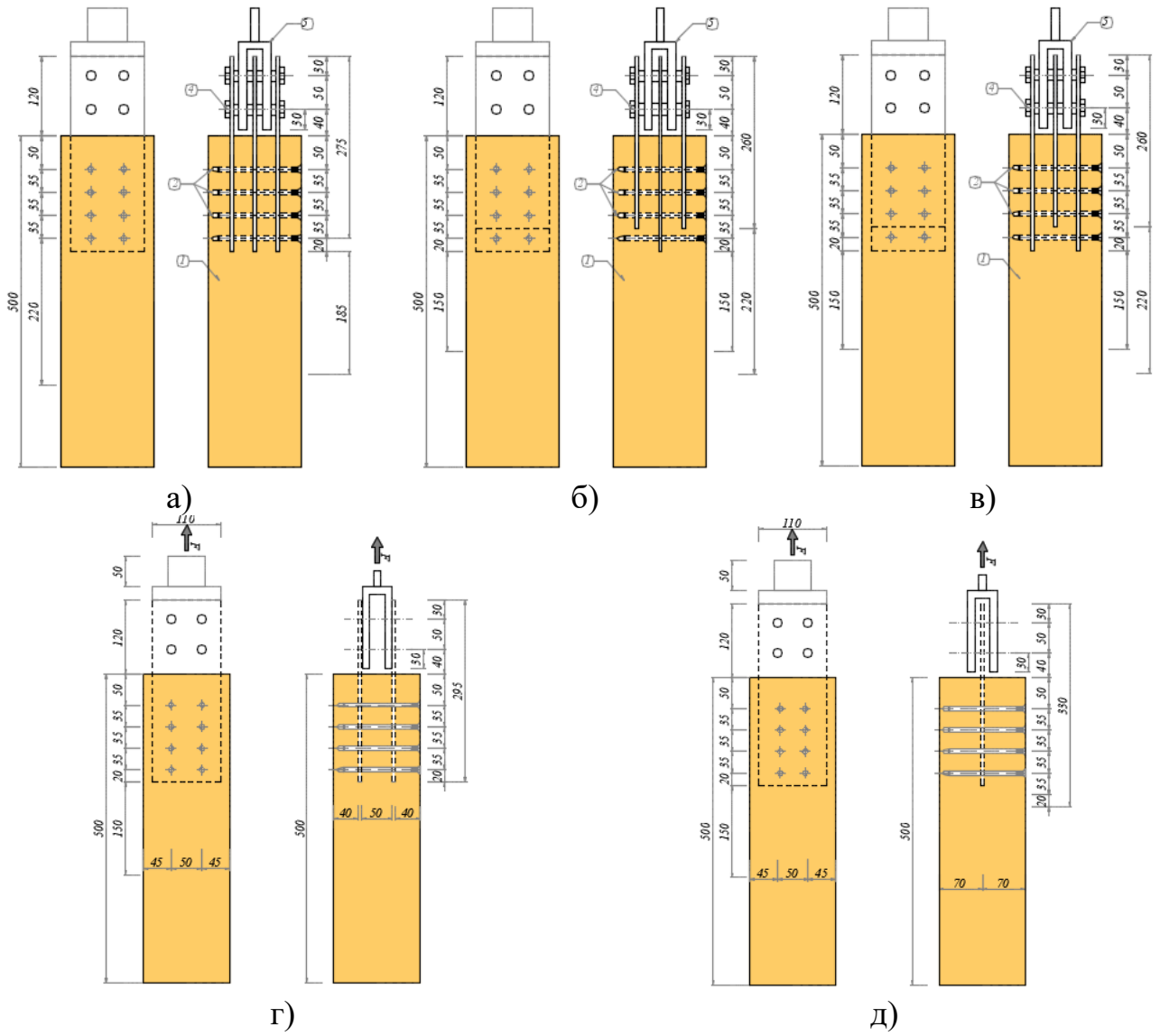


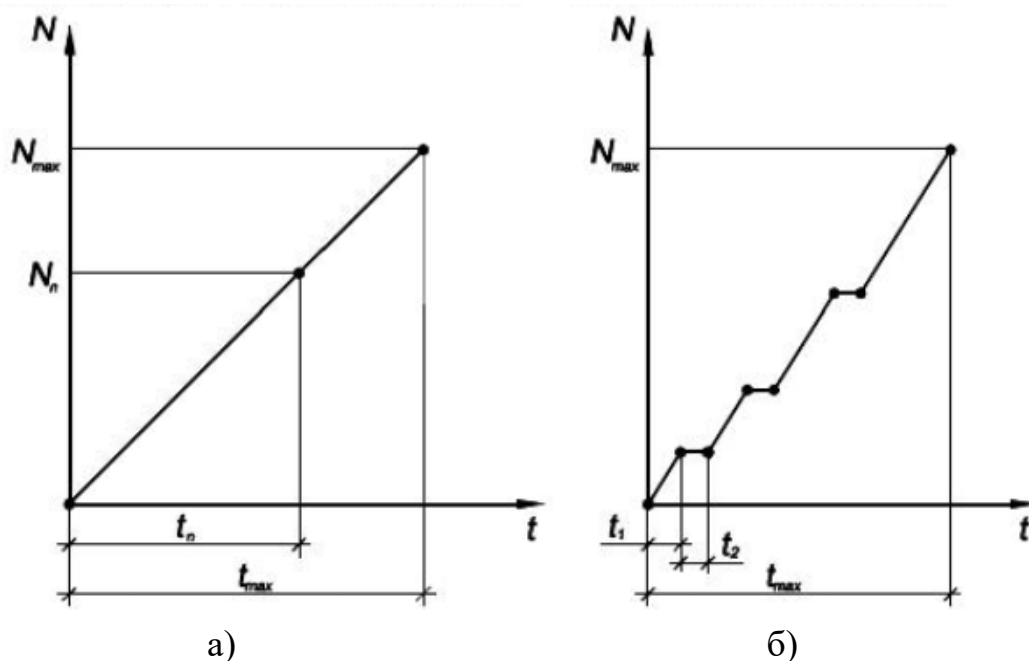
Рис. 3.23. Схемы испытаний: а) схема С01( $^{175}175^{175}$ ); б) схема С02( $^{140}175^{140}$ ); в) схема С03( $^{175}140^{175}$ ); г) схема С04( $175^{175}$ ); д) схема С05(175)



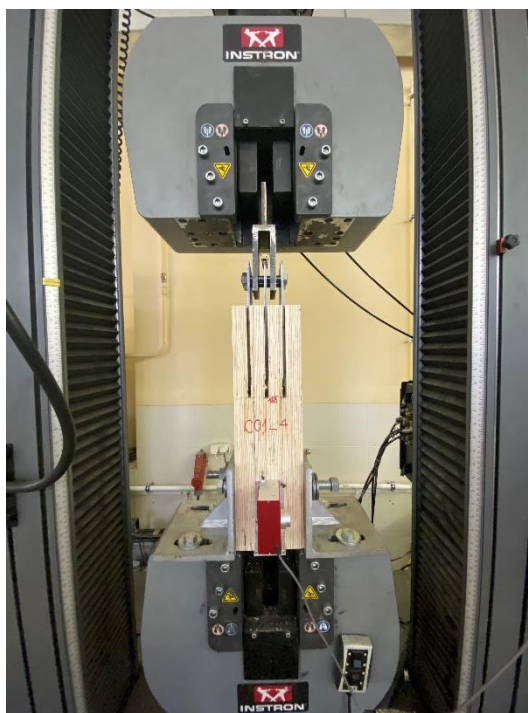
Рис. 3.24. Последовательность сборки образцов соединений конструкций из ЛВЛ с применением самонарезающих нагелей

Испытания проводились в СПбГАСУ в лаборатории механических испытаний строительных материалов и конструкций. Для исследований образцов ЛВЛ при растяжении использовалась универсальная испытательная машина INSTRON 5989 с максимальной нагрузкой до 600 кН. Контролировалось смещение между деревянными конструкциями и стальными пластинами

соединения на каждой ступени нагрузки, с помощью датчика SDP-2000. Значение смещения считывается с компьютера. Режим нагрузки (см. рис. 3.25)



а) автоматизированная запись деформаций; б) ручная запись деформаций



с)

Рис. 3.25. а, б) Диаграмма нагружения образцов  
с) Фактическая экспериментальная схема соединения

Протоколы наблюдений смещения элементов соединений (при растяжении вдоль волокон) при определении максимальной нагрузки в области предела упругих деформаций приведены в приложение Г.

Результаты испытаний образцов при растяжении вдоль волокон приведены в таблице 3.12.

Табл. 3.12. Результаты испытаний соединений с самонарезающими нагелями при растяжении для схем С01; С02; С03

№ п/п	Нагрузка, Н	Смещение, $10^{-2}$ мм						
		образец 1		образец 2		образец 3		среднее
		$U_1$	$\delta_{cp1}$	$U_2$	$\delta_{cp2}$	$U_3$	$\delta_{cp3}$	$\delta_{cp}$
Схема С01 ( $^{175}175^{175}$ )								
1	0	0	-	0	-	0	-	0
2	12000	69	09	75	10	119	05	6
3	24000	134	11	136	17	158	13	14
4	36000	232	31	251	51	352	32	23
5	48000	294	56	379	55	256	54	35
6	60000	350	85	479	78	544	81	60
7	72000	404	152	573	103	699	133	110
8	84000	461	170	672	145	739	182	166
9	88040	611	200	788	200	834	200	200
Схема С02 ( $^{140}175^{140}$ )								
1	0	0	-	0	-	0	-	0
2	14000	116	4	148	11	212	5	10
3	28000	208	19	175	22	261	25	22
4	42000	261	35	235	39	434	34	36
5	56000	411	50	395	55	526	54	53
6	70000	568	80	595	73	655	75	76
7	84000	600	115	645	126	799	113	118
8	98000	722	164	791	184	876	173	174
9	101500	742	200	811	200	902	200	200
Схема С03 ( $^{175}140^{175}$ )								
1	0	0	-	0	-	0	-	0
2	14000	136	9	148	11	132	4	8
3	28000	218	20	229	19	215	15	18
4	42000	438	31	348	30	334	32	31
5	56000	543	46	502	45	456	38	43
6	70000	587	53	597	61	652	60	58
7	84000	709	72	690	84	705	69	77
8	98000	827	131	817	142	803	111	128
9	112650	882	200	833	200	826	200	200

где  $U_i$  - общие перемещения, считываемые с машины

$\delta_{cpi}$  - смещение соединения, измеренное датчиком длины

Зависимость смещения стальных пластин относительно деревянных конструкций из ЛВЛ (вдоль волокон) при изменении нагрузки для схем с тремя стальными пластинами представлена на рисунке 3.26



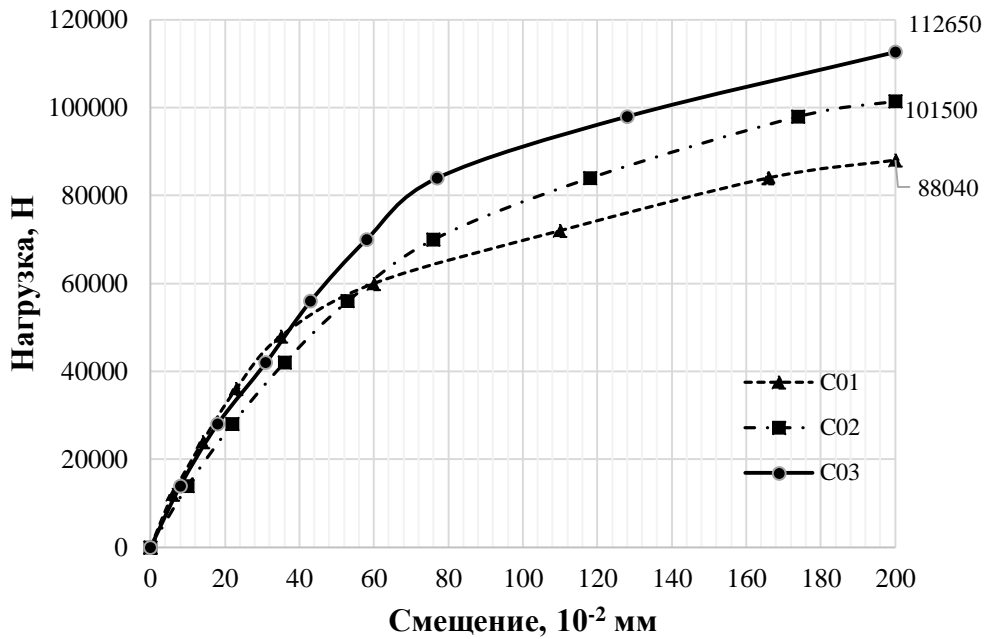


Рис. 3.26. Зависимость «нагрузка – смещение» стальных пластин относительно деревянных конструкций ЛВЛ (вдоль волокон)

Результаты испытаний образцов при растяжении вдоль волокон для схем с разным числом стальных пластин приведены в таблице 3.13.

Табл. 3.13. Результаты испытаний соединений с самонарезающими нагелями при растяжении для схем С-04; С-05.

№ п/п	Нагрузка, Н	Смещение, $10^{-2}$ мм						
		образец 1		образец 2		образец 3		среднее
		$U_1$	$\delta_{cp1}$	$U_2$	$\delta_{cp2}$	$U_3$	$\delta_{cp3}$	$\delta_{cp}$
Схема С-04 (175 <sup>175</sup> )								
1	0	0	-	0	-	0	-	0
2	12000	17	09	9	10	119	15	12
3	24000	134	21	36	27	158	27	25
4	36000	232	35	251	40	352	36	37
5	48000	294	47	379	55	256	54	52
6	60000	350	75	479	82	544	81	76
7	72000	404	127	573	136	699	133	132
8	80000	461	170	672	176	739	182	176
9	84010	611	200	788	200	834	200	200
Схема С-05 (175)								
1	0	0	-	0	-	0	-	0
2	10000	116	4	148	11	212	5	15
3	20000	208	19	175	22	261	25	29
4	30000	261	35	235	39	434	34	44
5	40000	411	50	395	55	526	54	62
6	50000	568	80	595	73	655	75	92

7	60000	600	115	645	126	799	113	138
8	66000	722	164	791	184	876	173	188
9	67300	742	200	811	200	902	200	200

Зависимость смещения стальных пластинах относительно деревянных конструкций из ЛВЛ (вдоль волокон) при изменении нагрузки для схем с различными количествами стальных пластин представлена на рисунке 3.27.

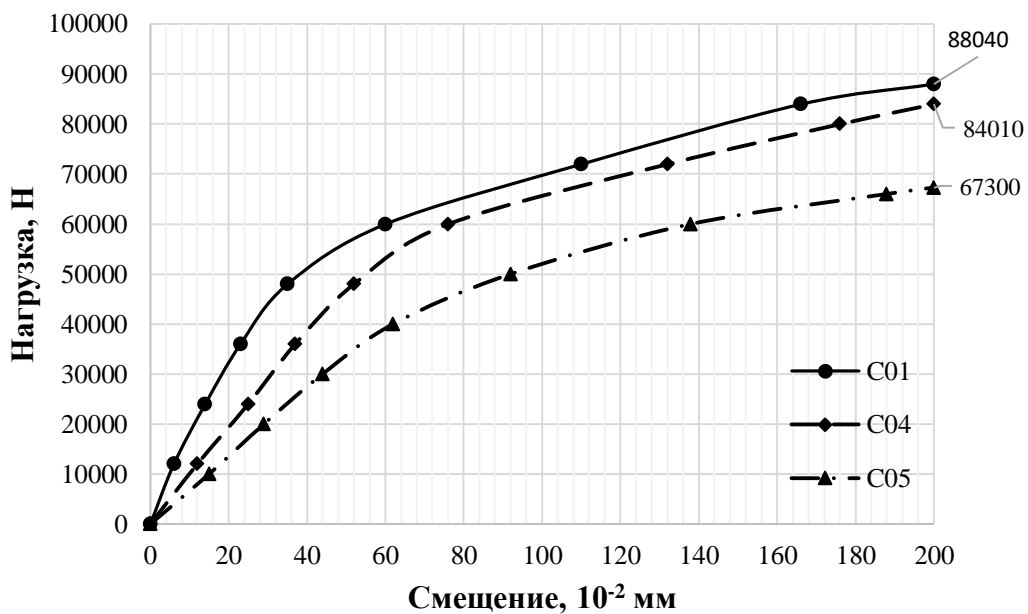


Рис. 3.27. Зависимость «нагрузка – смещение» стальных пластинах относительно деревянных конструкций ЛВЛ (вдоль волокон)

Определение максимальной нагрузки ( $F_{\text{деф-2мм}}$ ) фиксировалось при достижении предельного смещения равного 2 мм, которое фиксировалось с помощью датчиков перемещения, а значение нагрузки записывалось с монитора разрывной машины

Анализ данных экспериментальных исследований (Рис. 3.26 и 3.27) показывает, что зависимость несущей способности от количества стальных пластин в соединении является нелинейной. Соотношение несущей способности одной и двух стальных пластин в соединении больше, чем соотношение несущих способностей двух и трех стальных пластин.

В соединениях, где пластические шарниры появляются в области контакта между деревом ЛВЛ и нагелями (С03), получилась несущая способность соединения больше, чем в соединениях, в которых пластические шарниры не появляются или пластические шарниры появляются только в местах вставки стальных пластин (С01; С02). Это является, подтверждением теории пластических рабочих состояний, которая изложена в разделе 2.1 второй глава.

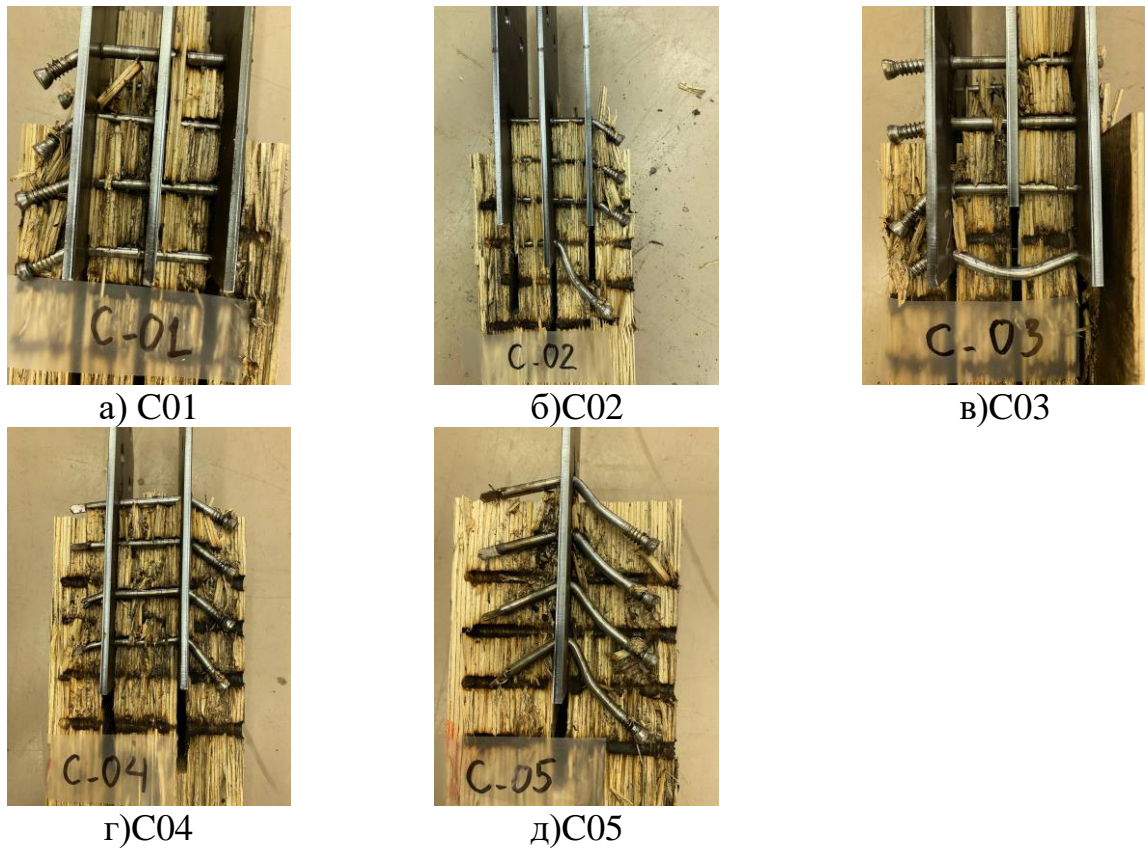


Рис. 3.28. Виды нарушения изгиба самонарезающих нагелей в различных схемах соединения

Виды нарушения деревянных конструкций ЛВЛ в различных схемах соединения

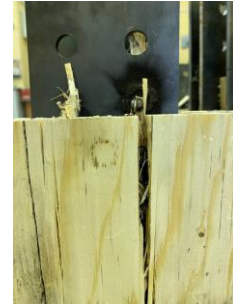
а) С01



б) C02



в) C03



г) C04



д) C05



Рис. 3.29. Виды разрушения соединений деревянных конструкций ЛВЛ в различных схемах соединения

Анализ разобранных после испытаний образцов соединений показывает, что характер разрушений соответствует пластическим и хрупким механизмам разрушения, представленным в теоретической части работы. Кроме того, из анализа экспериментальных результатов видно, что положение стальных пластин в соединении оказывает влияние на механизм изгиба нагелей и разрушения деревянных конструкций из ЛВЛ. Как показано на рисунке 3.28, изгиб нагеля наблюдается преимущественно на внешней части деревянной

конструкции из ЛВЛ. В месте контакта поверхности отверстия в деревянной конструкции ЛВЛ с цилиндрическими нагелями распределяемая нагрузка от нагелей приводит к разрушению ЛВЛ при смятии. При увеличении напряжения наблюдается реализация модели скалывания с разрушением рядов.

### 3.5. Выводы по главе

Определены характеристики исходных материалов элементов соединений и нагелей. Плотность деревянных образцов ЛВЛ соответствует  $560 \text{ кг/м}^3$ , предел прочности поперек волокон образцов ЛВЛ –  $9.2 \text{ МПа}$ , предел прочности поперек волокон образцов ЛВЛ –  $56 \text{ МПа}$ , предел текучести самонарезающих нагелей –  $578,6 \text{ МПа}$  и предел текучести гвоздей –  $405,35 \text{ МПа}$ .

Выполнены испытания различных схем соединений с использованием цилиндрических нагелей и самонарезающих нагелей. Полученные результаты свидетельствуют о том, что характер разрушений соответствует пластическим и хрупким механизмам разрушения, представленным в теоретической части работы.

В результате наибольшее соотношение между фактической и теоретической несущей способностью получено при использовании методики расчета по СП 64.13330.2017. Следовательно, можно сделать вывод о завышенном запасе несущей способности, что требует уточнения расчетных формул для нагельных соединений с использованием нескольких стальных пластин (соединения «сталь-дерево») в данной методике.

Несущая способность соединения с одинаковым количеством нагелей и различными размерами стальных пластин больше, чем для соединения с разным количеством нагелей и одинаковыми размерами стальных пластин. Объясняется это уменьшением хрупкого разрушения соединения.

## ГЛАВА 4. АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО – ДЕФОРМАЦИОННОГО СОСТОЯНИЯ (НДС) СОЕДИНЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ САМОНАРЕЗАЮЩИХ НАГЕЛЕЙ ПО МЕТОДУ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ (МКЭ).

### 4.1. Общие положения

В настоящее время с развитием информатики, программное обеспечение конечных элементов для структурного анализа, стало важным инструментом в научных исследованиях. Почти точное моделирование рабочего механизма материала за счет правильной установки входных параметров без изготовления твердотельной модели. Это позволяет сократить сроки исследования и материальные расходы.

В научных исследованиях широко используются программные комплексы методов конечных элементов такие как: ANSYS, SOLIDWORKS, ABAQUS, ETABS, SAP и др... Для анализа напряженно-деформированного состояния нагельного соединения и сравнения с полученными экспериментальными данными была создана расчетная модель образцов (дерево - сталь) в программном комплексе ANSYS Workbench 18.2.

Деревянные конструкции типа ЛВЛ – это конструкции из анизотропного материала с различным поведением при растяжении и сжатии в разных направлениях. В упрощенном виде предполагается ортотропная упругость ЛВЛ (Dias et al., 2007).

Основное соотношение между напряжением и деформацией для упругих анизотропных материалов (4.1), в том числе и ЛВЛ, в матричной форме имеет вид (обобщённый закон Гука):

$$\{\varepsilon\} = [C] \cdot \{\sigma\} \quad (4.1)$$

Уравнение (4.1) можно переписать следующим образом:

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\} \quad (4.2)$$

Где  $\{\varepsilon\}$ - вектор деформаций;  $[D]$ - матрица податливости;  $\{\sigma\}$ - вектор напряжений

Определяющее соотношение для трехмерной ортотропной линейной упругости задается уравнением

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{13} \\ 2\varepsilon_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & \frac{-v_{21}}{E_{22}} & \frac{-v_{31}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-v_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & \frac{-v_{32}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-v_{13}}{E_{11}} & \frac{-v_{23}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{23}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{11} \\ \tau_{22} \\ \tau_{33} \end{Bmatrix} \quad (4.3)$$

матрица  $[D]$  в зависимости физических параметров материалов

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{E_{11}(1-v_{23}v_{32})}{\psi} & \frac{E_{22}(v_{12}-v_{32}v_{13})}{\psi} & \frac{E_{33}(v_{13}-v_{12}v_{23})}{\psi} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E_{22}(v_{12}-v_{32}v_{13})}{\psi} & \frac{E_{22}(1-v_{13}v_{31})}{\psi} & \frac{E_{22}(v_{23}-v_{21}v_{13})}{\psi} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{E_{33}(v_{13}-v_{12}v_{23})}{\psi} & \frac{E_{33}(v_{23}-v_{21}v_{13})}{\psi} & \frac{E_{33}(1-v_{12}v_{21})}{\psi} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_{23} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_{13} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\psi = 1 - v_{12}v_{23} - v_{23}v_{32} - v_{31}v_{13} - 2v_{21}v_{32}v_{13} \quad (4.5)$$

Матрица  $[C]$  обозначает матрицу соответствия и  $[D]$  является матрицей жесткости. Уравнение (4.6) также существует между отношением Пуассона и модулем упругости.

$$\nu_{ij} = \frac{E_{ii}}{E_{jj}} \cdot \nu_{ji}; (i, j = 1, 2, 3; i \neq j) \quad (4.6)$$

где  $E_{ii}$  ( $i=1, 2, 3$ ) обозначает модули упругости,  $G_{ij}$  ( $i, j=1, 2, 3; i \neq j$ ) модуль жесткости,  $\nu_{ij}$  ( $i, j=1, 2, 3; i \neq j$ ) соотношения Пуассона,  $\varepsilon_{ij}$  ( $i, j=1, 2, 3$ ) компоненты деформации.

Модель материала может быть выбрана из библиотеки моделей программы или добавлена в библиотеку пользователем самостоятельно с помощью ввода констант, задания кривой деформирования, описывающей поведение материала, механические свойства линейно - упругого материала, кривая напряжение деформация для нелинейного гиперупругого материала и т.д. В данном исследовании были выбраны параметры материала деревянных конструкций из ЛВЛ (см. табл. 4.1):

- Самонарезающие нагели из высокопрочной стали марки S235, диаметр 7 (мм); длина 133 (мм), модуль упругости  $E = 2,1 \cdot 10^5$  (МПа);  $f = 550$  (МПа) – условный предел текучести;  $\mu = 0,28$  - коэффициент Пуассона.

- Стальные пластины из стали С245, толщина  $t = 5$  (мм), модуль упругости  $E = 2,1 \cdot 10^5$  (МПа);  $f = 245$  (МПа) – условный предел текучести;  $\mu = 0,3$  - коэффициент Пуассона

- Деревянные конструкции из ЛВЛ с характеристиками, приведёнными в таблице 4.1, в соответствии со справочными данными.

Ортотропные свойства деревянных конструкций из ЛВЛ были взяты из данных, опубликованных ранее [15]. Учитывались три основных направления: продольное (**a**), тангенциальное (**t**) и радиальное (**r**). Ортотропия древесины



представлена тремя модулями упругости  $E_a$ ,  $E_r$  и  $E_t$ , тремя модулями жесткости  $G_{ta}$ ,  $G_{ar}$  и  $G_{rt}$  и шестью коэффициентами Пуассона.

Табл. 4.1. Характеристики параметров упругости деревянных конструкций из ЛВЛ

Модуль упругости, МПа			Модуль сдвига, МПа		
$E_a$ ( $E_z$ )	$E_r$ ( $E_x$ )	$E_t$ ( $E_y$ )	$G_{ta}$ ( $G_{yz}$ )	$G_{ar}$ ( $G_{xz}$ )	$G_{rt}$ ( $G_{xy}$ )
13800	11600	11600	600	400	600
Коэффициент Пуассона					
$m_{ar}$ ( $N_{uzx}$ )	$m_{ra}$ ( $N_{uxz}$ )	$m_{at}$ ( $N_{uzy}$ )	$m_{ta}$ ( $N_{uyz}$ )	$m_{rt}$ ( $N_{uxy}$ )	$m_{tr}$ ( $N_{uyx}$ )
0,504	0,078	0,463	0,045	0,527	0,306

Различные схемы соединения были экспериментально исследованы в третьей главе (Схемы С-01 – С-05). В данном разделе моделирование напряженно-деформированного состояния этих схем соединений выполнено с помощью метода конечных элементов (МКЭ). На рисунке 4.1 показана модель испытуемого типичного образца с нанесенной сеткой конечных элементов.

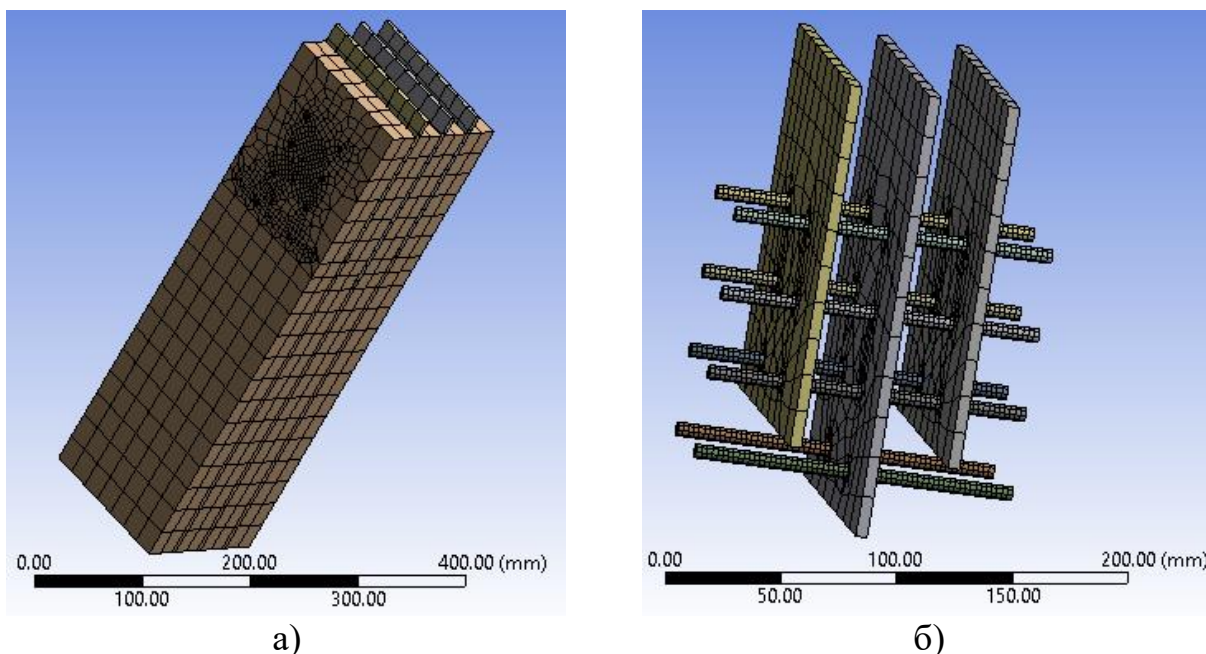
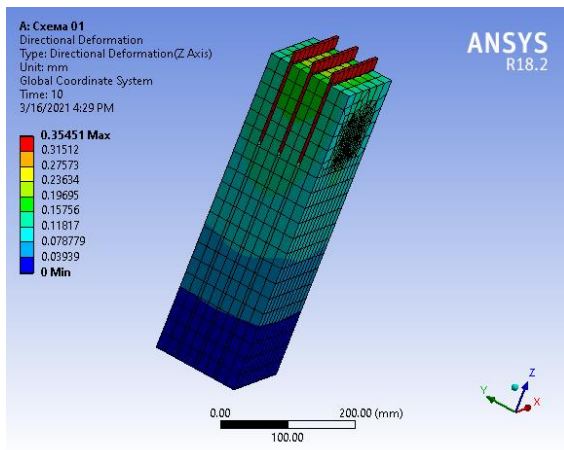


Рис. 4.1. Модель соединения: а) с тремя стальными пластинами в расчетном комплексе ANSYS Workbench; б) для нагелей и стальных пластин.

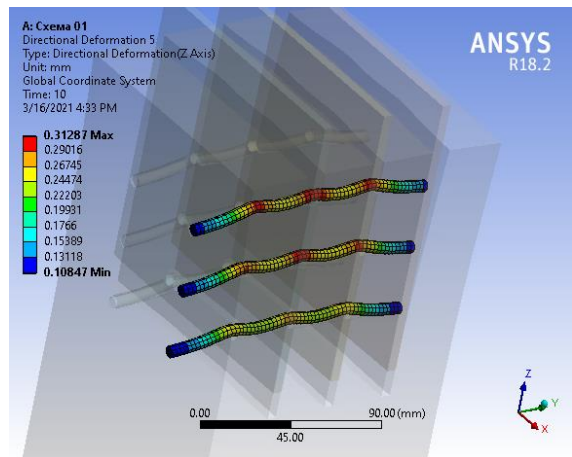
Необходимо учитывать работу сил трения по контактной поверхности древесина-нагель и стальная пластина-нагель, в модель введены специальные контактные элементы. Контакты между нагелями и деревянными конструкциями ЛВЛ являются фрикционными с коэффициентом трения 0,16. а контакт между деревянными конструкциями ЛВЛ и стальными пластинами без трения.

Режим нагрузки моделируется полностью так же, как и в экспериментах (см. главу 3).

Изополя распределения перемещений в деревянных конструкциях ЛВЛ и нагелях приведены для каждой схемы на рисунках 4.2- 4.6 а, б соответственно.

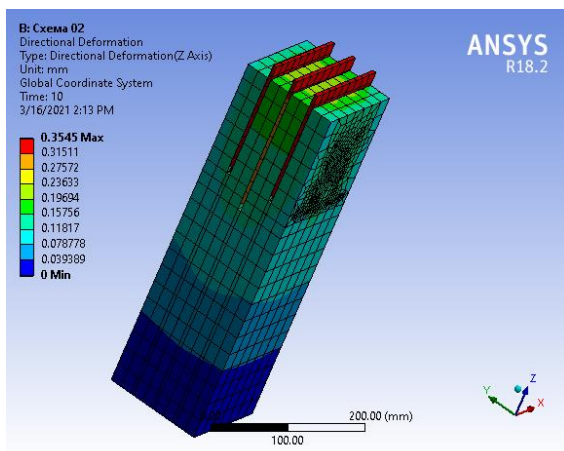


а)

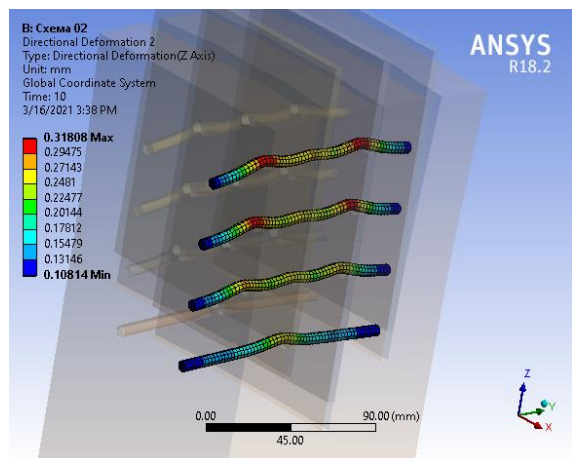


б)

Рис. 4.2. Изополя распределения перемещений соединения (С-01): а) для ЛВЛ; б) для нагелей

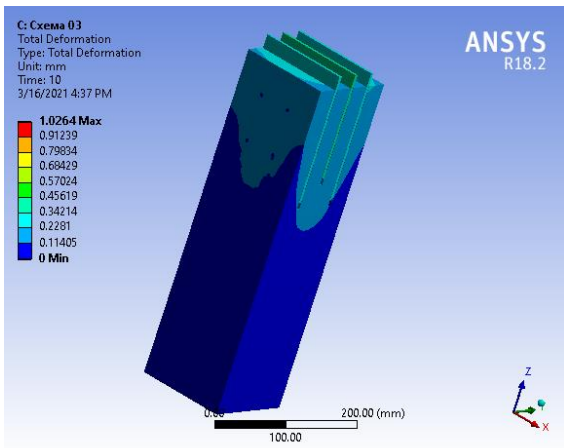


а)

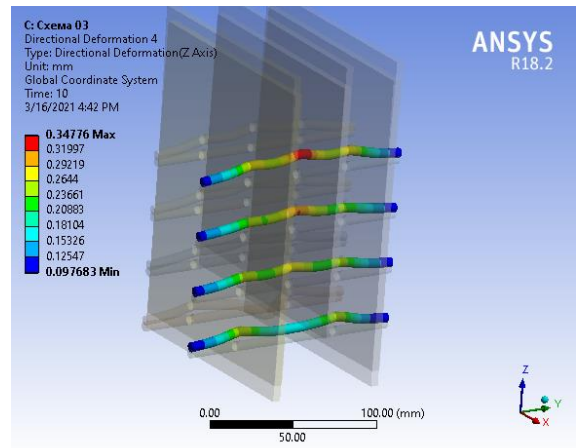


б)

Рис. 4.3. Изополя распределения перемещений (С-02): а) для ЛВЛ; б) для нагелей

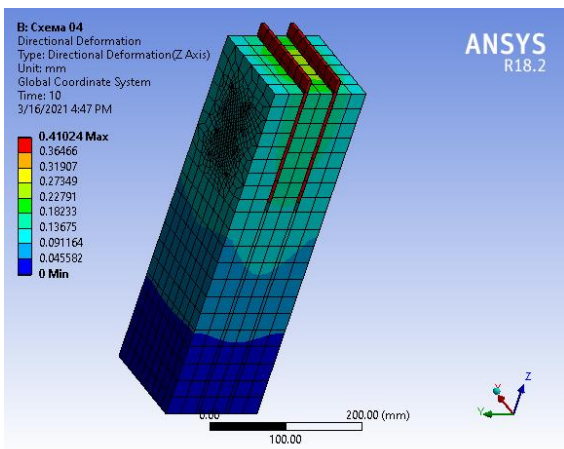


а)

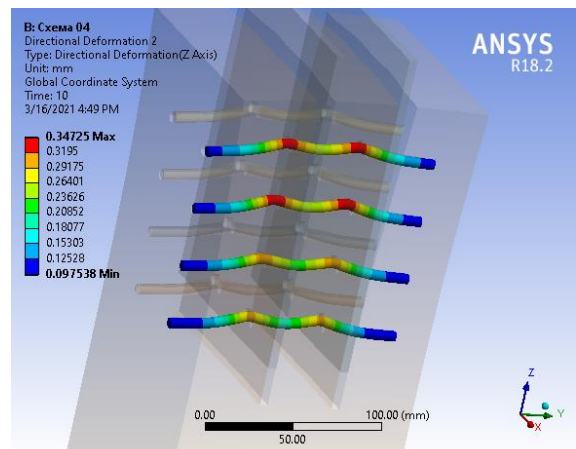


б)

Рис. 4.4. Изополя перемещений (С-03): а) для ЛВЛ; б) для нагелей

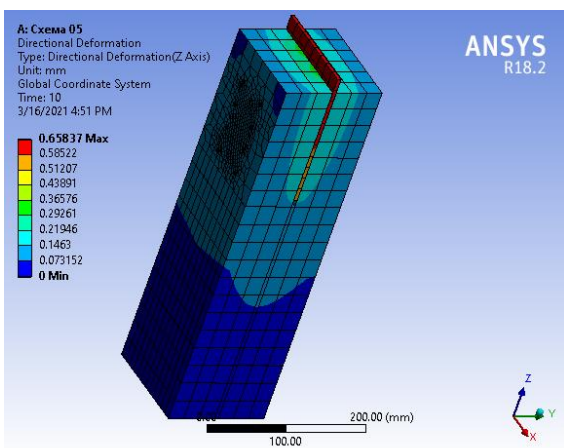


а)

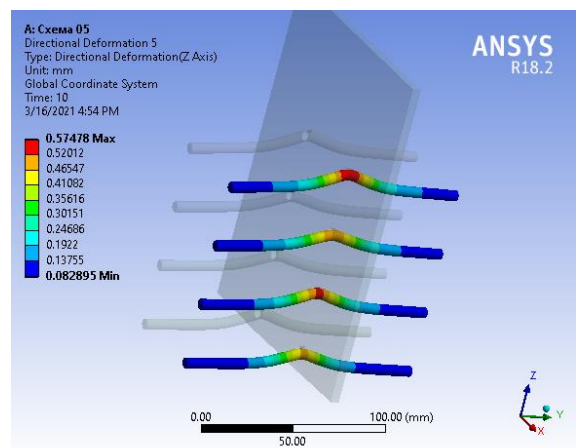


б)

Рис. 4.5. Изополя распределения перемещений (С-04): а) для ЛВЛ; б) для нагелей



а)



б)

Рис. 4.6. Изополя распределения перемещений (С-05): а) для ЛВЛ; б) для нагелей

Изополя распределения деформаций в деревянных конструкциях из ЛВЛ и нагелях позволяют прогнозировать появление пластических шарниров на нагеле при увеличении нагрузки, а также фиксировать значение нагрузки.

#### 4.2. Сравнительный анализ результатов, полученных численным методом и экспериментальных данных

Экспериментальный и численный анализ значений относительных деформаций на поверхности внутренней и внешней частей деревянной конструкции ЛВЛ соединения представлены на рисунке 4.1.

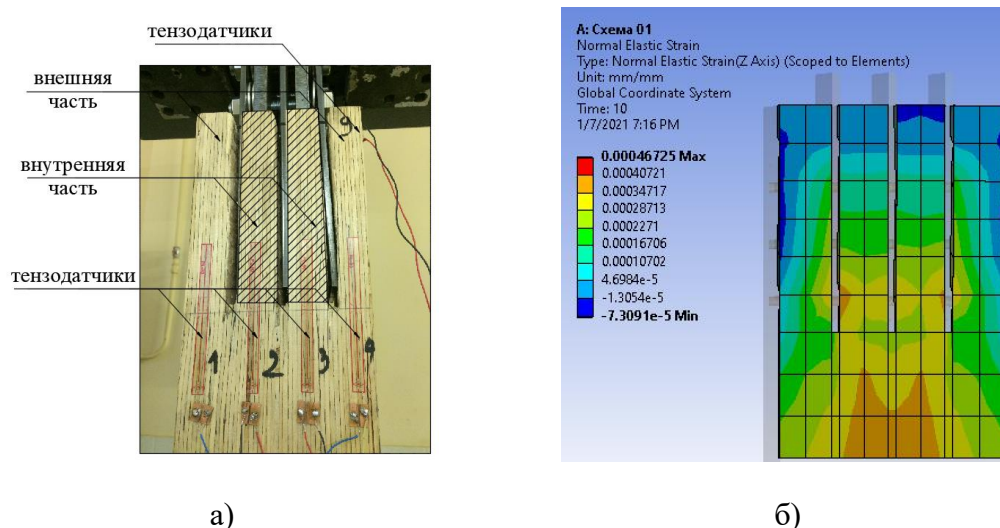


Рис. 4.7. Сравнительный анализ результатов экспериментальных и численного анализа. а) расположение тензодатчиков на элементах деревянных конструкций; б) относительная деформация по данным численного анализа; 1, 2, 3, 4 – расположение тензодатчиков параллельно волокну деревянных конструкций; 9 – расположение тензодатчиков перпендикулярно волокну деревянных конструкций.

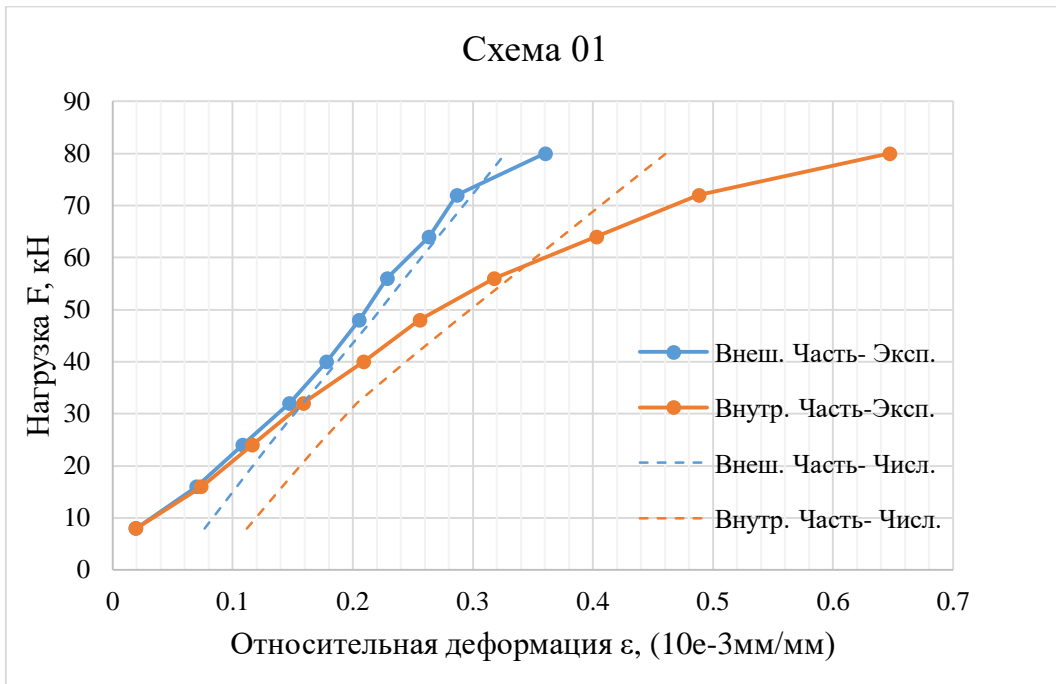
Табл. 4.2. Значения относительной деформации при различных схемах по результатам экспериментов и установленных численно.

Нагрузка (кН)	Схема С01				Схема С02			
	Внешняя часть		Внутренняя часть		Внешняя часть		Внутренняя часть	
	$\varepsilon_3$ (10-3 мм/мм)	$\varepsilon_4$ (10-3 мм/мм)	$\varepsilon_3$ (10-3 мм/мм)	$\varepsilon_4$ (10-3 мм/мм)	$\varepsilon_3$ (10-3 мм/мм)	$\varepsilon_4$ (10-3 мм/мм)	$\varepsilon_3$ (10-3 мм/мм)	$\varepsilon_4$ (10-3 мм/мм)
8	0.0194	0.0763	0.0194	0.1117	0.0504	0.1170	0.0194	0.1096
16	0.0698	0.1033	0.0736	0.1412	0.0891	0.1443	0.0620	0.1464
24	0.1085	0.1304	0.1163	0.1712	0.1202	0.1720	0.1124	0.1908
32	0.1473	0.1588	0.1589	0.2035	0.1512	0.2023	0.1860	0.2422
40	0.1783	0.1873	0.2093	0.2444	0.1977	0.2337	0.2364	0.2922
48	0.2054	0.2160	0.2558	0.2871	0.2519	0.2635	0.2519	0.3426
56	0.2287	0.2436	0.3178	0.3309	0.3140	0.2937	0.2829	0.3925
64	0.2636	0.2712	0.4031	0.3738	0.4574	0.3243	0.3372	0.4427
72	0.2868	0.2992	0.4884	0.4173	0.5155	0.3551	0.3992	0.4930
80	0.3605	0.3272	0.6473	0.4610	0.5310	0.3867	0.4264	0.5431

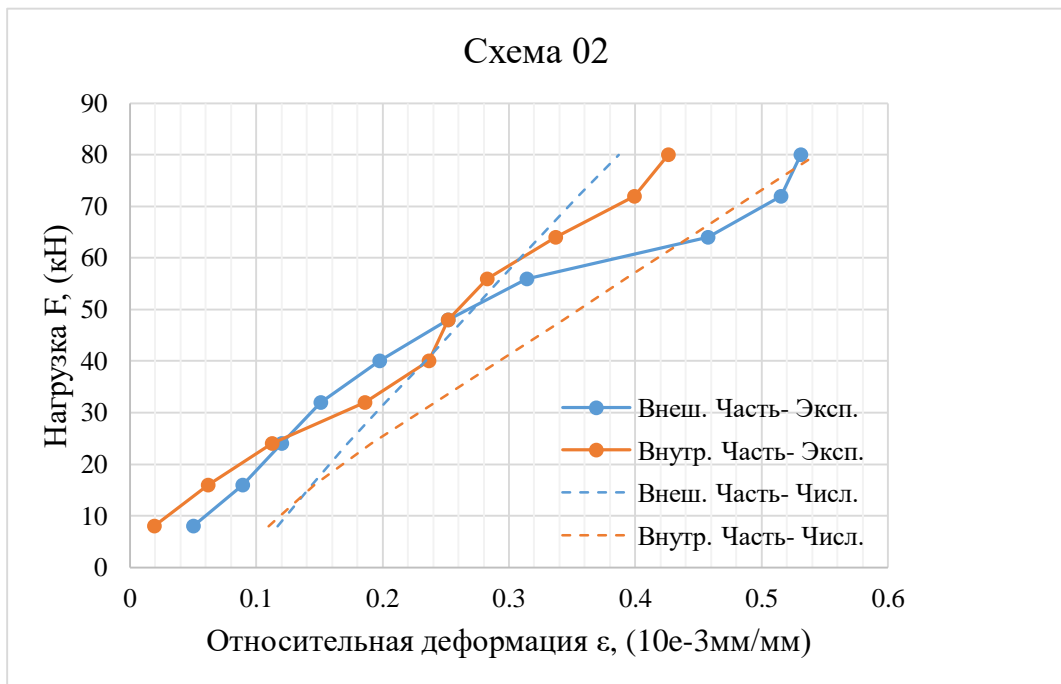
Нагрузка (кН)	Схема С03			
	Внешняя часть		Внутренняя часть	
	$\varepsilon_3$ (10-3 м/мм)	$\varepsilon_4$ (10-3 мм/мм)	$\varepsilon_3$ (10-3 мм/мм)	$\varepsilon_4$ (10-3 мм/мм)
10	0.0233	0.0736	0.0155	0.1324
20	0.0698	0.0994	0.0736	0.1862
30	0.0969	0.1251	0.1473	0.2407
40	0.1163	0.1506	0.2093	0.2956
50	0.1240	0.1758	0.2519	0.3510
60	0.1473	0.2022	0.2946	0.4057
70	0.1705	0.2300	0.3411	0.4604
80	0.2016	0.2575	0.3566	0.5143
90	0.2132	0.2847	0.3837	0.5681
100	0.2248	0.3117	0.3876	0.6219

Где  $\varepsilon_3$  – относительная деформация замеряется датчиком и расчёт в экспериментах

$\varepsilon_4$  – относительная деформация численного анализа в методе конечных элементов

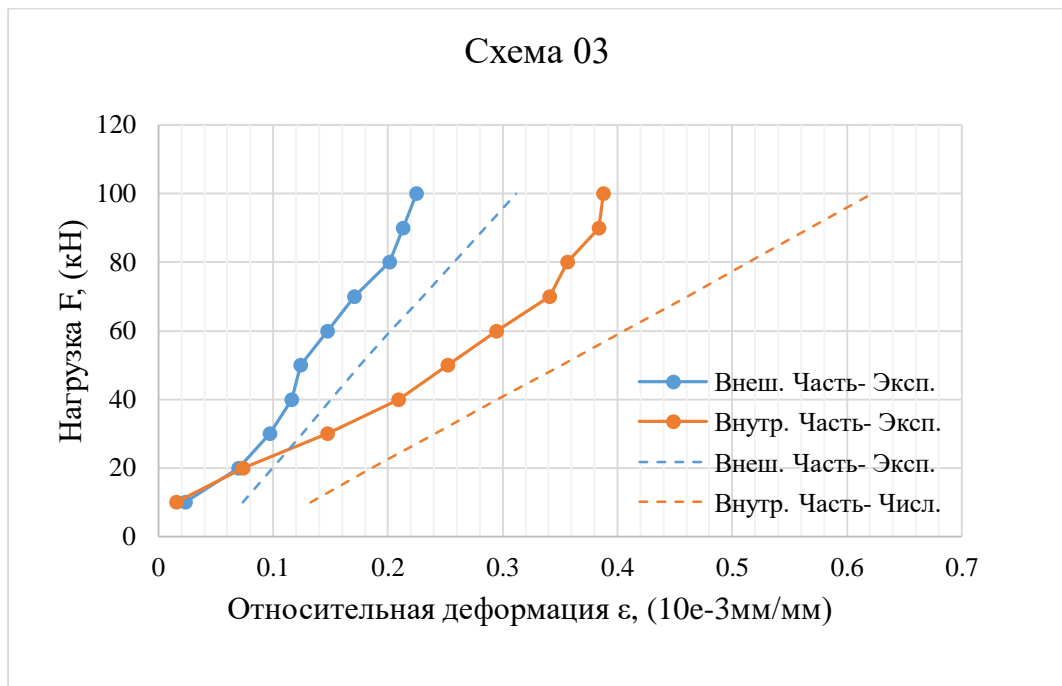


а)



б)





в)

Рис. 4.8. Зависимость «нагрузка – относительная деформация» при растяжении соединений «сталь-дерево» по результатам эксперимента и численного метода

а) схема С01; б) схема С02; в) схема С03

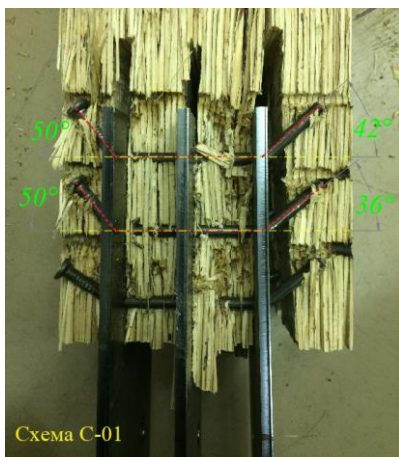
Развитие относительной деформации между частями деревянных соединения имеет различия для разных схем. В схемах С-01 (внеш.  $\epsilon_s = 0.3605$ ; внутр.  $\epsilon_s = 0.6473 \cdot 10^{-3}$  мм/мм) и С-03 (внеш.  $\epsilon_s = 0.2248$ ; внутр.  $\epsilon_s = 0.3876 \cdot 10^{-3}$  мм/мм), полученные значения во внешней части меньше, чем значения во внутренней части. Это можно объяснить тем, что во внешней части нагель действует как консоль и происходит его изгиб. При увеличении нагрузки, напряжение и деформация в нагеле возрастают, поэтому напряжение и деформация в деревянной детали уменьшаются. Во внутренней части нагель действует как балка и не появляется деформация изгиба нагеля, поэтому нагрузка полностью переносится с нагеля на деревянную конструкцию.

В схеме С-02 значения относительных деформаций во внешней части ( $\epsilon_s = 0.5310 \cdot 10^{-3}$  мм/мм) больше, чем значения во внутренней части; ( $\epsilon_s = 0.4264 \cdot 10^{-3}$  мм/мм). Добавление средней стальной пластины с четырьмя рядами нагелей снижает нагрузку на каждое поперечное сечение. В то же время в четвертом ряду

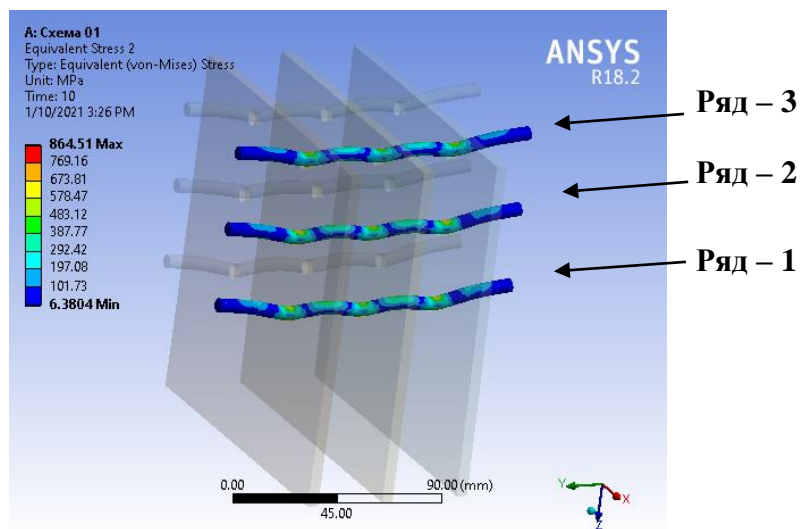
нагелей возникает деформация изгиба, что снижает напряжение и деформацию средних частей деревянных конструкций.

На внешней деревянной части соединения появляется пластичный шарнир (нагель работает как консоль). На основе анализа напряжений по длине нагеля, можно определить положение и развитие пластического шарнира на нагеле во внутренней части деревянных конструкций.

На схеме С-01, ряды нагелей имеют одинаковый рабочий механизм. Пластичные шарниры появляются на стыке, контактирующем с внешней деревянной частью. Угол изгиба ( $\alpha$ ) определяется в момент разрушения соединения. (см. рис. 4.9)

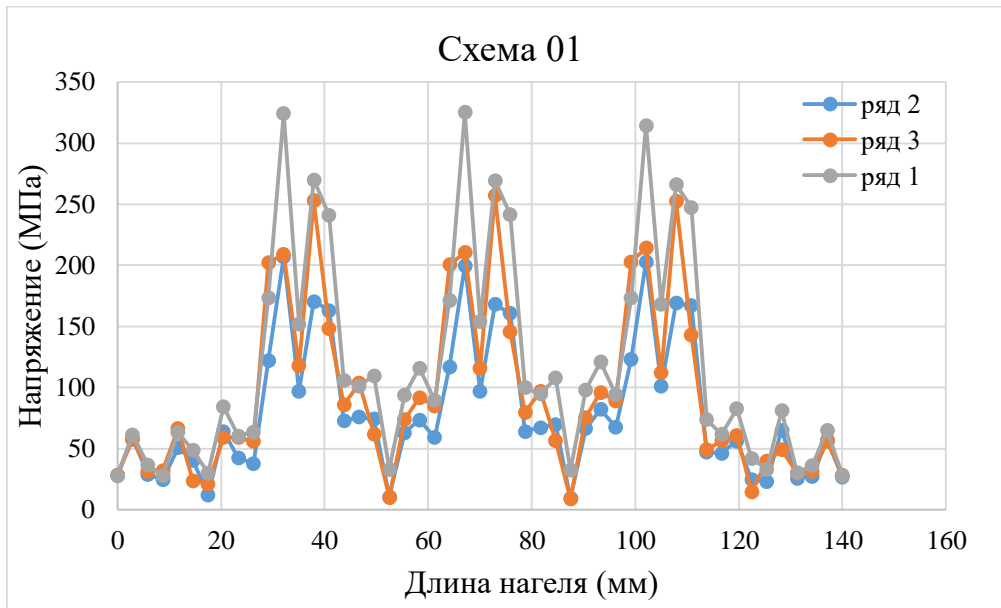


а) Деформация нагелей



б) Распределение напряжений по результатам численного метода

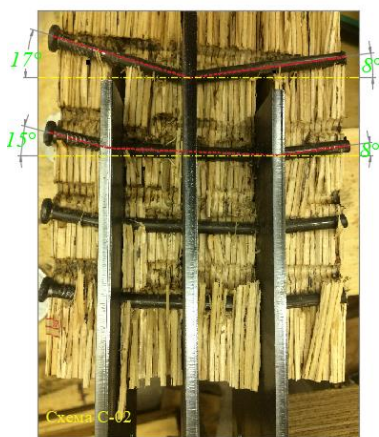




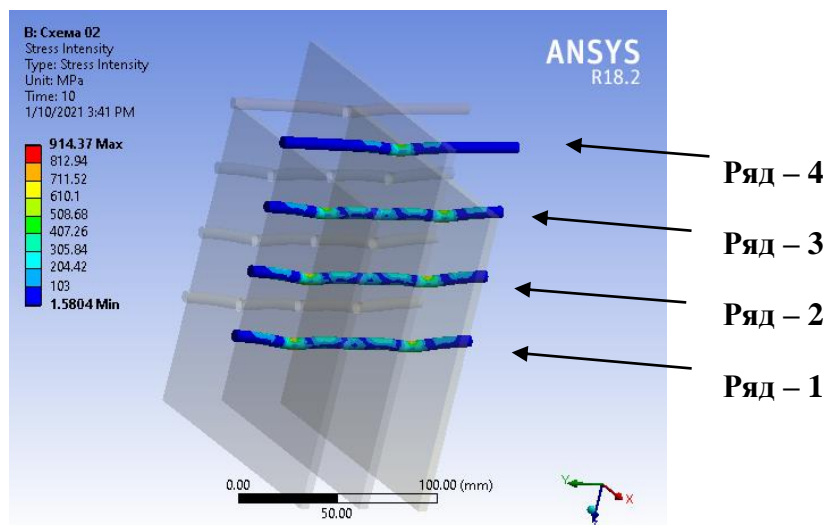
в) Распределение эквивалентных напряжений по длине нагеля (нагрузка  $F=100$  кН)

Рис. 4.9. Нагели в схеме С-01

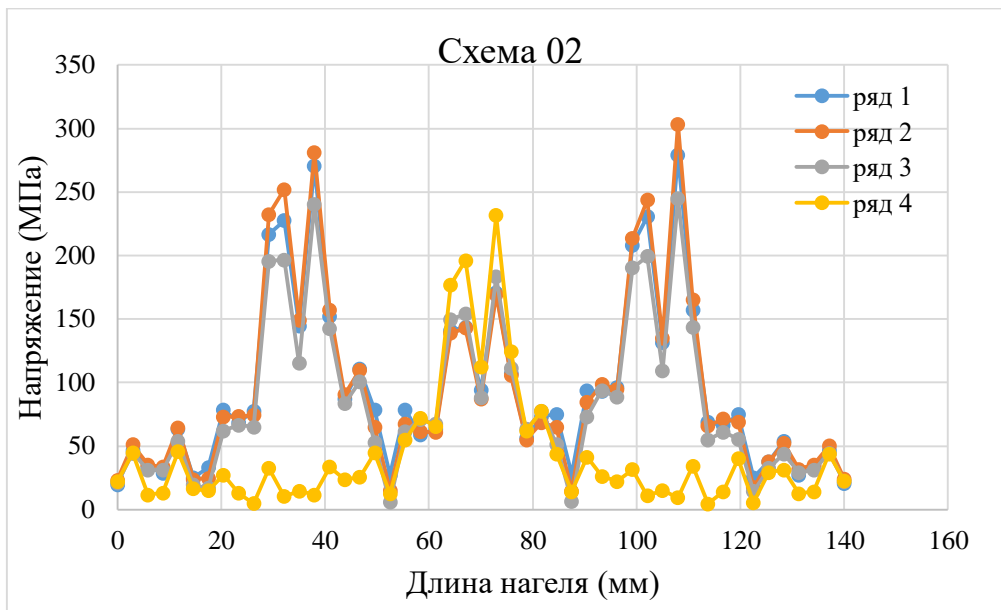
На схемах С-02 и С-03 ряды нагелей имеют разные рабочие механизмы. Распределенная нагрузка на поперечные сечения варьируется. На схеме С-02 средняя стальная пластина с четырьмя рядами нагелей будет нести большую нагрузку, поэтому нагрузка, прикладываемая к внешним сечениям, снижается, а хрупкое разрушение внешней деревянной части уменьшается. Угол изгиба нагеля (см. рис. 4.10)



а) Деформация нагелей



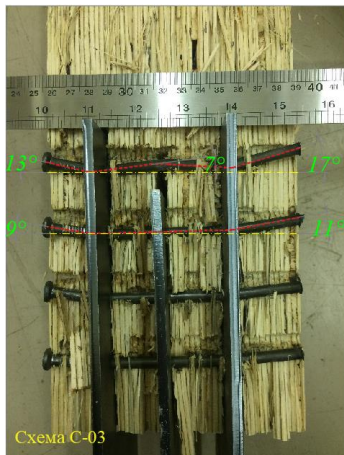
б) Распределение напряжений по результатам МКЭ.



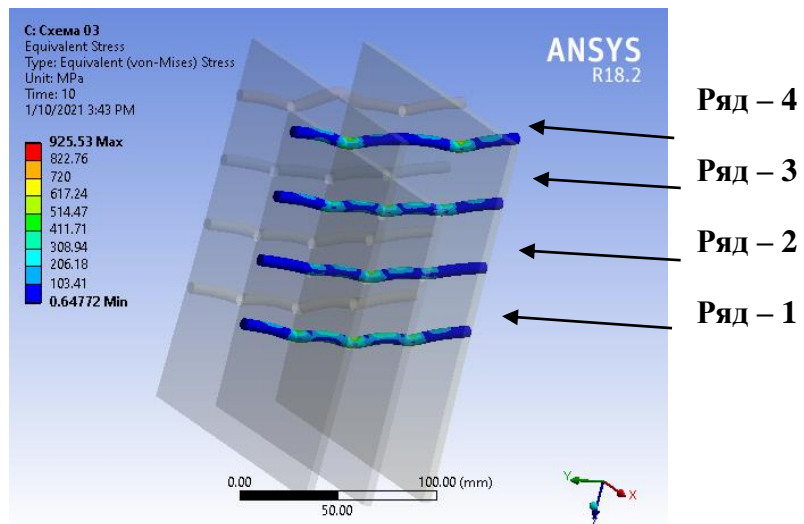
в) Распределение эквивалентных напряжений по длине нагеля  
(нагрузка  $F=100$  кН)

Рис. 4.10. Нагели в схеме С-02

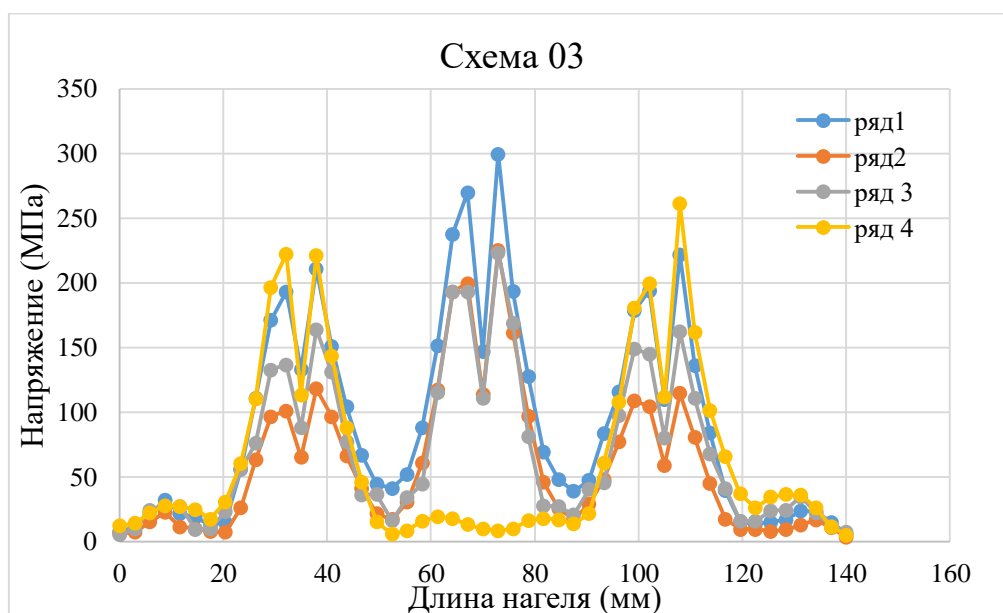
Тот же аргумент к схеме С-03: на внешние стальные пластины распределяется больше нагрузок, тем самым уменьшется хрупкое разрушение внутренних деревянных частей. (см. рис. 4.11)



а) Деформация нагелей



б) Напряжения нагелей по численному методу



в) Распределение эквивалентных напряжений по длине нагеля  
(нагрузка  $F=100$  кН)

Рис. 4.11. Распределение напряжений в нагеле (схема С-03)

### 4.3. Выводы по главе

По результатам работы можно сделать следующие выводы.

Модели схем соединения с применением самонарезающих нагелей устанавливаются с помощью программы Ansys workbench 18.2 в соответствии с характеристическими свойствами материала такими же как, как и в схемах при проведении экспериментальных исследований, что позволили провести сравнительный анализ экспериментальных и численных результатов.

С помощью программы Ansys 18.2 оценена зависимость напряженно-деформированного состояния элементов деревянных конструкций из ЛВЛ в соединении с от количества и размеров стальных пластин, диаметров самонарезающих нагелей.

На внешней деревянной части соединений появляется пластичный шарнир (нагель работает как консоль). На основе анализа напряжений по длине нагеля,

можно определить положение и развитие пластического шарнира на нагеле в внутренней части деревянных конструкций.

Определены изополя распределения деформаций в деревянных конструкции ЛВЛ и нагелях для каждой схемы соединений, показана сходимость с результатами эксперимента. Таким образом, данный подход может быть использован для прогнозирования появления и расположения пластических шарниров на нагелях при воздействии нагрузки.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

По итогам работы над диссертацией были получены следующие результаты:

1. Установлено, что применение соединения «дерево-сталь» в каркасных конструкциях, фермах способствует повышению несущей способности. Это эффективное решение при разработке крупногабаритных конструкций, позволяющее легко соединять деревянные конструкция с другими материалами в здании с помощью стальных пластин.

2. Впервые исследованы нагельные соединения с использованием различных стальных пластин в структуре соединения с конструкциями из ЛВЛ. Определена несущая способность данного типа соединения, проведено экспериментальное исследование и численное моделирование напряженно-деформированного состояния узловых соединений.

3. Определено и подтверждено влияние диаметра нагеля на распределение напряжений в соединении. Численное и экспериментальное моделирование свидетельствуют, что уменьшение диаметра нагелей способствует распределению локальных напряжений в деревянных конструкциях, тем самым значительно уменьшая вероятность хрупкого разрушения соединения.

4. Рассмотрен широкий спектр моделей напряженно-деформированного состояния соединений на основе анализа механизмов хрупкого и пластического

разрушения с учетом наступления одновременного пластического шарнира для всех компонентов системы при растяжении. Установлено, что увеличение количества пластических шарниров нагеля снижает напряжение в деревянной конструкции из ЛВЛ и увеличивает несущую способность соединения.

5. Выполнен сравнительный расчет несущей способности для типа соединения «сталь-дерево», на примере применения двух стандартов СП64.13330.2017 и Еврокод 5, с использованием коэффициентов пересчета при выполнении совместного расчета.

6. Разработана методика расчета несущей способности соединений деревянных конструкций из ЛВЛ с применением самонарезающих нагелей в зависимости от количества срезов по длине нагеля (количество стальных пластин в соединении) с учетом режима разрушения элементов в соединении, позволяющая вычислить несущую способность соединения с несколькими стальными пластинами. Данные экспериментальных исследований показывают нелинейную зависимость величины несущей способности от количества стальных пластин в соединении.

7. Предложена новая структура соединения «сталь-дерево» с различными размерами стальных пластин в соединении. В соединениях, где пластические шарниры появляются в области контакта между деревом ЛВЛ и нагелями, получилась несущая способность соединения больше, чем в соединениях, в которых пластические шарниры не появляются или пластические шарниры появляются только в местах вставки стальных пластин.

8. Установлено расхождение в 12-16% между результатами теоретических и экспериментальных исследований соединений ЛВЛ с цилиндрическими и самонарезающими нагелями при испытании на растяжение, что подтверждает теоретические предпосылки о влиянии допустимого отклонения просверленных отверстий в древесине ЛВЛ и диаметра нагелей на несущую способность соединения. Это подтверждает эффективность самонарезающих нагелей.

9. Определена зависимость напряженно-деформированного состояния элементов в соединении с помощью программы Ansys 18.2 от количества и размеров стальных пластин в соединении с применением самонарезающих нагелей. На основе зависимости деформации от напряжения объясняются виды пластического разрушения нагелей и показана достоверность и сходимость с результатами эксперимента. Таким образом, данный подход может быть использован для прогнозирования появления и расположения пластических шарниров на нагелях при воздействии нагрузки.

10. Разработан алгоритм расчета соединений деревянных конструкций из ЛВЛ «сталь-дерево», который апробирован на практике и может быть использован при корректировке нормативных документов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ашкенази Е. К. Анизотропия древесины и древесных материалов. М.: Лесная промышленность, 1978. 223 с.
2. Водяников М. А. Несущая способность и деформативность углепластиковых нагельных соединений деревянных конструкций, работающих в агрессивной среде. // Дисс.. канд. техн. наук. – Москва, 2019. - 157 с
3. В.В. Пуртов, канд. техн. наук, доц., А.В. Павлик, ст. Препоод: К расчету соединений элементов деревянных конструкций на металлических накладках и дюбелях, ISSN 0536-1052. Изв. вузов. Строительство. 2007. № 5
4. Семенов К.В. Конструкции из дерева и пластмасс. Деревянные конструкции: учеб. пособие / К. В. Семенов, М. Ю. Кононова. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2013. – 132 с.
5. Данилов, Е.В. к вопросу об НДС нагельных соединений из LVL. // Сборник научных трудов, посвященный 180-летию СПбГАСУ. СПбГАСУ, Санкт-Петербург, – 2012 г. – С. 54-57.
6. Дмитриев П.А. Экспериментальные исследования соединений элементов деревянных конструкций на металлических и пластмассовых нагелях и теория их расчета с учетом упруго-вязких и пластических деформаций: дис. ... д-ра техн. наук / П.А. Дмитриев. - Новосибирск, 1975. – 529 с
7. Гринь И.М. / проектирование и расчет деревянных конструкций: И.М Гринь, В. В. Фурсов, Д. М. Бабушкин и др; Под ред И.М Гринь - К будивэльник, 19998. - 204 с.
8. Г.Н. Шмелев М.А. Дымолазов. Деревянные конструкции. Примеры расчетов элементов. Учебно-методическое пособие, Казань, 2018 с – 8
9. Глухих В. Н, Черных А. Г. Анизотропия древесины. Технологический аспект: моногр. // Глухих В. Н, Черных А. Г.; СПбГАСУ. – СПб., 2013.- 240 с.
10. Глухих В.Н. Деревянные конструкции с применением когтевых шайб и учетом начальных напряжений древесины / В.Н. Глухих, А.Г. Черных, Е.В. Данилов. // СПбГАСУ, – 2018.

11. Горшков А.Г. Теория упругости и пластичности / Горшков А.Г., Старовойтов Э.И., Тарлаковский Д.В.; ФИЗМАТЛИТ, М., 2011 - 416 стр
12. ГОСТ 11701-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент.; введ. 01.01.1984. – М.: Изд-во стандартов, 1984 г., 15 с. - (Межгосударственный стандарт).
13. ГОСТ 16483.9-73\* Древесина. Методы определения модуля упругости при статическом изгибе. Взамен ГОСТ 16483.9-72; введ. 01.07.1974. – М.: Изд-во стандартов, 1999 г., 9 с. - (Межгосударственный стандарт).
14. ГОСТ 168483.10-73\* Древесина. Методы определения предела прочности при сжатии вдоль волокон. Взамен ГОСТ 116483.10-72; введ. 01.07.1974. – М.: Изд-во стандартов, 1999 г., 7 с. - (Межгосударственный стандарт)
15. ГОСТ 380-94 - Сталь углеродистая обыкновенного качества. введ. 01.01.1998. – М.: Изд-во стандартов, 1997 г., 8 с. - (Межгосударственный стандарт).
16. ГОСТ 33082-2014. Конструкции деревянные. Методы определения несущей способности узловых соединений.
17. ГОСТ Р 52728-2007 метод натурной тензотермометрии, 2007 г., 34 с.
18. ГОСТ 5671-2015. соединения нагельного типа для деревянных конструкций.
19. Жилкин Виталий Афанасьевич. Исследование деформированного состояния цилиндрического нагеля в симметричном двухсрезном соединении пластин из древесины. 593(2), 1–4.
20. Животов Д. А. Применение бруса, клееного из однонаправленного шпона, в плоских балочных фермах: Дисс.. канд. техн. наук. – СПб, 2009. -170 стр.
21. 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.
22. Коченов В. М. Несущая способность элементов и соединений деревянных конструкций. М., 1953. 319 с.
23. Кулинич Н. А., Черных А. Г. Соединения деревянных конструкций с использованием самонарезающихся нагелей. Факторы, влияющие на несущую способность соединения // III Международная конференция молодых ученых по



современным проблемам материалов и конструкций. Издательство Бурятского госуниверситета. – 2019. – с. 187-192

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

25. Ли, В.Д. Конструкции из дерева и пластмасс. [Текст] :учебно-методическое пособие по курсовому и дипломному проектированию / В.Д. Ли. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.строит.ун-та, 2012.–476с.

26. Лютов Л. В. Анализ работы нагельного соединения деревянных брусков с тонкой стальной пластиной // Строительство и реконструкция. – 2015. – №. 5. – С. 26-32.

27. Маркович А. С. Теория расчета податливости деревянных соединений на цилиндрических нагелях // Вестник МГСУ. 2015. №7. С. 41-46.

28. Максимов П. В., Волков А. И. Расчет каркасных деревянных конструкций с применением МКЭ // Вестник Пермского нац. исслед. политехн. ун-та. Механика. 2012. № 1. С. 73–92

29. Миронов В. Г. Деревянные конструкции в вопросах и ответах. Расчёт элементов цельного, составного и клеёного сечений. [Текст]: учеб. пособие /В. Г. Миронов; Нижегород. гос. Архитектур .- строит. ун-т – Н. Новгород: ННГАСУ, 2017. – 95 с.

30. Никитин Г.Г. Вопросы применения и расчета нагельных соединений / Г.Г. Никитин // Сборник научных трудов. Вып. 34. ЛИСИ, 1961. — С. 56-59.

31. Никитин, Г. Г. Расчет нагельных соединений с учетом деформаций, развивающихся во времени [Текст] : Автореферат дис. на соискание ученой степени кандидата технических наук / Моск. инж.-строит. ин-т им. В. В. Куйбышева. - Москва : [б. и.], 1964. - 15 с

32. Николаи Б.Л. Теория расчета нагельных соединений в деревянных конструкциях / Б.Л. Николаи // Харьков: ДНТВУ, 1935. 74 с.

33. 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.

34. Попов Е. В. Совершенствование конструкции и технологии изготовления деревокомпозитных плитно - ребристых изделий для домостроения // Дисс. канд. техн. наук. Архангельск – 2016. 175 с.
35. Руководство по проектированию клееных деревянных конструкций. ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР.М., Стройиздат, 1977г
36. Рекомендации по испытанию соединений деревянных конструкций // ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. М.: Стройиздат, 1980. 40 с.
37. Рекомендации по испытанию деревянных конструкций / ЦНИИСК. М.: Стройиздат, 1976. - 28 с.
38. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1990 – 85 с.
39. СП 16.13330.2017 Актуализированная редакция СНиП II-23-81. Стальные конструкции. 2008. – 140 с.
40. СП 64.13330.2011 Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. – Минрегион России, 2011. – 88 с.
41. СП 64.13330.2017 Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. – М.: Минстрой России, 2017. – 97 с.
42. СТАДД – 3.1 – 2011. Стандарт организации. Деревянные конструкции. Требования и методы испытаний. Санкт Петербург, 2011, – 44 с.
43. СТАДД 3.0-2011 Стандарт организации. Деревянные конструкции. Проектирование соединений деревянных элементов с использованием винтов и шурупов / НП «Ассоциация деревянного домостроения». – СПб: НП АДД, 2011. – 24 с.
44. СТО 36554501-021-2010 Деревянные конструкции. Многослойный клееный из шпона материал Ultralam (Ультралам). Общие технические требования. – М.: ОАО НИЦ «Строительство», 2010.
45. Сюй Юнь. Повышение несущей способности соединений элементов деревянных конструкций на металлических накладках с использованием металлической зубчатой пластины. // Дисс. канд. техн. наук. – СПб, 2015. - 198 с.

46. Строительство, М., металлообработка, М., Эксплуатации, В. И. Т., Умнова, О. В., & Ярцев, В. П. (2007). Машиностроение. Строительство. Материаловедение. 974–982.
47. Т.В. Токарева. Технология производства LVL // Деревообрабатывающая промышленность. 2010. Спецвыпуск. С. 6-9.
48. Тамби А.А. Технология склеивания древесины с применением рентгенографии для контроля клеевых соединений: дисс. канд. техн. наук / А.А. Тамби – СПб.: СПб, 2009. – 180 с.
49. Чернова Т. П. Совершенствование конструкции и технологии сопряжения сл - панелей с деревоклееными элементами // Дисс.. канд. техн. наук. – Архангельск, 2018. -122 с.
50. Черных, А. Г. К вопросу определения несущей способности нагельных соединений в конструкциях из бруса, клееного из однонаправленного шпона (ЛВЛ). [Эл. ресурс] / Черных А.Г. [и др.] // Современные проблемы науки и образования – 2012 г., – № 4.
51. Черных, А. Г. Краткий курс лекций «Международная нормативная база проектирования (Еврокоды)»: учебное пособие / А. Г. Черных, В. Е. Бызов.— Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно строительный университет, ЭБС АСВ, 2014 – 80с
52. Черных А.Г. К вопросу определения несущей способности нагельных соединений в конструкциях из бруса, клееного из однонаправленного шпона (ЛВЛ) / А.Г. Черных, К.С. Григорьев, П.С. Коваль, Е.В. Данилов, В.В. Бакрышева, И.Т. Кашапов // Современные проблемы науки и образования – 2012. – №4.– С. 109-118
53. Черных А. Г., Данилов Е. В. Методы исследования соединений деревянных конструкций на когтевых шпонках // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=8685> (дата обращения: 02.10.2020).

54. Черных А. Г., Чан Куок Фонг. Анализ несущей способности соединения с применением самонарезающих нагелей в различных моделях пластического разрушения // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 4 (81). С. 89–99.
55. 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.
56. Чернявский С. М. «Соединения элементов деревянных конструкций на нагелях, закрепленных в металлических пластинах», м., 1987, 23 стр.
57. Чан Куок Фонг. Анализ различных моделей разрушения соединений «сталь-дерево» с самонарезающими нагелями // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 5 (82). С. 72–81
58. Чан Куок Фонг. Определение несущей способности соединений «сталь-дерево» конструкций из ЛВЛ при растяжении // Вестник гражданских инженеров. 2021. № 1 (84). С. 61–69.
59. Чан Куок Фонг. Разработка конструкций деревянных домов - решение строительства для умного города // Материалы 9-й Международной научно-практической конференции СПбГАСУ. «Инновации в деревянном строительстве», – 2018. – С. 10–17.
60. Чан Куок Фонг. Расчет несущей способности клееных деревянных соединений при сжатии с применением самонарезающих нагелей // В Сборник докладов «Актуальные проблемы современного строительства». СПбГАСУ., Санкт-Петербург, – 2019 г.
61. Шмидт, А. Б. Современные конструкции из древесины, фанеры и LVL. Интерактивные примеры проектирования (адаптация к Mathcad-15): учеб. пособие / А. Б. Шмидт. – СПб: СПбГАСУ, 2018. – 318 с.
62. Экспериментальные методы определения напряжений и деформаций: учебное пособие / В.П. Забродин, А.А. Серегин, М.В. Суханова, А.Б. Портаков. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2017. – 104 с.

63. Яо Вэй. Разработка и расчет узловых соединений несущих пространственных стержневых конструкций из бамбука // Дисс.. канд. техн. наук. – СПб, 2015. - 163 с
64. ASTM D 5764. 2002. Standard Test Method for Evaluating Dowel-Bearing Strength of Wood and Wood-Based Products.
65. AS/NZS 1328.1:1998. Glued laminated structural timber – Performance requirements and minimum production requirements. Joint Technical Committee TM/4, 1998.
66. Andrea Misconel, Marco Ballerini, Jan-Willem van de Kuilen. Steel to timber joints of beech LVL with very high strength steel dowels // World Conference on Timber Engineering. 2016 // Vienna University of Technology. (pp. 269-276).
67. Awaludin, A., Hirai, T., Sasaki, Y., Hayashikawa, T., and Oikawa, A (2011). Beam to Column Timber Joints with Pretensioned Bolts. *Civil Engineering Dimension*, 13(2), 59–64. <https://doi.org/10.9744/ced.13.2.59-64>
68. Aicher, S., Reinhardt, H. W., & Garrecht, H. (2014). Materials and Joints in Timber Structures: Recent Developments of Technology. *RILEM Bookseries*, 9(June 2015). <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7811-5>
69. Bader, T. K., & Schweigler, M. (2016). Wcte 2016 Under Moment Loading – Integrative Evaluation of. August.
70. Brandner, R., Ringhofer, A., & Dietsch, P. (2017). International Conference on Connections in Timber Engineering - From Research to Standards. In *Proceedings of the Conference of Cost Action FP1402*.
71. Bader, T. K., Schweigler, M., Hochreiner, G., Serrano, E., Enquist, B., & Dorn, M. (2015). Dowel deformations in multi-dowel LVL-connections under moment loading. *Wood Material Science and Engineering*, 10(3), 216–231. <https://doi.org/10.1080/17480272.2015.1070372>
72. Brandon, D., Thomson, A., Ansell, M., Bregulla, J., Harris, R., & Walker, P. (2014). Stiffness Modelling of Non-metallic Timber Connections with Pultruded Dowels. In *CIEC 2013*, January 2014, 37–49. [https://doi.org/10.1007/978-981-4585-02-6\\_4](https://doi.org/10.1007/978-981-4585-02-6_4)

73. Blaß, H. J., Bienhaus, A., & Krämer, V. (2001). Effective bending capacity of dowel-type fasteners. *Proceedings of the International RILEM Symposium Joints in Timber Structures*, 22, 71–88.
74. Brandner, R., Ringhofer, A., & Dietsch, P. (2017). International Conference on Connections in Timber Engineering - From Research to Standards. In *Proceedings of the Conference of Cost Action FP1402*.
75. Cabrero, J. M. (2018). Performance of the Different Models for Brittle Failure in the Parallel-to-Grain Direction for Connections with Dowel- Type Fasteners. *International Network on Timber Engineering Research (INTER) - Meeting Fifty-One, Tallinn (EST)*, 1949, 1–14.
76. Cabrero J., Yurrita M. Performance assessment of existing models to predict brittle failure modes of steel-to-timber connections loaded parallel-to-grain with dowel-type fasteners // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 171. Pp. 895–910.
77. Cabrero, J. M., Honfi, D., Jockwer, R., & Yurrita, M. (2019). A probabilistic study of brittle failure in dowel-type timber connections with steel plates loaded parallel to the grain. *Wood Material Science and Engineering*, 14(5), 298–311. <https://doi.org/10.1080/17480272.2019.1645206>
78. Crocetti, R. (2016). Large-Span Timber Structures. *Proceedings of the World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering*, 1–23. <https://doi.org/10.11159/icsenm16.124>.
79. Chew, A. A., Seri, N. A., Syazni Wan Shaari, W. N., Yasin, M. H., & Hassan, R. (2018). Tensile resistance of GFRP wrapped steel-dowelled half-lap timber connection. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 7(3), 101–104. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.11.15938>.
80. CSA Standard, O86:2009. *Engineering design in wood*. Canadian Standards Association, 2009.
81. DIN EN 1995-1-1: Entwurf, berechnung und bemessung von Holzbauwerken, 12.6.2009
82. Design of timber structures Volumes 1–3 are adapted to Eurocode 5 and the Swedish application rules EKS 10 (BFS 2015:6). 64c.

83. Dorn, M., de Borst, K., & Eberhardsteiner, J. (2013). Experiments on dowel-type timber connections. *Engineering Structures*, 47, 67–80. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.09.010>
84. Dhima, D., Audebert, M., Racher, P., Bouchaïr, A., & Taazount, M. (2014). Shear tests of glulam at elevated temperatures. *Fire and Materials*, 38(8), 827–842. <https://doi.org/10.1002/fam.2226>
85. Domínguez, M., Fueyo, J. G., & Cabezas, J. A. (2017). Accounting of the thread embedment in timber structures dowel-type joints. Load-slip relationship. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 231(1), 150–160. <https://doi.org/10.1177/0954406216663578>
86. Domański, T., & Kmiecik, K. (2019). Load-bearing capacity of the steel-to-timber connections in fire temperature. *MATEC Web of Conferences*, 262, 09005. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201926209005>
87. Dupleix, A., Quenneville, P., Dupleix, A., & Quenneville, P. (2016). Investigating brittle failures in multiple-nail steel-to-timber connections To cite this version: HAL Id: hal-01393719 Investigating brittle failures in multiple-nail steel-to-timber connections.
88. EN-1993 1-1 (2005). Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. 102 c.
89. EN 1995-1-1 (2004): Eurocode 5: Design of Timber Structures — Part 1–1: General — Common Rules and Rules for Buildings. Comité Européen de Normalisation, 2004.
90. EN 383. 2007. Timber Structures – Test methods – Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners.
91. Frühwald E., Serrano E., Toratti T., Emilsson A., Thelandersson S. Design of safe timber structures – How can we learn from structural failures in concrete, steel and timber? Report TVBK-3053 (Technical Report). Division of Structural Engineering, Lund University, 2007. 230 p.
92. Frühwald E. Analysis of structural failures in timber structures: typical causes for failure and failure modes // *Eng. Struct.* 2011. Vol. 33, № 11. Pp. 2978–2982

93. González Fueyo, J. L., Dominguez, M., Cabezas, J. A., & Rubio, M. P. (2009). Design of connections with metal dowel-type fasteners in double shear. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 42(3), 385–397. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9389-3>
94. Gehloff, M., Closen, M., & Lam, F. (2010). Reduced edge distances in bolted timber moment connections with perpendicular to grain reinforcements. 11th World Conference on Timber Engineering 2010, WCTE 2010, 2, 970–977.
95. Gehri E., Mischler A. Multiple shear steel-to-timber joints // Madsen B. Behaviour of Timber Connections. Vancouver, Canada: Timber Engineering Ltd, 2000. Pp. 367–403.
96. Hanhijärvi A., Kevarinmäki A. Design method against timber failure mechanisms of dowelled steel-to-timber connections // CIB-W18 Timber Structures, Bled, Slovenia, 2007. Paper 40-7-3.
97. Hanhijärvi A., Kevarinmäki A. Timber Failure Mechanisms in High-Capacity Dowelled Connections of Timber to Steel: Experimental results and design. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Publications, No. 677. 2008. URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2008/P677.pdf>.
98. JHP Hover. Load carrying capacity of multiple fastener steel to bamboo joints loaded parallel to the fibre direction // Master Thesis - Delft University of Technology - 2017. 294.c
99. Jockwer R., Fink G., Köhler J. Assessment of existing safety formats for timber connections - How probabilistic approaches can influence connection design in timber engineering // International Conference on Connections in Timber Engineering, Austria, 13.09.2017. Pp. 16–31.
100. Jockwer R., Fink G., Köhler J. Assessment of the failure behaviour and reliability of timber connections with multiple dowel-type fasteners // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 172. Pp. 76–84.
101. Jorissen A. J. M. Double shear timber connections with dowel type fasteners: Ph.D. thesis. Delft, 1998. 284 p.



102. Johansen K. W. Theory of timber connections. International Association of Bridge and Structural Engineering, Bern. 1949. Publication No. 9. Pp. 249–262.
103. Kobel, P., Frangi, A., & Steiger, R. (2016). Timber trusses made of European beech LVL. WCTE 2016 - World Conference on Timber Engineering, August.
104. Kroon, M., Andreasson, E., Persson Jutemar, E., Petersson, V., Persson, L., Dorn, M., & Olsson, P. A. T. (2018). Anisotropic Elastic-Viscoplastic Properties at Finite Strains of Injection-Moulded Low-Density Polyethylene. *Experimental Mechanics*, 58(1), 75–86. <https://doi.org/10.1007/s11340-017-0322-y>
105. Limträhandbok Del 1-3. 2016.
106. Malo, K. A., Abrahamsen, R. B., & Bjertnæs, M. A. (2016). Some structural design issues of the 14-storey timber framed building “Treet” in Norway. *European Journal of Wood and Wood Products*, 74(3), 407–424. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1022-5>
107. Misconel, A., Ballerini, M., & Van De Kuilen, J. W. (2016). Steel-to-timber joints of beech-LVL with very high strength steel dowels. WCTE 2016 - World Conference on Timber Engineering.
108. Molina, J. C., Cesar, T. K., de Almeida, C. C., & Pallarolas, E. A. F. F. (2017). Embedment strength of dowels in wood specimens according to ABNT NBR 7190 (1997) and EUROCODE 5 (2004). *Revista Escola de Minas*, 70(1), 9–17. <https://doi.org/10.1590/0370-44672016700044>
109. Ottenhaus, L. M., Li, M., Smith, T., & Quenneville, P. (2018). Mode Cross-Over and Ductility of Dowelled LVL and CLT Connections under Monotonic and Cyclic Loading. *Journal of Structural Engineering (United States)*, 144(7). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002074](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002074)
110. Pedersen M. U. Dowel Type Timber Connections. Strength Modelling: Ph.D. thesis. Danmarks Tekniske Universitet, 2002. 165 p.
111. Quenneville P., Zarnani P. Proposal for the Connection Chapter of the New Zealand Design of Timber Structures. Unpublished, 2017.
112. Quenneville P. J., Franke S., Swagger T. Timber Portal Frames Design Guide – Australia. Christchurch, New Zealand: Structural Timber Innovation Company, 2011.

113. Quenneville P., Zarnani P., Predict analytical model for wood capacity of rivet connections in glulam and LVL // WCTE, New Zealand, 2012. p-10.
114. Rossi S., Crocetti R., Honfi D., Frühwald Hansson E. Load-bearing capacity of ductile multiple shear steel-to-timber connections // Proceeding of WCTE – World Conference on Timber Engineering, 2016. Vienna, Austria.
115. Sawata K., Sasaki T., Kanetaka S. Estimation of shear strength of dowel-type timber connections with multiple slotted-in steel plates by European yield theory // J. Wood Sci. 2006. Vol. 52. Pp. 496–502. <https://doi.org/10.1007/s10086-006-0800-9>.
116. Soltis L. A., Wilkinson T. L. Bolted-connection design. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1987. 21 p.
117. van de Kuilen I. J.-W. Leistungsfähigen Verbindungen für Holzbrücken – Holz-Holz und Holz-Stahl // Internationale Holzbrückentage. 2010. 18 p.
118. Yurrita M., Cabrero J. M. Effective thickness of timber elements for the evaluation of brittle failure in timber-to-steel connections with large diameter fasteners loaded parallel-to-grain at the elastic range: A new method based on a beam on elastic foundation // Engineering Structures. 2020. Vol. 209. Paper 109959.
119. Yurrita, M., Cabrero, J. M., & Quenneville, P. (2019). Brittle failure in the parallel-to-grain direction of multiple shear softwood timber connections with slotted-in steel plates and dowel-type fasteners. *Construction and Building Materials*, 216, 296–313. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.100>
120. Xu, B. H., Bouchaïr, A., Taazount, M., & Vega, E. J. (2009). Numerical and experimental analyses of multiple-dowel steel-to-timber joints in tension perpendicular to grain. *Engineering Structures*, 31(10), 2357–2367. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.05.013>

## ПРИЛОЖЕНИЯ

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Основные технические данные и характеристики тензорезистора PL-90-11

Номинальное электрическое сопротивление	120	
Предельное относительное отклонение электрического сопротивления в партии от номинального	±0,3	
Рабочая область значений температуры	от минус 70 до плюс 80	
Интервал термокомпенсации,	от минус 10 до плюс 80	
Нелинейность функции преобразования при нормальных условиях, $\gamma$ , %	0,5	
Среднее значение чувствительности, К	2,15	
Среднее квадратическое отклонение чувствительности, $S_k$	0,0213	
Среднее значение часовой ползучести при нормальных условиях П, %	0,5	
Среднее квадратическое отклонение часовой ползучести при нормальных условиях, $S_{П}$ , %	0,23	
Среднее значение часовой ползучести при максимальной температуре П <sub>т</sub> , %	1	
Среднее квадратическое отклонение часовой ползучести при максимальной температуре, $S_{Пт}$ , %	0,081	
Коэффициенты аппроксимирующего полинома температурной характеристики $\xi(t) = C_0 + C_1t + C_2t^2 + C_3t^3 + C_4t^4$	$C_0$	-2,98
	$C_1$	2,98
	$C_2$	$-8,48 \cdot 10^{-2}$
	$C_3$	$5,38 \cdot 10^{-4}$
	$C_4$	$-1,14 \cdot 10^{-6}$

Максимальное значение температурной характеристики сопротивления в рабочей области температур $\xi_{tu}$ , млн <sup>-1</sup>	650
Зависимость коэффициента К и деформации от температуры (Рис.)	
Температурная характеристика электрического сопротивления тензорезисторов определена на сталь, коэффициент линейного расширения, °С <sup>-1</sup>	$11,8 \cdot 10^{-6}$
Рабочий ток, не более, мА.	25

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
 Федеральное государственное бюджетное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Санкт-Петербургский государственный  
 архитектурно-строительный университет»  
 (СПбГАСУ)  
 ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, 190005

УТВЕРЖДАЮ  
 декан Строительного факультета,  
 канд. техн. наук, доцент  
 А. Н. Панин  
 «18» марта 2021 г.

## АКТ

использования в учебном процессе материалов кандидатской диссертации  
 «Развитие методов расчета узловых соединений деревянных конструкций из  
 ЛВЛ с применением самонарезающих нагелей» аспиранта кафедры  
 «Металлических и деревянных конструкций»  
 Чан Куок Фонг

Материалы кандидатской диссертации аспиранта кафедры  
 «Металлических и деревянных конструкций» Чан Куок Фонг используются в  
 курсе по дисциплине «Исследование и проектирование деревянных  
 конструкций» при подготовке специалистов по направлению 08.03.01  
 «Строительство» на кафедре «Металлических и деревянных конструкций».

Заведующий кафедрой МиДК  
 д-р техн. наук, профессор

А. Г. Черных

«16» марта 2021 г.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

**«ООО» СТРОИТЕЛЬСТВО NEW SKYLINE***Адрес: Бадон, Вьетнам*

Диссертационный совет Д 212.223.03

**СПРАВКА***О внедрении результатов диссертации Чан Куок Фонг на тему:***«Развитие методов расчета узловых соединений деревянных конструкций из ЛВЛ с применением самонарезающих нагелей»**

Настоящей справкой информируем диссертационный совет Д 212.223.03 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт – Петербургском государственном архитектурно – строительном университете в том, что результаты диссертационных исследований Чан Куок Фонг на тему **«Развитие методов расчета узловых соединений деревянных конструкций из ЛВЛ с применением самонарезающих нагелей»** на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.01 – строительные конструкции, здания и сооружения приняты к использованию в **«ООО» Строительство NEW SKYLINE** для расчета соединения деревянных конструкций на стадии предварительного проектирования.

**«ООО» Строительство New Skyline**

**CÔNG TY TNHH XÂY DỰNG NEW SKYLINE***Đ/c: Thị xã Ba Đồn, Quảng Bình*

Hội đồng khoa học luận án tiến sĩ D 212.223.03

**CHỨNG NHẬN**

*Về việc thực hiện kết quả nghiên cứu luận án tiến sĩ của Trần Quốc Phong với đề tài: “ Phát triển phương pháp tính toán nút liên kết các kết cấu gỗ LVL sử dụng chốt tự khoan”*

Tài liệu tham khảo này thông báo cho hội đồng luận án **D 212.223.03** về việc bảo vệ luận án tiến sĩ và thạc sĩ tại Đại học Kiến trúc và Xây dựng St. Petersburg rằng kết quả tài liệu nghiên cứu của Trần Quốc Phong về đề tài: “*Phát triển phương pháp tính toán nút liên kết các kết cấu gỗ LVL sử dụng chốt tự khoan*” cho mức độ tiến sĩ của khoa học kỹ thuật trong chuyên ngành 05.23.01 – Kết cấu xây dựng, toà nhà và công trình được sử dụng trong công ty **TNHH xây dựng NEW SKYLINE** để tính toán liên kết các công trình bằng gỗ ở giai đoạn thiết kế sơ bộ.

Công ty TNHH xây dựng New Skyline





## ПРИЛОЖЕНИЯ Г

Результаты зависимости смещений соединений (при растяжении вдоль волокон) от нагрузки для схем по определению максимальной нагрузки, упругий рабочий предел.

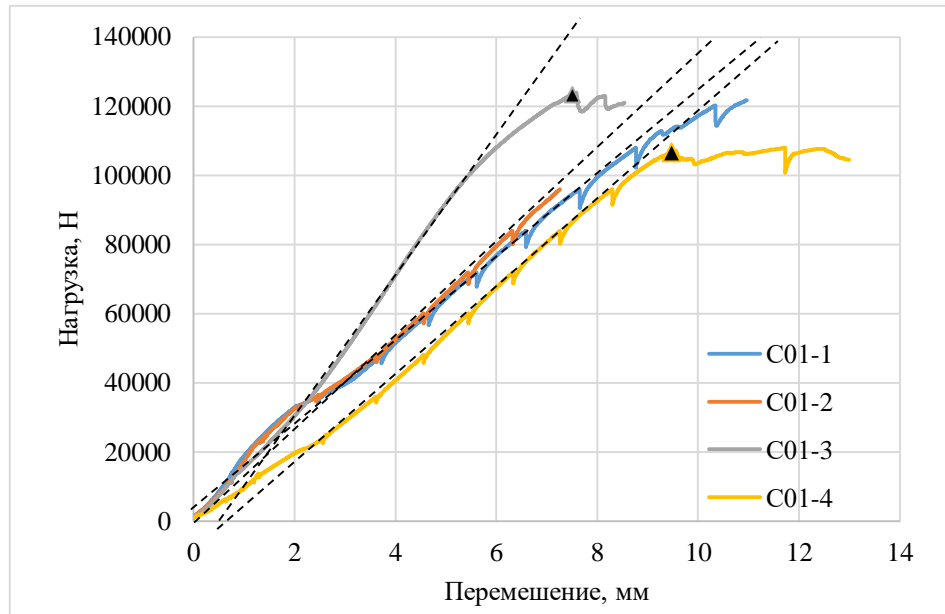


Рис. 1. Зависимость «нагрузка – перемещение» соединений «сталь-дерево» в схемах C01

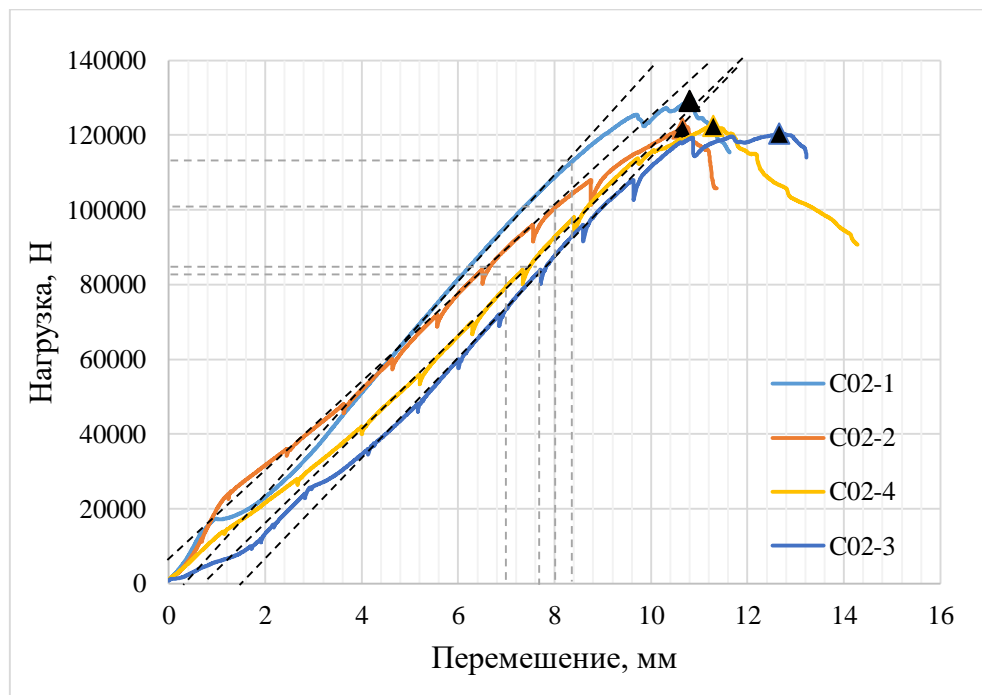


Рис. 2. Зависимость «нагрузка – перемещение» соединений «сталь-дерево» в схемах C02



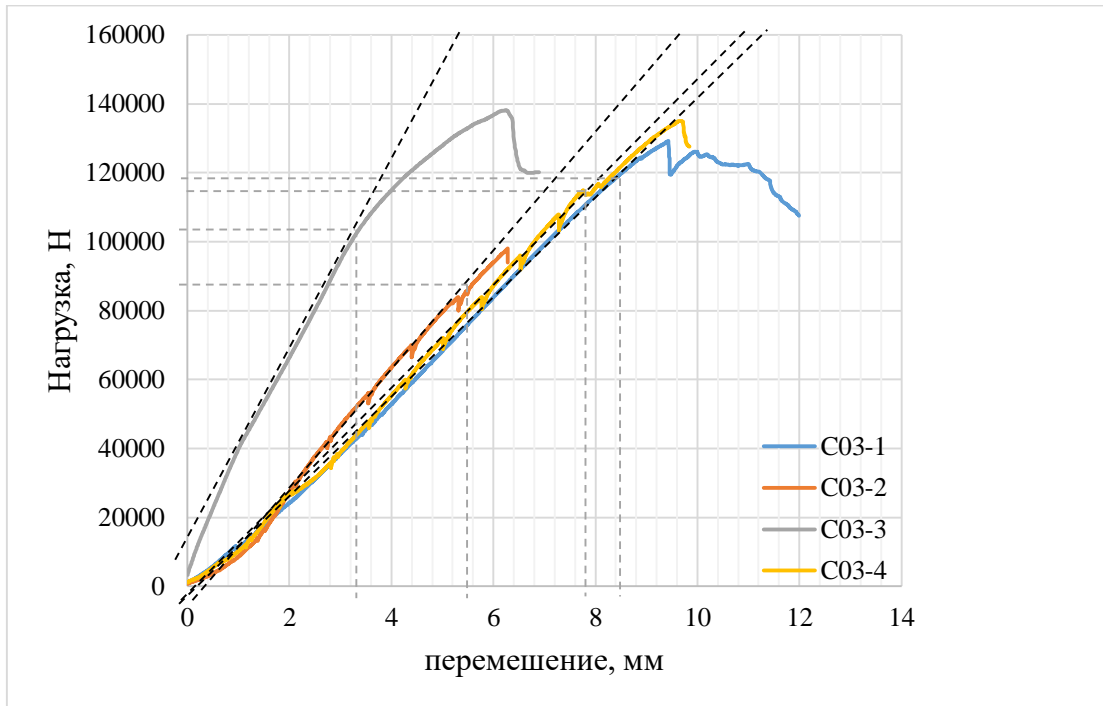


Рис. 3. Зависимость «нагрузка – перемещение» соединений «сталь-дерево» в схемах С03

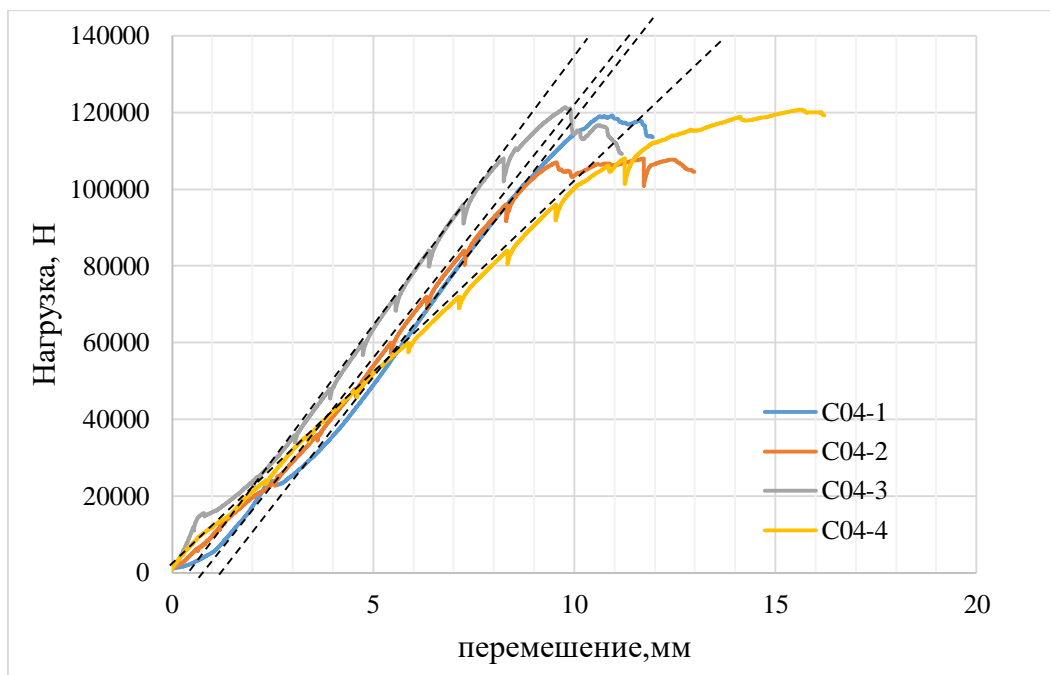


Рис. 4. Зависимость «нагрузка – перемещение» соединений «сталь-дерево» в схемах С04

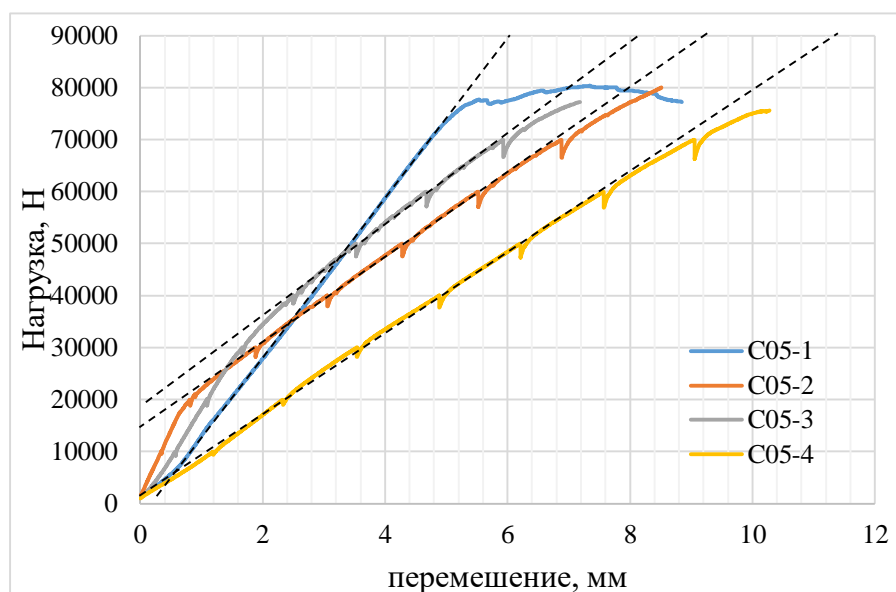


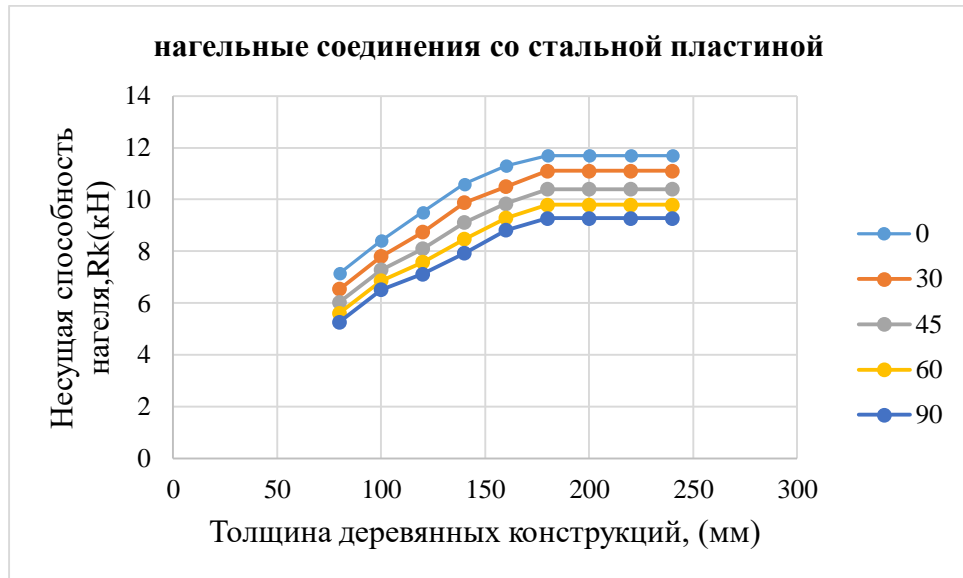
Рис. 5. Зависимость «нагрузка – перемещение» соединений «сталь-дерево» в схемах C05

Экспериментальные результаты определения несущей способности соединения с применением самонарезающих нагелей (принято по среднему значению) и результаты расчета по E05 и СП64.13330.2017.

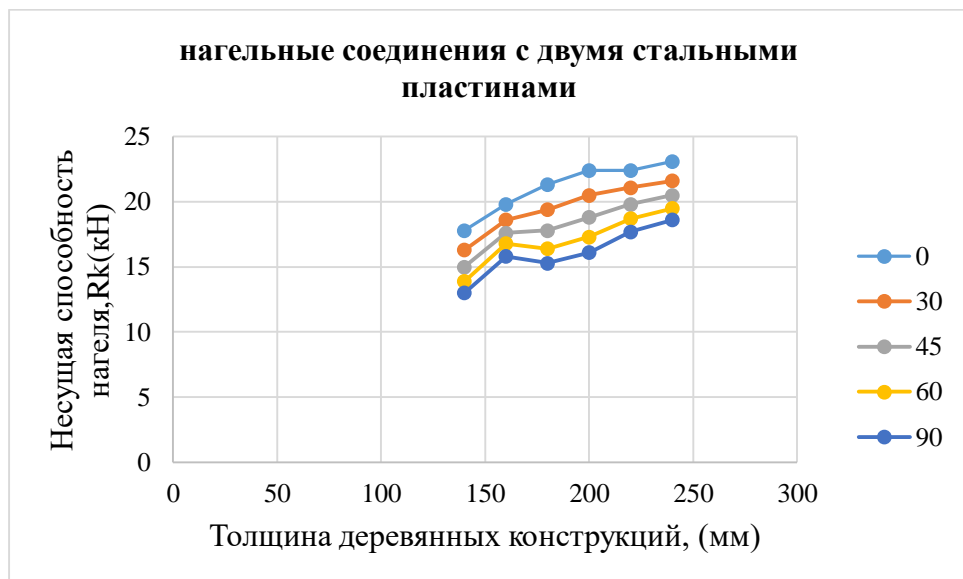
Схема	$F_{\text{деф-2мм}}$ , кН	$F_{\text{max}}$ , кН	$F_{u-E05}$ , кН	$F_{\text{сп}}$ , кН
C01	88,04	122,81	59,34	34,71
C02	101,05	126,75	44,39	38,79
C03	112,65	137,56	47,84	38,57
C04	84,01	113,41	45,30	29,76
C05	67,3	77,63	30,57	29,76

## ПРИЛОЖЕНИЯ Д

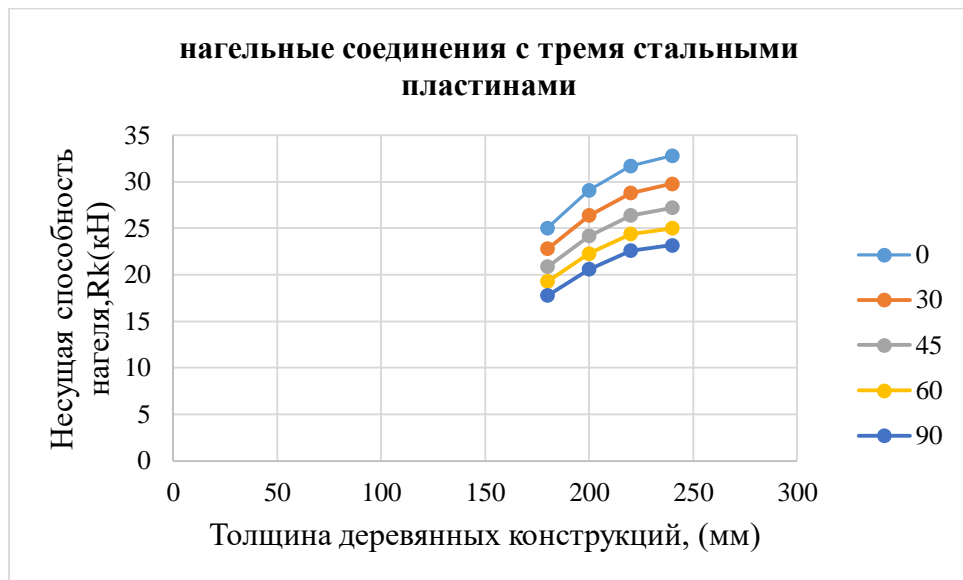
Рекомендуемые варианты соединения с различными размерами  
деревянных элементов из от указания дизайна фабрики



а)

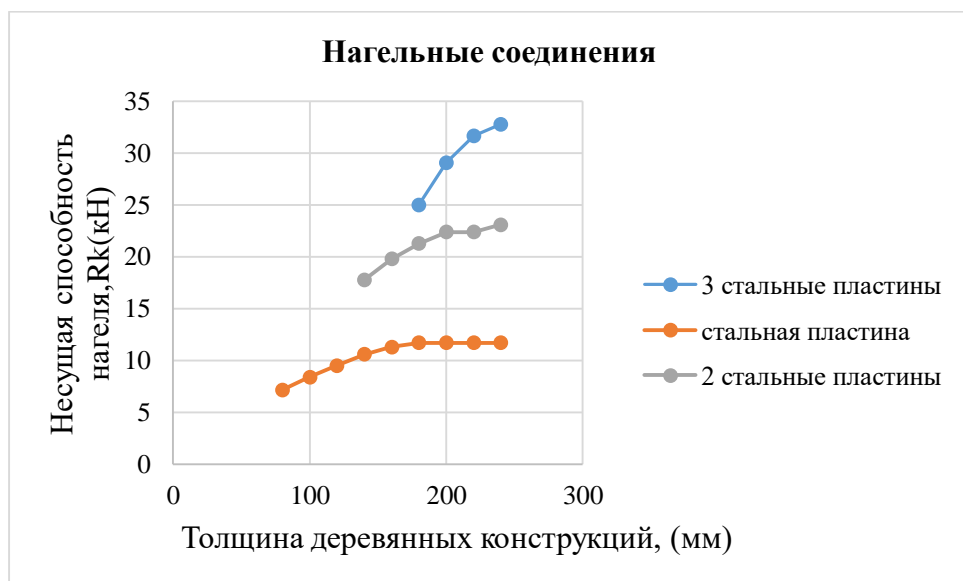


б)



в)

**Рис. 1.** Значение несущей способности нагеля ( $R_k$ ) в зависимости от толщины деревянных конструкций (б) и углом между направлением нагрузки и волокнами деревянных конструкций ( $\alpha$ )



**Рис. 2** Значение несущей способности нагеля ( $R_k$ ) в зависимости от толщины деревянных конструкций и количества стальных пластин в соединении.

Рекомендации по размерам деревянных конструкций в соответствии с длиной нагелей даются от производителя.