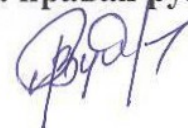


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«ОРЕНБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



**РУДНЕВ Игорь Владимирович**

**УЗЛОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
НА ВКЛЕЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИНАХ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук,  
профессор В.И. Жаданов

Оренбург – 2015

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....		4
1	УЗЛЫ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СО СТАЛЬНЫМИ СВЯЗЯМИ, СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	12
1.1	Общие сведения .....	12
1.2	Отечественный и зарубежный опыт применения стальных элементов в соединениях деревянных конструкций.....	13
1.2.1	Соединения на механических бесклеевых связях.....	13
1.2.2	Соединения на клеенных элементах.....	18
1.3	Особенности расчета узлов на клеенных стальных стержнях...	28
1.4	Пути совершенствования узловых сопряжений деревянных конструкций на клеенных стержнях.....	37
1.5	Выводы по первой главе. Постановка задач исследования.....	42
2	ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВКЛЕЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН В СОЕДИНЕНИЯХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....	45
2.1	Аналитический расчет клеевого соединения на выдергивание в постановке задачи плоской деформации.....	45
2.1.1	История вопроса, основные положения и допущения.....	45
2.1.2	Решение задачи плоской деформации с помощью разложения по функциям Фадля-Попковича.....	51
2.2	Численные исследования напряженно-деформированного состояния клеевого соединения стальных пластин с древесиной.....	61
2.2.1	Построение конечно-элементных параметрических моделей соединения.....	64
2.2.2	Анализ напряженно-деформированного состояния элементов клеевого соединения.....	69
2.3	Основные результаты теоретических исследований.....	72
3	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН С ДРЕВЕСИНОЙ.....	74
3.1	Методика обработки экспериментальных данных и проведения эксперимента .....	74
3.2	Конструкция опытных образцов и материалы соединения .....	80
3.3	Основные результаты экспериментальных исследований.....	85
3.4	Сравнение результатов экспериментальных и численных исследований.....	94
3.5	Выводы по третьей главе.....	97

4	ЧИСЛЕННЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УЗЛОВ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА СТАЛЬНЫХ ВКЛЕЕННЫХ ПЛАСТИНАХ.....	99
4.1	Конструктивные решения узлов деревянных конструкций на вклеенных стальных пластинах.....	99
4.2	Результаты численных исследований особенностей напряженно- деформированного состояния предложенных типов узловых со- единений.....	104
4.3	Экспериментальная оценка работы узловых соединений на вкле- енных пластинах.....	108
4.3.1	Методика экспериментальных исследований натуральных узлов.....	108
4.3.2	Результаты кратковременных испытаний растянутого стыка.....	113
4.3.3	Результаты длительных испытаний растянутого стыка....	115
4.3.4	Результаты испытаний опорного узла.....	120
4.4	Экспериментальная оценка особенностей работы соединений при передаче нагрузки на группу пластин.....	121
4.5	Сравнение теоретических и экспериментальных данных.....	127
4.6	Выводы по четвертой главе.....	128
5	РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ, РАСЧЕТУ И ИЗГО- ТОВЛЕНИЮ СОЕДИНЕНИЙ НА ВКЛЕЕННЫХ ПЛАСТИНАХ И ИХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ.....	129
5.1	Общие положения.....	129
5.2	Конструирование и расчет.....	131
5.2.1	Указания по конструированию.....	131
5.2.2	Указания по расчету.....	135
5.3	Указания по изготовлению соединений.....	138
5.4	Оценка технико-экономической эффективности применения со- единений на вклеенных пластинах.....	139
5.5	Выводы по пятой главе.....	151
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	152
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	155
	ПРИЛОЖЕНИЕ. Справки о внедрении результатов работы.....	172

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность избранной темы.** При применении деревянных конструкций всегда актуальной является проблема создания предпочтительно жестких и, в то же время, компактных, технологичных при изготовлении и монтаже узловых соединений, позволяющих воспринимать значительные усилия. Именно эти требования определяют использование изделий из металла в качестве контактных элементов в сопряжениях проектируемых деревянных конструкций. Особенности проектирования и расчета наиболее распространенных и многократно апробированных типовых соединений с применением стальных изделий, таких как цилиндрические нагели, клеенные стержни, металлические зубчатые пластины, достаточно хорошо изучены / 21, 202, 23, 34, 39, 205, 55, 66, 69, 107, 112 /, а их расчеты приведены в нормативной литературе / 103, 174, 175 /.

Одним из наиболее перспективных практически жестких видов соединений элементов деревянных конструкций являются узлы с наклонно клееными арматурными стержнями / 23, 92, 111, 112 /. В основу конструкции таких узлов положена универсальная схема жесткого стыка, включающая в различной комплектации клеиваемые связи из арматуры периодического профиля, поперечное армирование, стальные закладные детали и ребра жесткости. Несмотря на эксплуатационную надёжность таких соединений (при условии достаточно точного соблюдения параметров соединения при изготовлении) они имеют в той или иной степени ряд конструктивных особенностей, существенно усложняющих технологию изготовления узлов. Также следует отметить необходимость применения сварки после клеивания стержней.

Введение в практику новых типов клеенных элементов, в частности стальных пластин, позволяет решить большинство из очерченных выше проблем, однако, практическое применение таких изделий сдерживается из-за недостатка научных исследований в этой области.



Таким образом, проблема совершенствования узловых соединений деревянных конструкций на клеенных стальных пластинах и разработка методики их расчета не только **актуальна**, но и определяет новизну и общую постановку исследований.

Диссертационная работа выполнена в рамках госбюджетных научно-исследовательских работ кафедры строительных конструкций Оренбургского государственного университета «Проблемы проектирования и усиления строительных конструкций» (номер гос. регистрации №011201000445, код темы по ГРНТИ: 67.11.37.67. 11.41).

**Степень разработанности темы.** Творчество русских инженеров XVII-XIX веков Д.И. Журавского, И.П. Кулибина, И.К. Коробова, А.Д. Захарова и др. легло в основу трудов в области расчетов деревянных конструкций и узлов с применением стальных изделий таких институтов, как ЦНИИСК, ЦАГИ, ВИАМ, ЦНИИМОД, ВИА, АН УССР, МИСИ, ЛИСИ, Сибстрин. Особого внимания заслуживают труды советских и российских ученых В.В. Большакова, В.Ф. Иванова, Г.Г. Карлсена, В.М. Коченова, М.А. Курышева, А.В. Ляшина, В.Н. Маслова, Б.О. Николаи, и позднее В.Ф. Бондина, В.С. Деревягина, П.А. Дмитриева, Е.М. Знаменского, М.Е. Кагана, С.В. Колпакова, Н.Ф. Котова, Ю.В. Слицкоухова, Ю.Д. Стрижакова, Г.А. Цвигмана, В.А. Цапаева, В.Ю. Щуко / 9, 11, 12, 24, 25, 34, 39, 45, 46, 49, 50, 66 120, 121, 127, 129 /.

В настоящее время теоретические и экспериментальные работы в области соединений деревянных конструкций с применением стальных элементов, в том числе клеенных, в России ведутся в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко (НИЦ «Строительство», г. Москва), МГСУ (г. Москва), СПбГАСУ (г. Санкт-Петербург), НГАСУ (г. Новосибирск), ВлГУ (г. Владимир), СФУ (г. Красноярск), Нижегородском ГАСУ, САФУ (г. Архангельск), ПГУАС (г. Пенза) такими учеными как Вдовин В.М., Инжутов И.С., Лабудин Б.В., Линьков В.И., Орлович Р.Б., Погорельцев А.А., Пуртов В.В., Рощина С.И., Серов Е.Н., Турковский С.Б., Шапошников В.Н, Шмидт А.Б и другими / 13, 14, 51, 57, 72, 73, 112, 127 /.

Нормативная методика расчета узлов на клеенных арматурных стержнях, в том числе расположенных под углом к волокнам древесины, предложена в 80-х годах группой ученых под руководством С.Б. Турковского. Узлы «системы ЦНИИСК», рассчитанные по предложенной методике, позволили изготовить ряд уникальных несущих строительных конструкций из клееной и цельной древесины, из которых были построены уникальные большепролетные общественные и производственные здания различного назначения. Для повышения несущей способности также в ЦНИИСК была предпринята попытка испытать соединение, состоящее из арматурных стержней, сваренных в пластину переменной толщины и клеенных в древесину. Однако, несмотря на высокую несущую способность предложенного варианта соединения дальнейшего развития эта идея в практике строительства не получила.

Следует отметить, что в 1964 году в СоюздорНИИ совместно с ЦНИИСК была предпринята попытка клеивать в древесину стальные пластины, но из-за плохой адгезии клея к поверхности стальной пластины эти попытки кончились неудачей. Сведения о дальнейших исследованиях, связанных, например, с развитием поверхности пластин для улучшения адгезии клея с металлом, в доступных источниках отсутствуют.

**Цель работы:** разработка и исследование узловых соединений деревянных элементов на клеенных стальных пластинах с экспериментально-теоретическим обоснованием методики их расчета и проектирования.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие взаимосвязанные **задачи:**

- на основе обобщения и анализа отечественного и зарубежного опыта применения узловых соединений на клеенных стержнях предложить пути их совершенствования и определить направление исследований;

- получить аналитическое решение задачи по определению напряженно-деформированного состояния разработанного соединения при выдергивании клеенной пластины из массива древесины;

- численными методами установить закономерности влияния конструктивных параметров клеенных пластин на их рациональную форму и напряженно-деформированное состояние соединения;
- экспериментальными методами подтвердить адекватность полученного аналитического решения и результатов численных расчетов;
- разработать новые конструктивные решения узловых соединений деревянных элементов на клеенных стальных пластинах;
- выполнить численные исследования напряженно-деформированного состояния предложенных типов узлов с экспериментальной проверкой полученных результатов при действии кратковременных и длительных нагрузок;
- разработать рекомендации по конструированию, расчету и изготовлению предложенных типов узловых соединений деревянных элементов;
- оценить технико-экономическую эффективность разработанных узловых соединений;
- внедрить в строительную практику и учебный процесс результаты выполненной работы.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- разработан новый способ узлового соединения деревянных элементов при помощи клеенных стальных пластин;
- получено аналитическое решение задачи по определению напряженно-деформированного состояния разработанного соединения при выдергивании клеенной пластины из массива древесины;
- определены рациональные параметры клеенных стальных пластин, обеспечивающие их эффективную работу и экономичность;
- разработана конечно-элементная модель узловых соединений на клеенных стальных пластинах с подтверждением ее адекватности, что позволяет оценивать напряженно-деформированное состояние как предложенных соединений, так и более сложных конструктивных систем, запроектированных на основе разработанных узлов;
- установлены закономерности влияния на работу узловых соединений

геометрических и конструктивных параметров стальных клеенных пластин;

- получены новые экспериментальные данные, в достаточно полной мере отражающие действительную работу разработанных конструкций узлов под действием кратковременных и длительных нагрузок.

#### **Теоретическая значимость работы:**

- доказана возможность применения в строительстве соединений деревянных элементов на стальных клеенных пластинах, отличающиеся от известных аналогов эффективностью, как по расходу материалов, так и по трудоемкости изготовления;

- при получении новых результатов эффективно использованы современные численные методы и высокоинформативные экспериментальные методики исследования соединений деревянных конструкций, в том числе методы статистической обработки экспериментальных данных;

- получено аналитическое решение задачи по определению напряжений и перемещений в соединениях на стальных клеенных пластинах;

- изучены закономерности влияния на работу узловых соединений элементов деревянных конструкций геометрических и конструктивных параметров стальных клеенных пластин;

#### **Практическая значимость работы:**

- разработаны и внедрены в практику проектирования новые типы узловых соединений деревянных элементов на стальных клеенных пластинах;

- созданы практическая методика расчета и рекомендации по конструированию и изготовлению предложенных типов узловых соединений;

- представлена оценка технико-экономической эффективности соединений деревянных элементов с применением стальных клеенных пластин.

**Методология и методы диссертационного исследования.** В работе используется экспериментально-теоретический метод. В теоретических исследованиях использованы общие методы строительной механики и теории расчета деревянных конструкций. Физический эксперимент выполнен с использованием современного аттестованного измерительно-вычислительного оборудования

в испытательном центре «Оренбургстройиспытания», а также в лаборатории проблемных испытаний Оренбургского государственного университета, что обеспечило необходимую достоверность полученных результатов.

**На защиту выносятся:**

- новые конструкции узловых соединений деревянных элементов на стальных клеенных пластинах;

- аналитическое решение задачи по определению напряженно-деформированного состояния разработанного соединения при выдергивании клеенной пластины из массива древесины;

- результаты исследования рациональных параметров клеенных пластин, обеспечивающих надежную работу соединений и их эффективность;

- оценка напряженно-деформированного состояния предложенных узловых соединений с учетом геометрических и конструктивных параметров стальных клеенных пластин, проведенная при помощи численных исследований;

- результаты экспериментальных исследований исследуемых типов соединений при кратковременном и длительном действии нагрузок;

- методика расчета и рекомендации по конструированию и изготовлению узловых соединений деревянных элементов на стальных клеенных пластинах, а также результаты их технико-экономической оценки.

**Достоверность полученных результатов** работы обеспечивается использованием обоснованных математических моделей задач строительной механики и теории упругости, представительным объемом экспериментальных исследований (более 700 зачетных опытов) напряженно-деформированного состояния соединений, использованием современного аттестованного измерительно-вычислительного оборудования и лицензионного расчетного программного комплекса, достаточной сходимостью полученных теоретических и экспериментальных данных.

**Апробация полученных результатов.** Результаты выполненных исследований докладывались:

- на Всероссийской научно-методической конференции «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры», Оренбург, 29-31 января 2014 г.;

- на Международной научно-практической конференции «Строительная наука 2014: теория, образование, практика, инновации», посвященная 55-летию ИСиА САФУ, г. Архангельск, 22-23 мая 2014 г.;

- на Международной научно-практической конференции «Интеграции, партнерство и инновации в строительной науке и образовании», МГСУ, г. Москва, 12-13 ноября 2014 г.;

- на Всероссийской научно-методической конференции (с международным участием) «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры», Оренбург, 4-6 февраля 2015 г.;

- на Международной научно-технической конференции «Деревянные конструкции: разработка, исследование, применение», г. Москва, ЦНИИСК им. Кучеренко (НИЦ «Строительство»), 28-30 января 2015 г.;

- на Международной научно-практической конференции «Деревянное домостроение Сибири 2030», г. Красноярск, 22-23 апреля 2015 г.

В законченном виде работа рассмотрена и одобрена на расширенном научном семинаре кафедры строительных конструкций Оренбургского государственного университета, г. Оренбург, 2015 г.

#### **Внедрение результатов работы:**

- предложенные соединения нашли применение в проектах: малоэтажных жилых домов, зданий и сооружений производственного и сельскохозяйственного назначения, складов и стоянок (всего 6 объектов);

- материалы исследований и альбомы рабочих чертежей разработанных конструкций переданы для внедрения по запросу Министерству строительства, жилищно-коммунального и дорожного хозяйства Оренбургской области;

- рабочие чертежи разработанных балок переданы по запросам в строительные организации и проектные институты: ЗАО «Оренбурггражданпроект», ООО «Технология» (г. Оренбург), ОАО «Красноярскгражданпроект»;

- материалы исследований включены в разделы специального курса «Индустриальные деревянные конструкции», которые читаются студентам профилям ПГС и ГСХ ОГУ и ИСИ СФУ (г. Красноярск).

**Личный вклад автора** заключается в решении задач настоящего исследования, проведении экспериментов, анализе и интерпретации полученных результатов, формулировке и разработке всех основных положений, определяющих научную новизну работы и ее практическую значимость.

К числу наиболее важных результатов, полученных лично автором, относятся: выполнение разработок соединений деревянных элементов с применением стальных клеенных пластин; определение способов механической обработки пластин, обеспечивающих необходимую прочность соединения по поверхности «клей-металл»; создание параметрических твердотельных конечно-элементных моделей соединений и конструкций с узлами на клеенных стальных пластинах, позволяющих оценивать их напряженно-деформированное состояние; экспериментальные данные, полученные при статических испытаниях разработанных соединений и узлов; формулировка основных положений методики расчета и рекомендаций по конструированию и изготовлению предложенных узловых соединений.

**Публикации.** Основные положения диссертации опубликованы в 12 печатных работах, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 166 наименований и приложения. Общий объем работы – 176 страниц, в том числе 108 рисунков, 5 таблиц, 5 страниц приложения.

# 1. УЗЛЫ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ СО СТАЛЬНЫМИ СВЯЗЯМИ, СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1 Общие сведения

Зарубежный и отечественный опыт изготовления и применения несущих и ограждающих деревянных конструкций в строительстве показывает их эффективность и экономичность в широком номенклатурном ряде зданий и сооружений по сравнению со стальными и железобетонными.

Известно / 21, 58, 96, 99 /, что применение деревянных конструкций в производственных и сельскохозяйственных зданиях по сравнению с железобетонными позволяет снизить расход стали в 1,5 – 2,5 раза, трудоемкость монтажа снижается до 2,5 раз. Снижение веса здания в 2,0 – 2,5 раза позволяет снизить расходы на транспортировку конструкций в отдаленные сельские районы и активно осваиваемые в настоящее время районы Сибири и Дальнего Востока. Значительный экономический эффект дает применение деревянных конструкций в зданиях и сооружениях со средой различной степени агрессивности, в частности, в бассейнах, в складах минеральных удобрений и реагентов, где продолжительность эксплуатации зданий увеличивается в 2 – 3 раза, а их стоимость снижается на 30 %.

Наиболее эффективно древесина используется в большепролетных зданиях и сооружениях, что обуславливает особую перспективность развития деревянных конструкций в строительстве. В тоже время, с применением большепролетных конструкций актуальным становится вопрос разработки новых узловых соединений, во многом определяющих материалоемкость, прочность, транспортабельность и сборность конструкции в целом.

К основным качественным характеристикам средств соединений, оказывающих наибольшее влияние на эффективность конструктивных решений,



относятся конструктивные, функциональные, технологические и эксплуатационные показатели. Значимость указанных показателей неодинакова и зависит от особенностей строительных конструкций, в связи с чем оценка достоинств и недостатков различных средств соединения по отдельным показателям достаточно условна. Решающее значение имеет комплекс свойств, определяющий в итоге эффективность производимых конструкций. В ходе последующего анализа рассматривается опыт применения стальных элементов в соединениях деревянных конструкций, в том числе с точки зрения их деформационных характеристик, как наиболее важного показателя, определяющего жесткость и эксплуатационную надежность возводимых зданий и сооружений в целом. Особое внимание уделено соединениям с применением стальных клеенных элементов, работающих на растяжение-выдергивание и на сжатие-продавливание, как наиболее приближенным аналогам к выбранной теме исследования.

## **1.2 Отечественный и зарубежный опыт применения стальных элементов в стыках деревянных конструкций.**

Соединения элементов деревянных конструкций с применением стальных деталей по способу передачи усилий подразделяются на две основные группы:

- соединения на механических бесклеевых связях;
- соединения на клеенных элементах.

### **1.2.1 Соединения на механических бесклеевых связях**

Применение соединений на механических бесклеевых связях в стыках деревянных конструкций началось с момента овладения человечеством производства металлических изделий. Передача сил в таких соединениях происходит от одного элемента к другому дискретно, по площади контакта связи и соединяемых деталей. К соединениям со связями, работающим на выдергивание и изгиб относятся соединения на гвоздях, шурупах, глухарях,

болтах, получившие широкое распространение вследствие достаточно простой технологии изготовления, в настоящее время – с применением пневмо- и электроинструмента. На рисунке 1.1 а показана схема соединения на цилиндрических стальных нагелях, используемого в растянутых, сжатых и сжато-изгибаемых стыках. На рисунке 1.1 б – характерная диаграмма испытания соединения на растяжение в координатах «нагрузка-деформация», свидетельствующая о нелинейной зависимости параметров нагружения и податливости соединения.

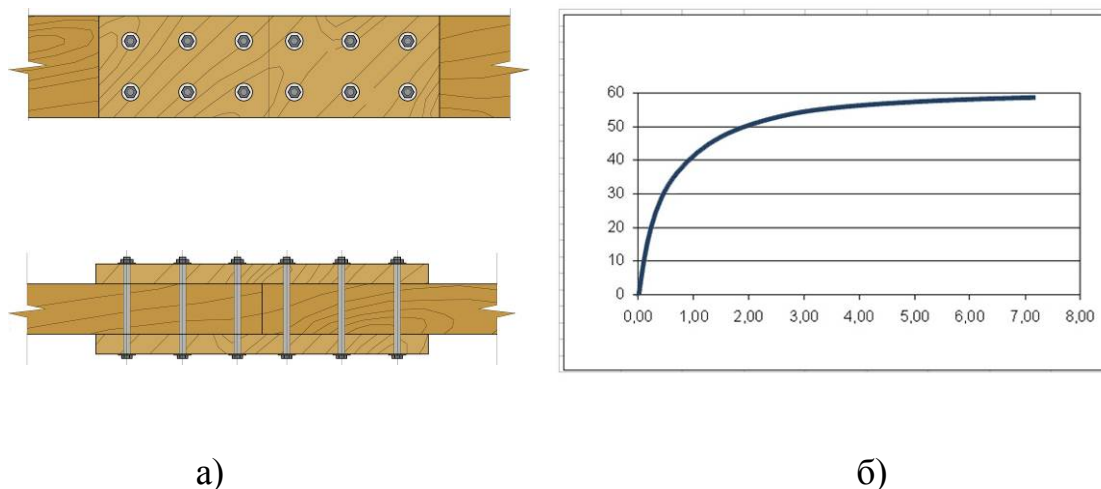


Рисунок 1.1 – Нагельное соединение:  
а) схема соединения; б) диаграмма испытаний на растяжение

В соединениях такого типа, разновидностью которого являются соединения на гвоздях и шурупах, древесина в гнездах работает на смятие, стальные элементы работают на изгиб, а их расчет регламентируется СП «Деревянные конструкции» / 103 /. Нормативная величина деформаций податливого нагельного соединения всех типов при полном использовании его несущей способности в соответствии с таблицей 18 / 103 / принимается в 2 мм. Общими недостатками нагельных соединений являются ослабление сечения несущих деревянных элементов, повышенная податливость, в том числе и за счет рыхлых «нерабочих» деформаций, и значительная ползучесть при длительном нагружении. Следует также отметить, что в зависимости от типа узлового соединения при изготовлении подавляющего большинства стыков

большепролетных конструкций наряду с нагелями используются стальные или деревянные пластины, как неотъемлемая часть соединения.

При изготовлении конструкций со связями, работающими на выдергивание, применяют различные типы гвоздей улучшенного качества: закрученные квадратные, винтовые круглые, комбинированные гвозди и др., более прочных при работе на выдергивание по сравнению с обычными гвоздями. Еще более прочным соединением при работе на выдергивание является соединение на шурупах и глухарях различных типов. Несущая способность на выдергивание практически всех видов шурупов и глухарей определяется срезом древесины под витками нарезки. Нельзя не отметить, что все известные виды шурупов, глухарей и гвоздей диаметром более 6 мм требуют предварительную рассверловку «пилотных» отверстий, что существенно увеличивает трудоемкость монтажных соединений.

Как у нас в стране, так и за рубежом разработаны прогрессивные соединения на стальных витых стержнях / 134, 135, 204 / с большим шагом навивки и различными способами забивки в древесину (рисунок 1.2 а, б).

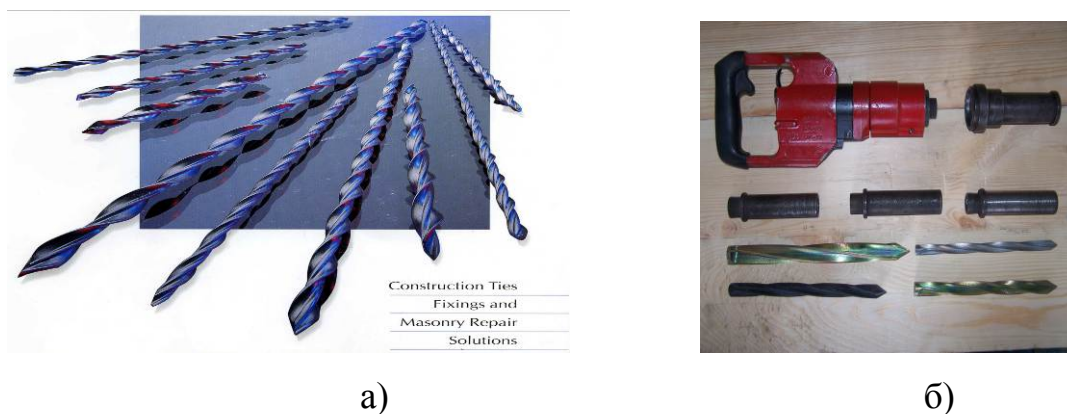
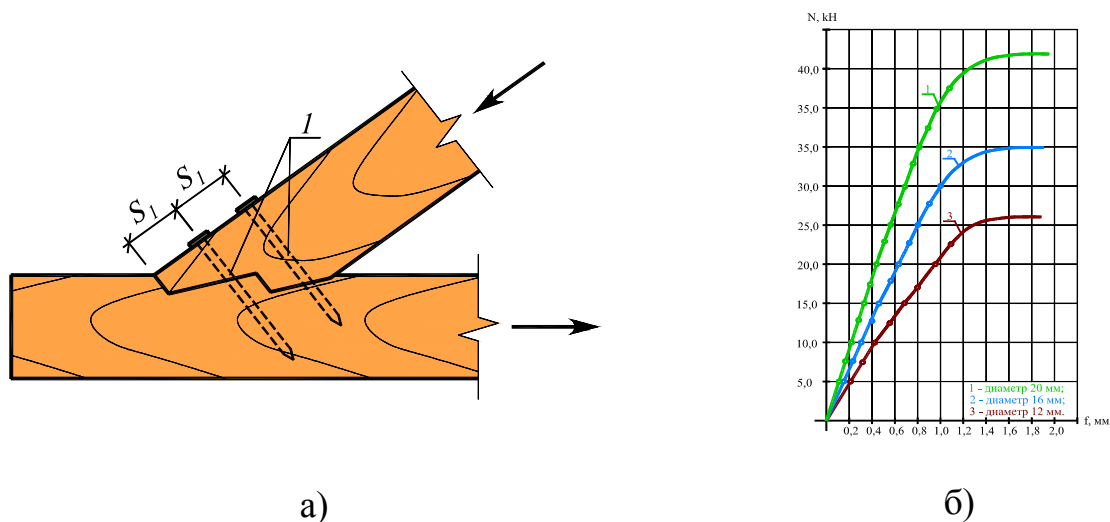


Рисунок 1.2 – Витые нагели с большим шагом навивки:

- а) спиральные стержни HELIFIX (Англия);  
 б) крестообразные витые стержни (ОГУ, Россия)

Деформативность соединений со связями этого класса снижена за счет отсутствия предварительной рассверловки отверстий, а витая форма ребер с повышенным шагом навивки позволяет воспринимать значительные усилия выдергивания. Однако, по результатам исследования соединений на витых

крестообразных стержнях в Оренбургском государственном университете /160, 167, 169/, отнести их к соединениям жесткого типа не представляется возможным. На рисунке 1.3 приведен общий вид и характерные графики деформирования узловых соединений на витых крестообразных стержнях.

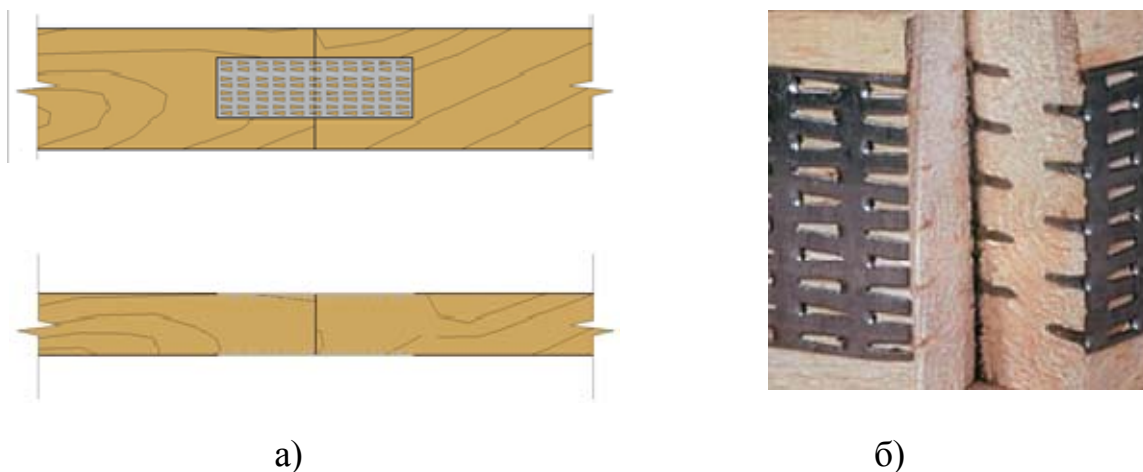


а) общий вид; б) характерные графики деформирования узлов

Рисунок 1.3 – Соединения на витых крестообразных стержнях:

Во второй половине XX века широкое распространение получили узловые соединения на металлических зубчатых пластинах (МЗП). За границей наиболее популярны МЗП системы Ганг-Нейл, разработанные в США, а в нашей стране со времен СССР применялись соединения типа МЗП-1,2 и МЗП-2, которые были разработаны ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. На этих основах разработкой зубчатых пластин собственной конструкции занимались производители МЗП в Швеции, Финляндии, Венгрии и других странах. На рисунке 1.4 показано соединение на МЗП, конструкция зубчатой пластины которого постоянно совершенствуется, позволяя расширять область применения.

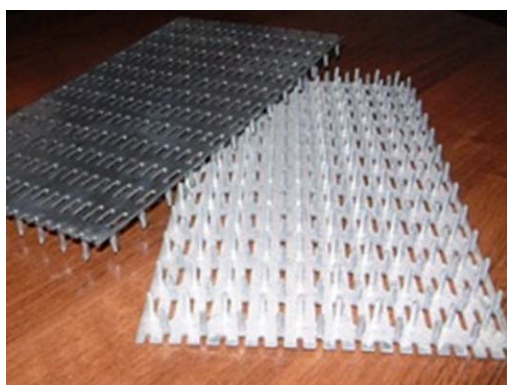
В отличие от нагелей, расчетная несущая способность которых нормируется для одного нагеля, расчетная несущая способность пластин принимается на  $1 \text{ см}^2$  поверхности. Это объясняется тем, что прочность и деформативность соединения, помимо работы каждого зуба, зависит от



а) общий вид; б) разрез

Рисунок 1.4 – Соединение на МЗП:

неравномерности восприятия усилий зубьями, расположенными по мере удаления от стыка; от деформаций перфорированной поверхности пластины, особенно при наличии угла между продольной осью пластины и направлением усилия; от дополнительного изгибающего момента, который возникает из-за несимметричного расположения зубьев относительно усилия, что объясняется различным шагом зубьев вдоль и поперек пластины. Помимо несущей способности соединения, пластинка проверяется на прочность перфорированной поверхности на растяжение и на срез. Расчетная несущая способность при растяжении и расчетная несущая способность при срезе принимается на 1 см ширины сечения и на 1 см длины срезаемого сечения, соответственно, в зависимости от угла между продольной осью пластины и направлением усилия.



а) зубчатая пластина;



б) ферма на МЗП

Рисунок 1.5 – Соединения на металлических зубчатых пластинах

На рисунке 1.5 показан внешний вид металлической зубчатой пластины и фрагменты ферменных конструкций пролетом 12,0 м, с соединениями на МЗП. Несмотря на некоторое снижение податливости соединения по сравнению с нагельными, нормативная величина деформаций соединения на металлических зубчатых пластинах, расчет которых также представлен в /103/, составляет 1,5 мм при условии длины пластины с одной стороны стыка не менее 200 мм. Сознвая перспективность данного вида соединения, кроме имеющейся угловой и линейной податливости, которую необходимо учитывать при проектировании конструкций, к основным недостаткам узлов на МЗП можно отнести их относительно низкую несущую способность, огнестойкость и заводскую технологию запрессовки пластин в древесину, требующую наличия специального прессового оборудования и высококвалифицированного персонала.

Следует отметить, что податливость и, как следствие, повышенная деформативность, как отдельных узлов, так и проектируемых конструкций в целом является главным недостатком всех вышеприведенных способов соединения деревянных элементов на бесклеевых связях.

### **1.2.2 Соединения на клеенных элементах**

С появлением промышленных клеев, обладающих рядом универсальных качеств, а именно: пониженной токсичностью, пожаро- и взрывобезопасностью, повышенной водо- и атмосферостойкостью, возможностью склеивать различные материалы, – началось активное применение клеевых композиций в стыках деревянных конструкций в сочетании с более прочными материалами, такими как сталь. При этом соединения деревянных элементов при помощи клеенных в древесину стальных деталей исключают один из существенных недостатков рассмотренных выше соединений – наличие податливости и позволяют получать практически жесткие стыки.

В Пензенском государственном университете архитектуры и строительства под руководством профессора В.М. Вдовина ведутся работы

по повышению несущей способности и жесткости узлов соединения деревянных элементов за счет применения клеенных стальных шайб, посредством которых напряжения от соединительных болтов передаются древесине / 13, 14, 77 /. Такая передача происходит преимущественно через напряжения смятия, которые перераспределяются в балочном элементе на большую площадь, чем сама шайба, что соответственно приводит к снижению локальных напряжений смятия и скалывания и, как следствие, к увеличению несущей способности узла. Наличие клееного соединения древесины с клееной шайбой существенно снижает податливость соединения элементов деревянных конструкций, но не устраняет ее полностью.

Одним из наиболее эффективных видов соединения элементов деревянных конструкций является устройство стыков с помощью клеиваемых в древесину стальных стержней из арматуры периодического профиля, работающих на выдергивание и на выдергивание с изгибом. Перспективность использования таких соединений уже доказана практикой отечественного и зарубежного строительства.

По сравнению со стыками на механических связях узлы на стальных клеенных в древесину стержнях имеет ряд преимуществ:

- высокую прочность и жесткость, вследствие образования плотного соединения стержня с древесиной через клеевую прослойку и усиления деревянных элементов материалом стержня;
- клеенные стержни защищены от внешнего воздействия среды и быстрого нагрева при пожаре, что значительно повышает огнестойкость и коррозионную стойкость конструкции в целом;
- соединение позволяет наиболее полно использовать прочностные характеристики соединяемых материалов.

Соединение с помощью клеиваемых стальных стержней может использоваться для сращивания сжатых, растянутых и изгибаемых элементов, как в продольном направлении, так и под углом друг к другу. Ряд исследований, проведенных в ЦНИИСКе / 17, 18, 33, 36, 40, 68-70, 102, 113 /,

СоюздорНИИ / 78 /, НИСИ / 8-14, 22, 66. 116 / и других организациях в 60-70-е годы прошлого века, показали эффективность использования данного вида соединения в деревянных конструкциях. Так, по данным Н.Д. Поспелова / 81 / расход металла на такие стыки для пролетных строений мостов в раз 10 меньше, чем на стыке в виде нагельных соединений и клеестальных шайб.

Первый опыт практического применения стальных стержней для усиления деревянных конструкций относится к началу 20 века. В 20-х годах американский инженер А. Клайтила предложил использовать стальную проволоку для армирования несущей деревянной балки в конструкциях летательных аппаратов, а армировать балки и колонны клееными стальными стержнями в строительных конструкциях впервые предложил А. Фишер (Германия) в 1926 г. / 128 /.

Первые экспериментальные исследования соединений элементов деревянных конструкций на территории бывшего СССР с помощью клеиваемых стержней, работающих на выдергивание – продавливание, были проведены в лабораториях СоюздорНИИ и ЦНИИСКА / 81 /. Так, в 1967 году при клеивании стержней периодического профиля на основе эпоксидных смол были получены достаточно прочные соединения (рисунок 1.6), способные нести нагрузку наряду с цельной древесиной.

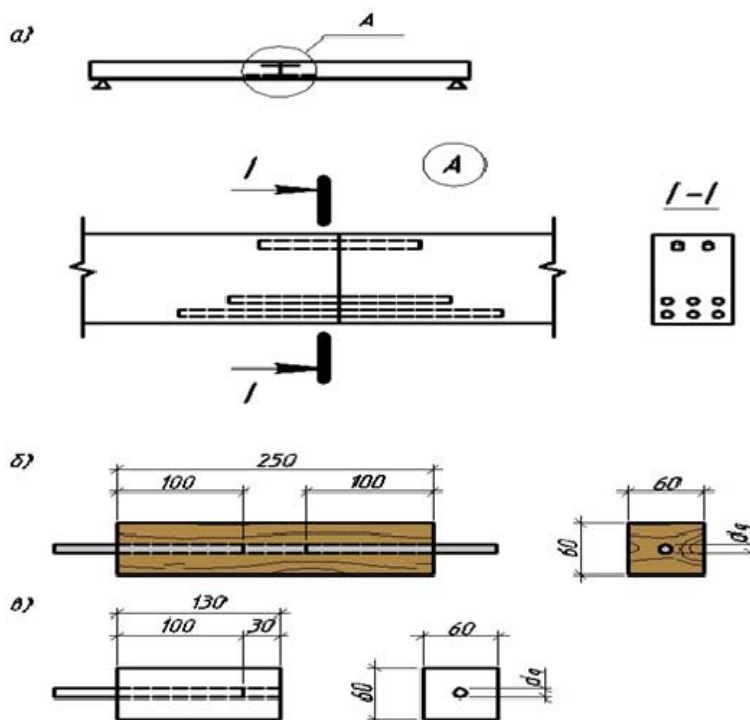
В этот период в СоюздорНИИ Н.Д. Поспеловым был проведен ряд исследований с целью определения влияния различных факторов на работу соединения. В частности, исследовалось влияние таких факторов, как: загрязнение поверхности арматуры, наличие гладкой или рифленой поверхности стержня, антисептирование древесины, глубина заделки стержня, толщина клеевой прослойки, направление волокон, длительность и кратковременность нагрузки.

Проведенные испытания показали, что антисептирование древесины и загрязнение арматуры периодического профиля практически не влияют на прочность клеевого соединения стержня с древесиной. Отмечено наличие более высокой прочности соединения при вдавливании стержней в древесину,



чем при выдергивании. Исследования также показали хорошую выносливость стыка при многократно повторяющейся нагрузке.

Вопрос равнопрочности соединения при вклеивании гладкой арматуры класса А-I и арматуры периодического профиля был более детально исследован Ю.Б. Вылегжаниным / 19 /. Данные исследований показали, что прочность соединения с арматурой периодического профиля в 1,5 – 2 раза выше, чем у образцов с гладкой арматурой.



а) схема стыка изгибаемой балки; б) размеры образцов при испытании на растяжение; в) размеры образцов при испытании на сжатие

Рисунок 1.6 – Соединения, исследованные в СоюздорНИИ:

Большой комплекс исследований соединений на вклеенных стальных стержнях был проведен в НИСИ им. В.В. Куйбышева П.А. Дмитриевым, В.Ф. Бондиным, С.В. Колпаковым / 9-12, 25, 26, 47 /. В работе В.Ф. Бондина и Ю.Б. Вылегжанина / 11, 12, 19, 20 / установлена зависимость прочности клевого соединения стержня с древесиной от целого ряда факторов: длины, диаметра, поверхности стержня, формы паза, схемы испытаний при кратковременной и для ряда образцов при длительной нагрузке. Вклеивание осуществлялось вдоль волокон древесины. Определена оптимальная длина вклеенной части стержня

/ 19 /. При вклеивании двух и более стержней получен коэффициент условий работы, равный 0,85, учитывающий факторы, влияющие на неравномерность загрузки стержней. Приводятся данные по определению влияния температуры и влажности воздуха на напряженно-деформированное состояние клеевого соединения.

Решена одномерная задача о распределении напряжений сдвига по длине клеевого соединения стального стержня с древесиной в зависимости от упругих материалов и геометрических размеров. Решение получено в предположении, что соединяемые материалы работают в упругой стадии, распределение нормальные напряжений в поперечном сечении арматуры и древесины принято равномерным, материал древесины изотропным.

В ходе проведенных исследований сотрудниками НИСИ им. В.В. Куйбышева разработан ряд узлов с применением вклеенных в древесину стержней. На рисунке 1.7 показан стык арки с использованием фланцевого соединения. Арматурные стержни перед вклейкой привариваются к фланцам, которые при сборке арок скрепляются болтами. Стык рекомендуется устраивать с минимальным изгибающим моментом. Передача перерезывающей силы за счет тупого шипа в виде клина в одном блоке, входящего в паз другого. Жесткость стыка из плоскости арки обеспечивается двумя парными накладками на болтах. Положительными качествами данного вида соединения является то, что арматурные стержни вклеены параллельно продольным осям клееных блоков арки и расположены на их боковых гранях в верхней и нижней зоне. Это позволяет не выходить за пределы контурного габарита арки и облегчает укладку кровельных щитов, дает возможность контролировать качество вклейки.

С целью увеличения транспортабельности и сборности трехшарнирных клееных рам, собираемых из прямолинейных элементов, там же были разработаны сборный и неразборный карнизный узлы сопряжения ригеля и стойки (рисунок 1.8 а, б) и варианты армированного опорного узла двухшарнирной рамы с использованием вклеенных стержней (рисунок 1.9).

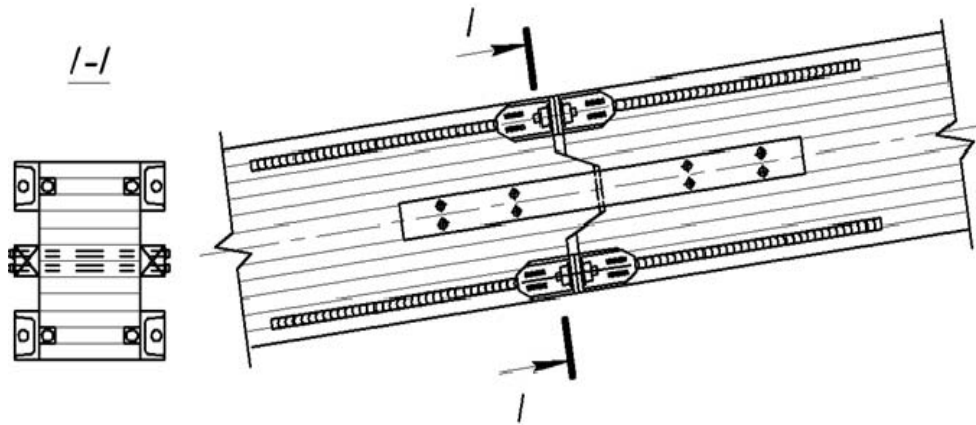
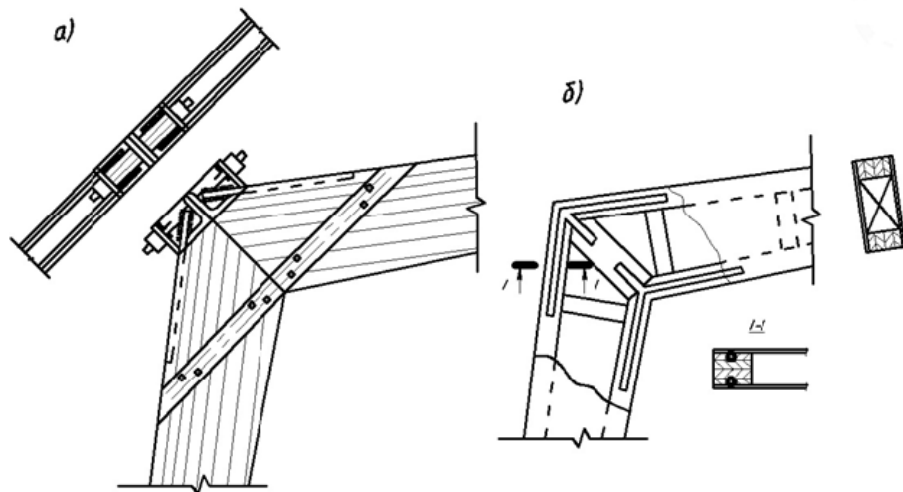


Рисунок 1.7 – Узел арки на вклеенных стальных стержнях с применением соединения (разработка НИСИ им. В.В. Куйбышева)



а) сборный узел; б) неразборный узел

Рисунок 1.8 – Карнизные узлы рамы на вклеенных стержнях (разработка НИСИ им. В.В. Куйбышева)

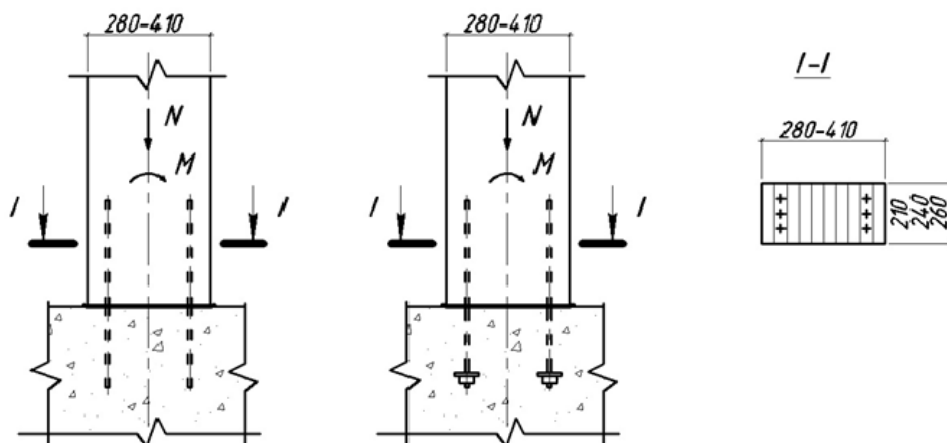


Рисунок 1.9 – Варианты армированного опорного узла двухшарнирной рамы

Растягивающие усилия в карнизном разборном узле воспринимаются арматурными стержнями, вклеенными в пазы на наружных гранях клееных поясов ригеля и стойки. Применение данного узла позволяет резко сократить габариты перевозимых рам и арок.

На рисунке 1.10 показано решение узла фермы треугольного очертания с применением вклеенных стержней. Усилие от сжатого примыкающего деревянного элемента передается на опорную пластину, которая заранее приваривается к вклеенным стержням. Данное клеевое соединение стержня с древесиной работает на сдвиг и вдавливание.

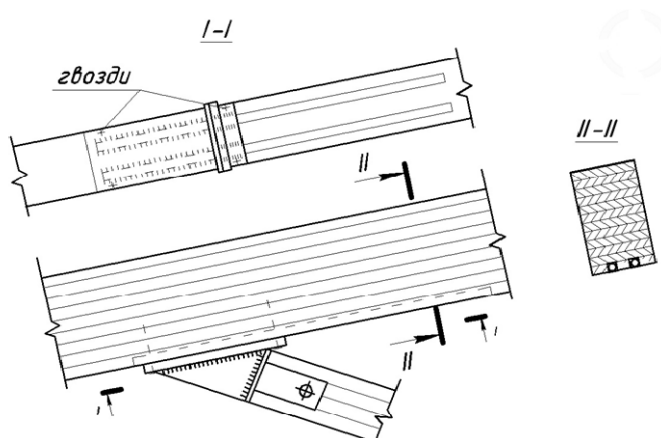


Рисунок 1.10 – Узел сопряжения раскоса и верхнего пояса фермы треугольного очертания с применением вклеенных стальных стержней

В лаборатории деревянных конструкций ЦНИИСК А.К. Шенгелия и Л.В. Касабьян / 40, 125 / провели исследования двух вариантов изгибаемого стыка на вклеенных стержнях с использованием фланцев и муфт (рисунок 1.11, 1.12). В первом соединении, разработанном в ПИ-1, фланцы крепились к вклеенным стержням, имеющим на концах резьбу, с помощью гаек. Стягивание фланцев между собой производилось за пределами поперечного сечения деревянных элементов на шпильках. Для фиксации расстояния между фланцами на шпильки надевались отрезки трубы. Весь узел омоноличивался полимербетоном. Соединение на фланцах оказалось не технологичным при сборке из-за отклонения геометрических параметров. Второе соединение элементов деревянных конструкций позволяет исключить эксцентricность

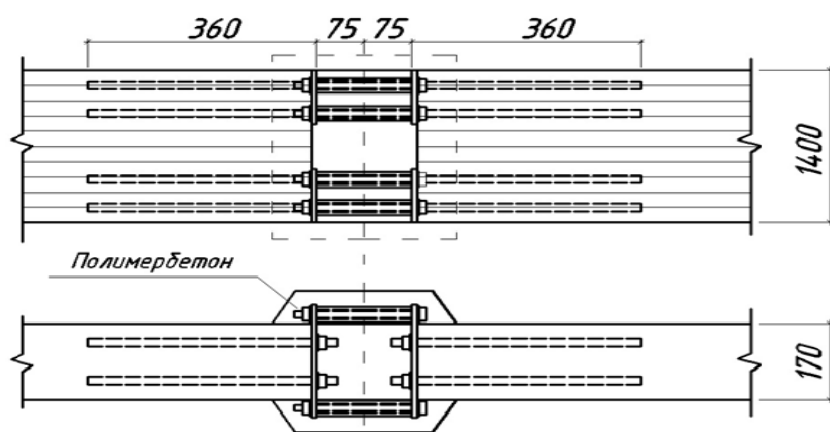


Рисунок 1.11 – Фланцевое соединение изгибаемого стыка на клеенных стержнях (разработка ПИ-1)

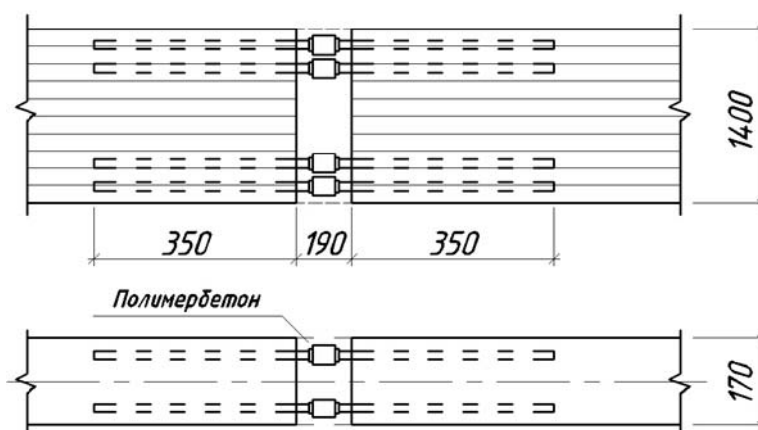


Рисунок 1.12 – Изгибаемый стык на муфтах с использованием клеенных стержней (ЦНИИСК им В.А. Кучеренко)

передачи нагрузки и осуществить его в пределах поперечного сечения соединяемых элементов. Соединение стыкуемых элементов производилось с помощью полумуфт, которые крепились гайками к клееным стержням, имеющим на концах резьбу. Монтажный зазор между деревянными элементами замоноличивался полимербетоном.

Испытания соединения проводились на деревянных образцах прямоугольного сечения по балочной схеме пролетом 8,00 м с одновременным приложением поперечных изгибающих и продольных сжимающих сил. Испытания показали, что разрушение обоих соединений начиналось с зон омоноличивания полимербетоном с дальнейшим разрывом шпилек в первом случае и срезом муфт во втором. Растягивающие напряжения при расчетной

нагрузке были меньше и составляли 35 % для штырей и 29,5 % для шпилек, во втором случае 27 % для штырей от теоретических. Причиной снижения явилось влияние омоноличивания полимербетоном. Замер деформаций древесины наклеенными электротензорезистором вблизи стыка показал, что наибольшие значения напряжений приходятся на сжатую зону / 40 /. Соединение с помощью муфт, предложенное ЦНИИСКом им. В.А. Кучеренко, по сравнению с соединением с помощью фланцев и шпилек, является более экономичным и обладает конструктивными и технологическими преимуществами при практически одинаковой несущей способности.

В работе И.Г. Овчинниковой (ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко) / 70 / также исследовалось влияние поверхности стержня на прочность соединения. Вклеивались стержни из арматуры периодического профиля диаметром (d) 0,014 м классов А-Ш и АІ-УІ на глубину от 10d до 20d и стержни гладкой арматуры диаметром 0.018 м и марки СТ-45 на глубину 10 d и 20 d. Кроме этого, изменялась толщина клеевой прослойки между стержнем и древесиной и составляла 0.0015; 0,0035; 0,0075 м для диаметра 0,014 м с глубиной заделки 10 диаметров. Испытания показали, что вклеивание стержней с гладкой поверхностью приводит к более низкой границе упругой стадии работы соединения. Разрушение происходит от среза смолы в контактном слое с арматурой, что также подтверждается экспериментальными исследованиями других авторов / 11, 81 /. Толщина клеевой прослойки сказалась только на характере развития смещений стержня, уменьшение при увеличении толщины от 0,0015 до 0,0075 м, но не на величину разрушающей нагрузки, что дает основание говорить о более жесткой работе на сдвиг эпоксидного компаунда по сравнению с древесиной. Состав компаунда: эпоксидная смола марки ЭД-5 100 в.ч., отвердитель ПЭПА 10 в.ч., цемент 100 в.ч.

Получены решения для нахождения нормальных, касательных напряжений и перемещений по длине стержня в линейной постановке с применением гиперболических функций.

Проведенные И.Г. Овчинниковой испытания соответствуют схеме «выдергивание с упором», так как стержни выдергивались стержневым домкратом, устанавливаемым на торец деревянного блока, что не может не сказаться на общей картине напряженно-деформированного состояния всего соединения в целом. Длина вклеенных стержней варьировалась в небольшой области от  $10 d$  до  $20 d$ . Для математической аппроксимации использованы одни и те же зависимости, что и при выдергивании стержней из бетона, по заключению автора, на основании подобия эпюр распределения нормальных и касательных напряжений по длине клейки стержня. Однако, на наш взгляд, такой подход нельзя распространять на другие виды соединений, учитывая характер и область проведенных испытаний.

И.Г. Овчинниковой (ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко) совместно с Е.Н. Акатовой (ГипроНИсельхоз) / 71 / разработаны и испытаны фермы трапециевидной формы пролетом 21,0 м с раскосной решеткой на вклеенных стержнях. Соединение раскосов с поясами (рисунок 1.13) производится с помощью стержней из арматуры периодического профиля диаметром 0,014 м, вклеенных в просверленные в древесине отверстия на эпоксидном компаунде ЭПЦ-1.

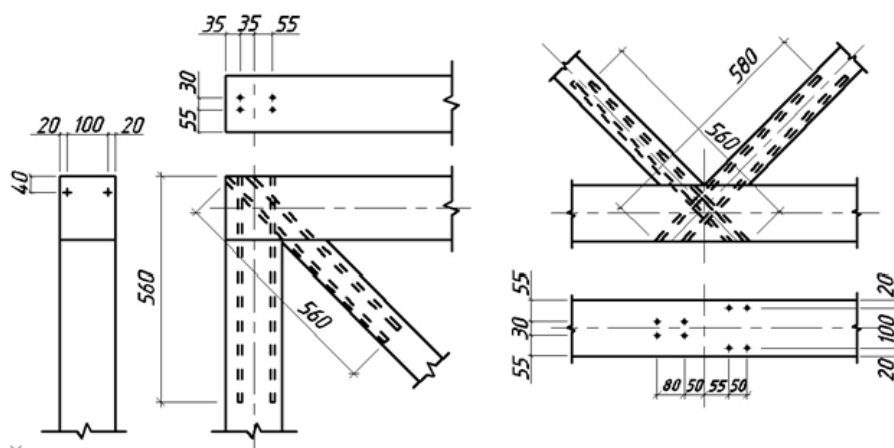


Рисунок 1.13 – Узлы фермы трапециевидной формы пролетом 21 м на вклеенных стержнях (разработка ЦНИИСК и ГипроНИсельхоз)

В 1987 году в СИБСТРИНе И..П. Пинайкиным под руководством С.В.

Авторы с некоторым допущением рассматривают вклеенные стержни как работающие на растяжение, так как ферма рассчитывалась как система с

жесткими узлами и внецентренной передачей усилий с раскосов на пояса. Колпакова разработаны конструктивные решения опорных узлов колонн на арматурных стержнях, вклеенных в древесину поперек волокон / 78 /. В работе исследованы влияние длины заделки и диаметра вклеенного стержня на несущую способность соединения, а также выявлено взаимное влияние стержней на напряженно-деформированное состояние соединения с несколькими стержнями.

Там же в 1992 году Б.И. Евдокимовым под руководством В.Ф. Бондина исследована работа соединений на вклеенных стержнях в изгибаемых и растянутых стыках, разработана математическая модель, описывающая напряженно-деформированное состояние клеевого соединения древесины со стержнем при работе на сдвиг, учитывающая прочностные и деформационные характеристики применяемых материалов.

### **1.3 Особенности расчета узлов на вклеенных стальных стержнях**

Нормативная методика расчета узлов на вклеенных стальных стержнях предложена в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко группой ученых под руководством С.Б. Турковского. Она была разработана в связи с внедрением в практику отечественного строительства системы узловых соединений на вклеенных стержнях, названной впоследствии «системой ЦНИИСК» / 111, 112 /. Основные положения методики были проверены многочисленными экспериментальными исследованиями. Ниже приведен анализ расчетных алгоритмов узлов на вклеенных стальных стержнях, проведенный на базе данных, предоставленных автору в лаборатории деревянных конструкций ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко (НИЦ «Строительство»).

Первые испытания жесткого стыка балки на наклонно вклеенных стержнях, послужившие основой для разработки расчетной методики, были проведены в 1975 году (рисунок 1.14), а практическое применение стыков осуществлено в конце 70-х годов / 112 / при строительстве главного корпуса пионерлагеря (сейчас дома отдыха) в п. Липки в Подмосковье (рисунок 1.15).



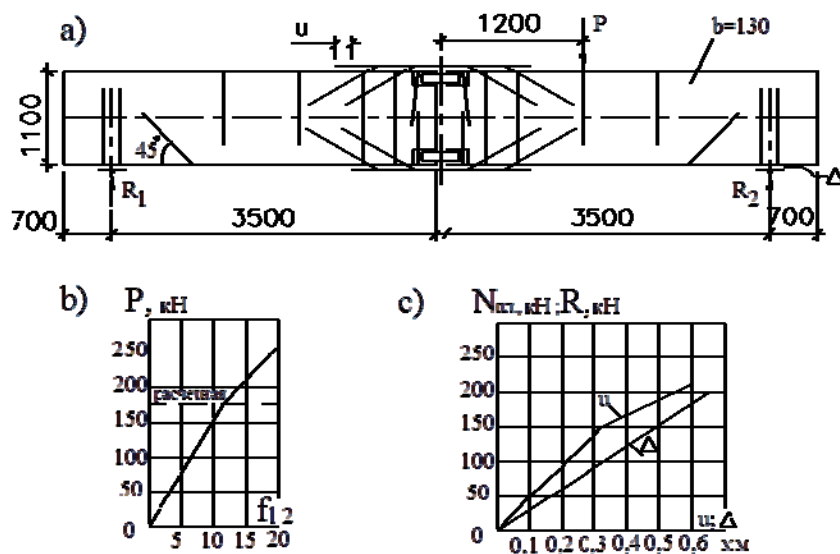


Рисунок 1.14 – Испытания балки со стыком системы ЦНИИСК:  
а) схема испытания; б) прогибы в середине пролета; в) деформации в стыке и на опоре



Рисунок 1.15 – Купол со стыками на клеенных стержнях

Узлы «системы ЦНИИСК» основываются на работе клеенных в древесину арматурных стержней периодического профиля преимущественно класса А300-А600 на сжатие-продавливание и на растяжение-выдергивание. Расчетную несущую способность клеиваемого под углом к волокнам стержня на выдергивание или продавливание в стыках клееных деревянных конструкций следует определять по формуле, приведенной в / 103 /:

$$T = R\pi d l_p k_c k_{\sigma} m d \leq F_a R_a, \text{ МН}, \quad (1.1)$$

где  $R = 4,0$  МПа — расчетное сопротивление древесины выдергиванию или продавливанию клеенного стержня;

$d_l$  — диаметр отверстия, м, принимается по 7.33 / 103 /;

$l_p = l - l_o \leq 25d$  — расчетная длина стержня, м;

$l$  — длина заделываемой части (глубина клеивания);

$l_o = 3d$  — глубина возможного снижения прочности клеевой прослойки при сварке; для стержней без сварки  $l_o = 0$ ;

$d$  — диаметр клеиваемого стержня, м;

$k_c$  — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения напряжений сдвига в зависимости от длины заделываемой части стержня, который следует определять по формуле  $k_c = 1,2 - 0,02 l_p/d$ ;

$k_\sigma$  — коэффициент, зависящий от знака нормальных напряжений вдоль волокон в зоне установки стержней;

$m_d$  — коэффициент, учитывающий зависимость расчетного сопротивления от диаметра стержня, определяемый по формуле  $m_d = 1,12 - 10d$ ;

$F_a$  — площадь сечения стержня;

$R_a$  — расчетное сопротивление материала стержня.

Для стержней, работающих на выдергивание в зоне растягивающих напряжений, действующих вдоль волокон древесины элемента конструкции, значения коэффициента  $k_\sigma$  следует определять по формуле  $k_\sigma = 1 - 0,01 \sigma$ , где  $\sigma$  — максимальные растягивающие напряжения, МПа.

При работе в сжатой зоне, а также для стержней, работающих на продавливание,  $k_\sigma = 1$ .

Разработанный универсальный стык (рисунок 1.16) позволил научно-инженерному центру «Строительство» под руководством С.Б. Турковского и А.А. Погорельцева / 110-112 / запроектировать, а затем на Российских предприятиях изготовить ряд уникальных несущих строительных конструкций из клееной и цельной древесины, из которых в дальнейшем были построены общественные и производственные здания различного назначения.

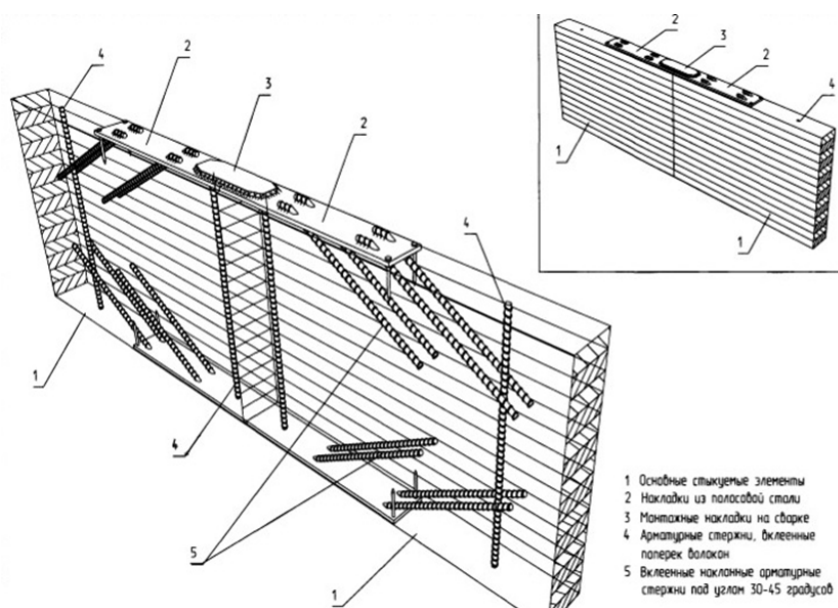


Рисунок 1.16 – Универсальный стык системы ЦНИИСК

Следует отметить, что стыки нижних поясов ферм, подвесных систем и др. работают на самое неблагоприятное для древесины сочетание усилий: либо на растяжение, либо на растяжение с изгибом, не предполагающим появления сжатой зоны (по всему поперечному сечению действуют только напряжения растяжения различной величины). Стыки системы ЦНИИСК предполагают возможное применение двух типов растянутых узлов, а именно:

- со стержнями, работающими на растяжение вклеенными в одном направлении;
- со стержнями, вклеенными под углом друг к другу (с V-образными анкерами).

И в том и в другом случае вклеенные стержни объединены стальными стыковыми деталями – пластинами – по верхней и нижней грани стыкуемых элементов. Кроме этого, рядом с ближним к стыку наклонно вклеенному стержню вклеивается поперечный стержень, воспринимающий усилие сжатия. Усилия в стыковых деталях от продольной силы  $N$  и изгибающего момента  $M$  равны:

$$N_{cd} = N / 2 \pm M / h_0, \quad (1.2)$$

где  $N_{cd}$  – усилие растяжения в детали стыка;

$h_0$  – расстояние между осями деталей стыка.

Далее растянутые стыки нижних поясов ферм рассчитываются по следующей методике.

На рисунке 1.17 а, б приведены расчетные схемы узлов со стержнями, вклеенными в одном направлении. Усилие растяжения, действующее в детали стыка, раскладывается на усилия растяжения во вклеенных стержнях  $N_p$  и усилие сжатия перпендикулярно поверхности контакта детали стыка с древесиной  $N_c$ .

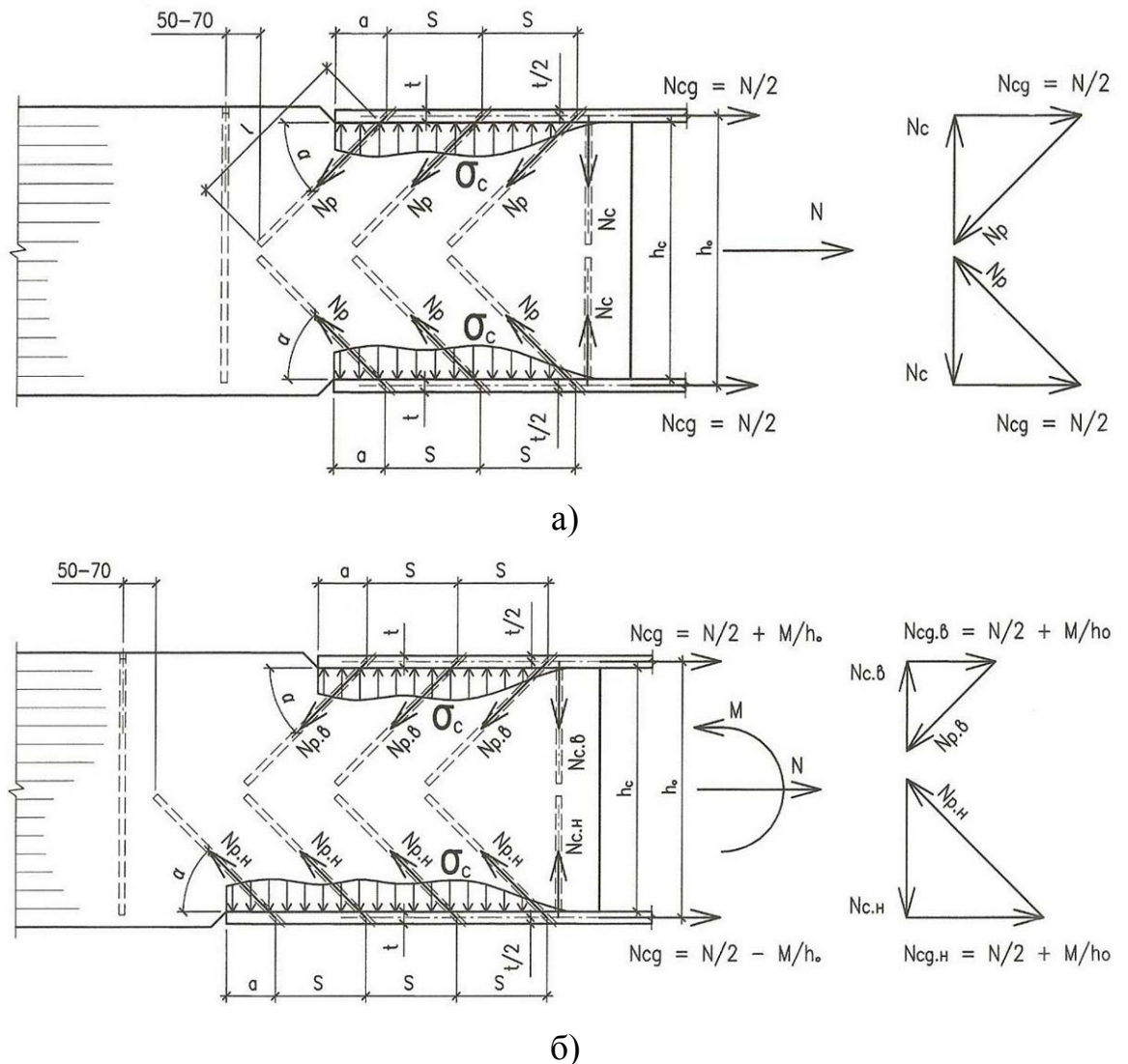


Рисунок 1.17 – Расчетная схема стыков с стержнями, вклеенными в одном направлении:

а) растянутого (симметричного) стыка; б) растянутого-изгибаемого (несимметричного) стыка

Расчёт узла со стержнями, вклеенными в одном направлении, заключается в проверке несущей способности наклонно вклеенных стержней на выдёргивание, поперечно вклеенных стержней на продавливание и древесины на смятие поперёк волокон под стальной стыковой деталью.

Наклонно вклеенные стержни проверяются на выдёргивание. Максимальное усилие растяжения в стержне  $N_p$  равно:

$$N_p = N_{сд} / (n k_{с.р} \cos\alpha) \leq T_p, \quad (1.3)$$

где  $n$  – количество наклонно вклеенных стержней;

$k_{с.р}$  – коэффициент совместной работы;

$\alpha$  – угол наклона вклеенных стержней;

$T_p$  – расчётная несущая способность на выдергивание стержня, вклеенного под углом к волокнам, вычисляемого по формуле (1.1).

Поперечно вклеенные стержни проверяются на продавливание силой  $N_c$ :

$$N_c = N_p \sin\alpha \leq T_c, \quad (1.4)$$

где  $T_c$  – расчётная несущая способность на продавливание стержня, вклеенного под углом к волокнам.

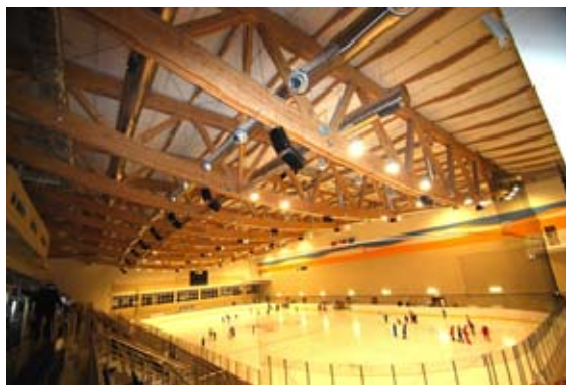
Древесина проверяется на смятие по контакту с деталью стыка от силы  $N_c$  по площади контакта, относящейся к одному наклонно вклеенному стержню. Ширина площади смятия  $F_{см}$  принимается равной ширине детали стыка. Длина площади смятия принимается меньшей из двух параметров:  $2a$  и  $S$ .

$$N_c / F_{см} \leq R_{см.90} \quad (1.5)$$

где  $R_{см.90}$  – расчётное сопротивление древесины смятию поперёк волокон в опорных частях конструкций.

На рисунке 1.18 показаны клеедеревянные стропильные фермы пролетом 72,0 и 48,0 м дворца спорта в Строгино, элементы нижнего пояса которых соединены жестким растянутым стыком на стержнях, вклеенных в одном направлении.





а)



б)

Рисунок 1.18 – Клеедеревянные стропильные фермы на стыках системы ЦНИИСК в Строгино:

а) пролетом 72,0 м над ледовой площадкой; б) пролетом 48,0 м над бассейном



Рисунок 1.19 – Ванты пешеходного перехода на МКАД, элементы которых соединены жестким растянутым стыком на вклеенных V-образных анкерах

Растянутые и растянуто-изгибаемые узлы с V-образными анкерами, примененные, в частности, при соединении элементов вант пешеходного перехода на 102 км МКАД (рисунок 1.19) рассчитываются в целом аналогично, с учетом того, что усилие растяжения в детали стыка-пластине, раскладывается на усилия растяжения  $N_p$  и сжатия  $N_c$ , возникающих во вклеенных стержнях V-образных анкеров (рисунок 1.20, 1.21).

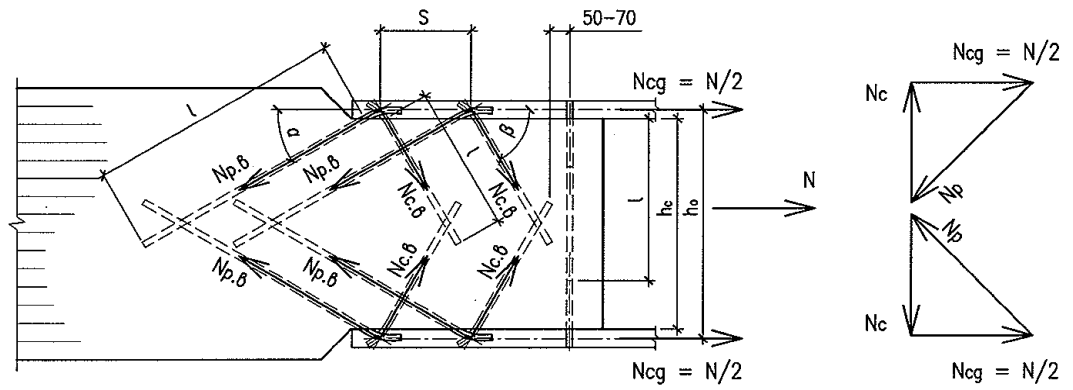


Рисунок 1.20 – Расчетная схема симметричного растянутого стыка со вклеенными V-образными анкерами

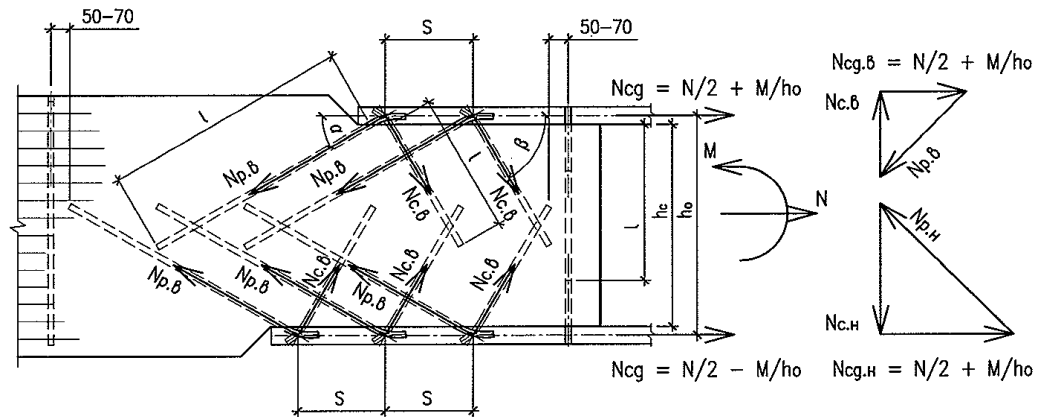


Рисунок 1.21 – Расчетная схема несимметричного растянуто-изгибаемого стыка со вклеенными V-образными анкерами

Максимальное усилие, приходящееся на один анкер  $N_a$ , равно:

$$N_a = N_{c\delta} / (n k_{c.p}), \quad (1.6)$$

где  $n$  – количество V-образных анкеров;

$k_{c.p}$  – коэффициент совместной работы.

Усилия  $N_p$  и  $N_c$  определяются из равновесия узла:

$$\begin{aligned} N_a &= N_p \cos \alpha + N_c \cos \beta \\ N_p \sin \alpha &= N_c \sin \beta, \end{aligned} \quad (1.7)$$

где  $\alpha$  – угол наклона вклеенного стержня, работающего на растяжение, к оси детали стыка;

$\beta$  – угол наклона вклеенного стержня, работающего на сжатие, к оси детали стыка.

Решим систему уравнений и получим:

$$\begin{aligned} N_p &= N_a / (\cos\alpha + \sin\alpha / \operatorname{tg}\beta) \leq T_p, \\ N_c &= N_a / (\cos\beta + \sin\beta / \operatorname{tg}\alpha) \leq T_c, \end{aligned} \quad (1.8)$$

где  $T_p$  и  $T_c$  – расчётные несущие способности на выдёргивание и продавливание стержней, вклеенных под углом к волокнам. При  $\alpha = \beta = 45^\circ$  усилия в стержнях  $N_p = N_c = N_a / (2 * \cos 45^\circ)$ .

Конструктивное решение изгибаемых стыков с имеющейся сжатой зоной и сжато-изгибаемых стыков основывается на восприятии сжатия либо лобовым упором при применении в растянутой зоне стержней, вклеенных в одном направлении, или V-образных анкеров, либо постановкой V-образных анкеров, как в сжатой, так и в растянутой зоне. Расчет таких стыков проводится по методике, приведенной выше. На рисунках 1.22, 1.23 приведены конструктивные решения зданий, несущие сжато-изгибаемые элементы которых соединены универсальными стыками системы ЦНИИСК.



Рисунок 1.22 – Купол Новосибирского аквапарка



Рисунок 1.23 – Склад калийных солей Санкт-Петербургского морского порта



#### **1.4 Пути совершенствования узловых сопряжений деревянных конструкций на клеенных стержнях**

Несмотря на универсальность стыков на клеенных стальных стержнях и их практическое применение в качестве конструктивных решений множества общественных и производственных зданий различного назначения при их проектировании, расчете и изготовлении имеется ряд условных недостатков, а именно:

- отсутствуют теоретические сведения о влиянии угла наклона поперечных выступов арматурных стержней к ее оси на прочность клеевого соединения при выдергивании, что не позволит гарантированно применять новые типы арматуры;

- применение в стыках разноплановых стальных элементов (арматурных стержней, пластин) снижает технологичность стыка и не позволяет в полной мере унифицировать его детали, что в целом влияет на стоимость изготовления стыка;

- при наличии в сечении стыка поперечной силы требуется поиск дополнительных конструктивных решений для ее восприятия;

- неразъемность стыков в определенной мере снижает их область применения.

Кроме этого, по имеющимся теоретическим и экспериментальным данным / 9, 19, 78 /, значение напряжений в стержне по длине клеенной части стержня снижается к глухому торцу клейки, что, с одной стороны, позволяет оптимизировать геометрическую форму стержня. С другой стороны, такая оптимизация не даст значительного экономического эффекта при существующем решении стыка на клеенных стержнях из арматуры периодического профиля.

Поиск путей совершенствования соединений элементов деревянных конструкций жесткого типа с точки зрения повышения технологичности, унификации элементов соединения, на основании теоретических и экспериментальных данных продолжился и после апробации стыка системы

ЦНИИСК. Так в 80-х годах прошлого века автором стыка С.Б Турковским была предпринята попытка испытать соединение, состоящее из арматурных стержней, сваренных в пластину переменной толщины, вклеенных в древесину. Опытный инженер предполагал, что использование пластины в качестве соединительного элемента соединения откроет большие перспективы по повышению технологичности изготовления стыка и монтажа конструкций. При испытаниях относительная несущая способность соединения оказалась соизмерима с несущей способностью отдельных арматурных стержней.

Следует отметить, что в 1964 году была предпринята попытка вклеивать в древесину стальные пластины, но из-за плохой адгезии клея к поверхности стальной пластины эти попытки кончились неудачей. Сведения о дальнейших исследованиях, связанных, например, с развитием поверхности пластин для улучшения адгезии клея с металлом, в доступных источниках отсутствуют.

В 2012 году профессор П.А. Дмитриев предложил возобновить исследования по созданию соединений элементов деревянных конструкций на вклеенных в древесину стальных пластинах, разработав при этом конструктивные решения стыков, один из которых приведен ниже (рисунок 1.24).

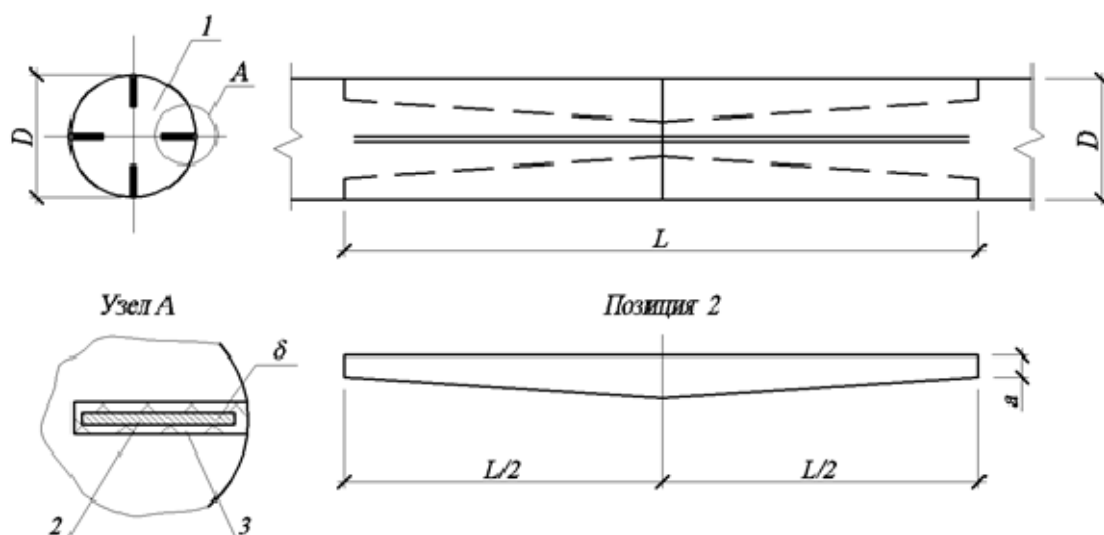


Рисунок 1.24 – Конструктивное решение стыка растянутого элемента:

1 - бревенчатый элемент; 2 – металлическая пластина;

3 – клеевая композиция

Для подтверждения работоспособности такого стыка, а также в связи с отсутствием экспериментальных данных о деформативности и прочности соединений на клеенных стальных пластинах с предварительно подготовленными поверхностями, автором были проведены натурные испытания / 161, 162, 164 / на образцах, показанных на рисунке 1.25. Между



Рисунок 1.25 – Образцы для испытаний, подготовленные для заливки клеем (а) и общий вид испытательной установки (б)

брусками, изготовленными из древесины сосны 2-го сорта влажностью 12%, в средней части вставлялись деревянные вкладыши толщиной 10 мм. В полученные пазы соосно устанавливались стальные пластины из стали С235 сечением 5x50 мм с зазором в свету между поверхностями пластины и брусков в 2,5 мм (толщина слоя клеевой композиции), который обеспечивался применением калиброванных вставок. Толщина слоя клеевой композиции принималась с учетом указаний норм п. 7.33 /103/ для клеиваемых стержней круглого сечения. Нижняя и торцевые поверхности образца предварительно ограждались заглушками из листовой фанеры для предотвращения вытекания клея. Перед установкой пластины протирались ветошью и обезжиривались техническим спиртом. После заполнения пазов клеевой эпоксидной композицией ЭПЦ-1 полученные образцы выдерживались в нормальных условиях не менее 72 часов, после чего заглушки снимались. Для уменьшения деформативности клеевого соединения по плоскости «клеевая композиция-металл» поверхности стальных пластин были подвержены трем типам механи-

ческой обработки (рисунок 1.26), а именно:

- нанесением на строгальном станке V-образных надрезов глубиной и шириной 1 мм с шагом 1 мм перпендикулярно продольной оси пластины;
- аналогичных диагональных взаимно перпендикулярных надрезов;
- фрезерованных на вертикально фрезерном станке с противоположных сторон пластин прямоугольных пазов глубиной 1 мм шириной 10 мм с шагом 10 мм в шахматном порядке.

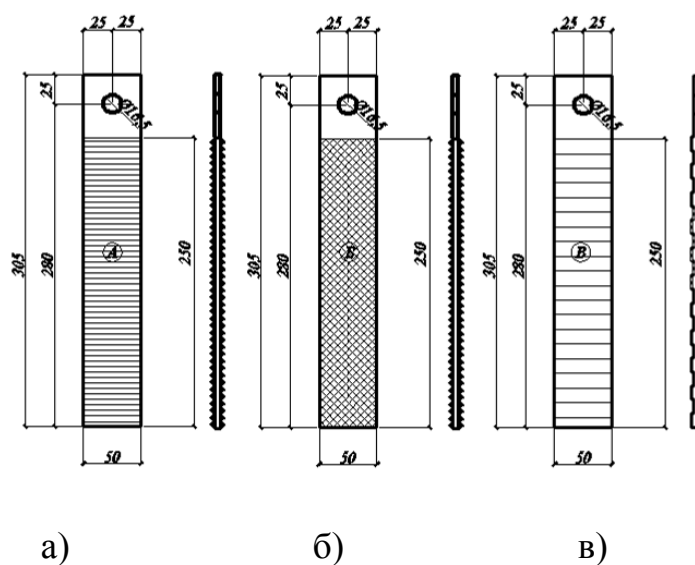


Рисунок 1.26 – Типы механической обработки поверхности пластин:

- а) V-образные надрезы, перпендикулярные продольной оси пластины;
- б) V-образные диагональные взаимно перпендикулярные надрезы;
- в) прямоугольные кососимметричные пазы

На свободных участках пластин имелись отверстия диаметром 16,5 мм с центрами, расположенными по оси симметрии образца.

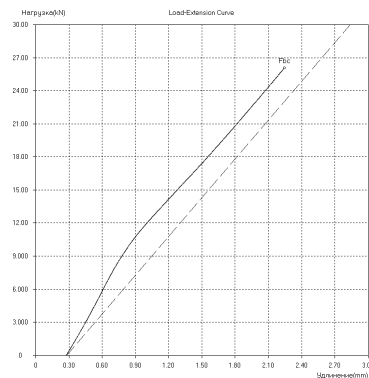
Свободные концы пластин устанавливались в клиновидные захваты испытательной машины ИР 5082-100 (рисунок 1.25 б).

В серии из шести образцов разрушение двух образцов произошло в результате нормального отрыва клеевого соединения по поверхности «сталь - клеевая композиция» от бруска с последующим доломом противоположенного деревянного бруска. Характер разрушения образца (рисунок 1.27 а) свидетельствует о наличии эксцентриситета, возникшего в

результате дефекта изготовления – отсутствии параллельности между плоскостями элементов соединения. Эксцентриситет после достижения нагрузки в 10 кН вызвал появление в образце сложного напряженно-деформированного состояния, в том числе, растяжения с изгибом в сечениях брусков. При этом изменился характер деформации соединения в целом, о чем свидетельствует диаграмма испытаний (рисунок 1.27 б), записанная после предварительного натяжения образца до величины 0,3 мм.



а)



б)

Рисунок 1.27 – Характер разрушения (а) и диаграмма испытания (б) образца с эксцентриситетом

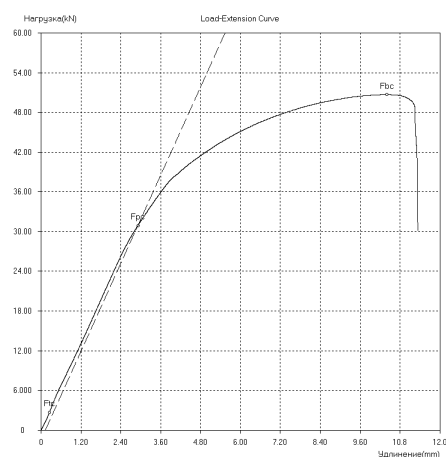
Разрушение остальных образцов произошло по ослабленному отверстию сечению в захватах образца. Этот факт объясняется устройством клиновидных захватов, более плотно обжимающих пластину у торцов пластин за отверстиями.

Разрушение стальной пластины, показанное на рисунке 1.28 а, а также диаграмма испытаний в координатах «нагрузка - удлинение» (рисунок 1.28 б) характерны для испытаний малоуглеродистой стали. При этом каких-либо признаков сдвиговых деформаций и разрушений в клеевом соединении не обнаружено, что, по мнению автора, определяет перспективность применения такого рода соединений с точки зрения их несущей способности.

Проведенный комплексный анализ показывает необходимость разработки нового вида соединения деревянных элементов с применением



а)



б)

Рисунок 1.28 – Характер разрушения образцов по сечению пластины, ослабленному отверстием, (а) с диаграммой испытания (б)

вклеенных стальных пластин, позволяющих увеличить технологичность стыков и унифицировать детали соединения, обеспечивающего при этом как восприятие значительных расчетных усилий, так и сокращение трудозатрат и общей стоимости при выполнении узлов деревянных конструкций в сравнении с известными аналогами.

### 1.5 Выводы по первой главе. Постановка задач исследования

Оценивая результаты проведенных в России и за рубежом опытно-конструкторских разработок и экспериментально-теоретических исследований соединений деревянных конструкций с применением стальных соединительных элементов, можно сделать следующие выводы.

1. Стальные элементы, применяемые в соединениях деревянных конструкций, определяют прочность, жесткость и эксплуатационную надежность широкого класса стыков и узлов и широко используются в строительной практике. При этом, до сих пор имеются резервы совершенствования конструктивных решений таких соединений за счет применения новых типов соединительных элементов.

2. Усовершенствование соединений на бесклеевых механических связях приводит к незначительному снижению деформативности соединений, однако полностью исключить податливость соединения такого рода не удастся.

3. Не вызывает сомнения целесообразность применения в узлах и стыках деревянных конструкций жестких соединений на стальных клеенных стержнях из арматуры периодического профиля, работающих на растяжение-выдергивание и сжатие-продавливание, однако ряд особенностей таких соединений позволяет сделать вывод о возможности усовершенствования и унификации элементов конструкций стыков, повышения технологичности изготовления и монтажа за счет клеивания в древесину стальных пластин.

4. Пилотные эксперименты на выдергивание подтвердили возможность создания и использования соединения элементов деревянных конструкций на стальных клеенных пластинах, несущая способность и жесткость которых аналогичны соединениям на стальных клеенных стержнях.

5. В научно-технической литературе отсутствуют научно-обоснованные теоретические сведения, экспериментальные данные об узлах деревянных конструкций с применением стальных клеенных пластин, работающих на выдергивание, в том числе, нет сведений о конструктивных решениях такого рода стыков.

Учитывая вышеизложенное, целью диссертационной работы явилась разработка и исследование узловых соединений деревянных элементов на клеенных стальных пластинах с экспериментально-теоретическим обоснованием методики их расчета и проектирования.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- на основе обобщения и анализа отечественного и зарубежного опыта применения узловых соединений на клеенных стержнях предложить пути их совершенствования и определить направление исследований;

- получить аналитическое решение задачи по определению напряженно-деформированного состояния разработанного соединения при выдергивании клеенной пластины из массива древесины;

- численными методами установить закономерности влияния конструктивных параметров клеенных пластин на их рациональную форму и напряженно-деформированное состояние соединения;
- экспериментальными методами подтвердить адекватность полученного аналитического решения и результатов численных расчетов;
- разработать новые конструктивные решения узловых соединений деревянных элементов на клеенных стальных пластинах;
- выполнить численные исследования напряженно-деформированного состояния предложенных типов узлов с экспериментальной проверкой полученных результатов при действии кратковременных и длительных нагрузок;
- разработать рекомендации по конструированию, расчету и изготовлению предложенных типов узловых соединений деревянных элементов;
- оценить технико-экономическую эффективность разработанных узловых соединений;
- внедрить в строительную практику и учебный процесс результаты выполненной работы.

Несомненно, что конструирование и расчет, изготовление и монтаж, эксплуатация деревянных конструкций с новыми типами соединений является единым процессом, обеспечивающим, в частности, прогресс строительной отрасли. Взаимосвязанному решению перечисленных этапов внедрения в практику деревянного строительства рассматриваемых узловых соединений на клеенных стальных пластинах, обеспечивающих требуемую степень прочности, жесткости и эксплуатационной надежности деревянных конструкций, и посвящена настоящая работа.



## **2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ВКЛЕЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН В СОЕДИНЕНИЯХ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

### **2.1 Аналитический расчет клеевого соединения на выдергивание в постановке задачи плоской деформации**

С точки зрения точного аналитического решения задача оценки напряженно-деформированного состояния клеевого соединения стальной пластины с древесиной при работе на выдергивание достаточно сложна: она трехмерна, древесина обладает анизотропией, необходимо учесть наличие клеевой композиции, имеется различие в модулях упругости и коэффициентах Пуассона, а также влияние концевых эффектов.

Проблема передачи сосредоточенных нагрузок через ребра жесткости, какими являются стальные пластины по отношению к древесине, достаточно стара, но по-прежнему актуальна. Это обусловлено тем, что, несмотря на существование множества приближенных решений, точные аналитические решения таких задач до сих пор не построены. Значение точных аналитических решений трудно переоценить. Они могут быть использованы как готовые решения, как тестовые для различных приближенных методов решения краевых задач. Наконец, новые точные аналитические решения дают возможность глубоко проникнуть в физическую природу изучаемых явлений.

#### **2.1.1 История вопроса, основные положения и допущения**

Вопрос решения задач на выдергивание стержней из массива достаточно часто поднимается в строительстве, а их решению в научной общественности уделялось значительное внимание. Как правило, задача решалась в одномер-

ной постановке с многочисленными допущениями. В частности, при решении задачи выдергивания стержня из древесины предполагалось, что напряжения сдвига создаются лишь в клеевой прослойке и близлежащих слоях древесины и не превышают пределов упругости. Распределение нормальных напряжений по сечению деревянной призмы принималось равномерным. Подобная схема принималась в работах ряда авторов: Arnovlevic (1909г.) / 148 /, Volkersen O. (1934г) / 155-157 /, Coland M., Reissner E. (1944г) / 150 /, , в дальнейшем А.Р. Ржаницина / 90 /, А.Л. Рабиновича / 84 /, В.Ф. Бондина / 11, 12 /, Ю.Б. Вылегжанина /19/ и других исследователей. А.Л. Рабиновичем рассматривается также второй случай для не очень тонких клеевых прослоек. Здесь решается плоская задача, удовлетворяются все граничные условия, в том числе и на торцах клеевого шва, а в самом шве учитываются кроме нормальных напряжений и касательные. В работе Б.И. Евдокимова / 200 / влияние объемного фактора косвенно учитывалась введением деформационного параметра клеевого соединения, определяемого экспериментально. Распределение нормальных напряжений по сечению деревянного бруса исследовано численным методом – методом конечных элементов. В 70-х-80-х годах 20-го века были разработаны многочисленные приближенные методы расчета, основанные на всевозможных допущениях и упрощениях. В частности, Э.И. Григолюк / 201 / при решении плоской задачи выдергивания жесткого ребра из пластины, подкрепленной несколькими ребрами, вводит упрощенные соотношения компонентов НДС, основанные на следующих гипотезах: пластина не деформируется в поперечном направлении; продольная жесткость пластины равна нулю; ребра жестко присоединены к пластине по своим центральным линиям.

Отмеченные подходы к решению задачи позволяли определить лишь приближенный характер распределения нормальных напряжений в ребрах (стержнях) и касательных напряжений в зоне пластины, прилегающей к ребрам, за исключением угловых точек.

Определить все компоненты напряженно-деформированного состояния для такого рода задач возможно получив точное решение краевой задачи тео-

рии упругости, в нашем случае – выдергивания пластины из массива древесины – для прямоугольной пластины.

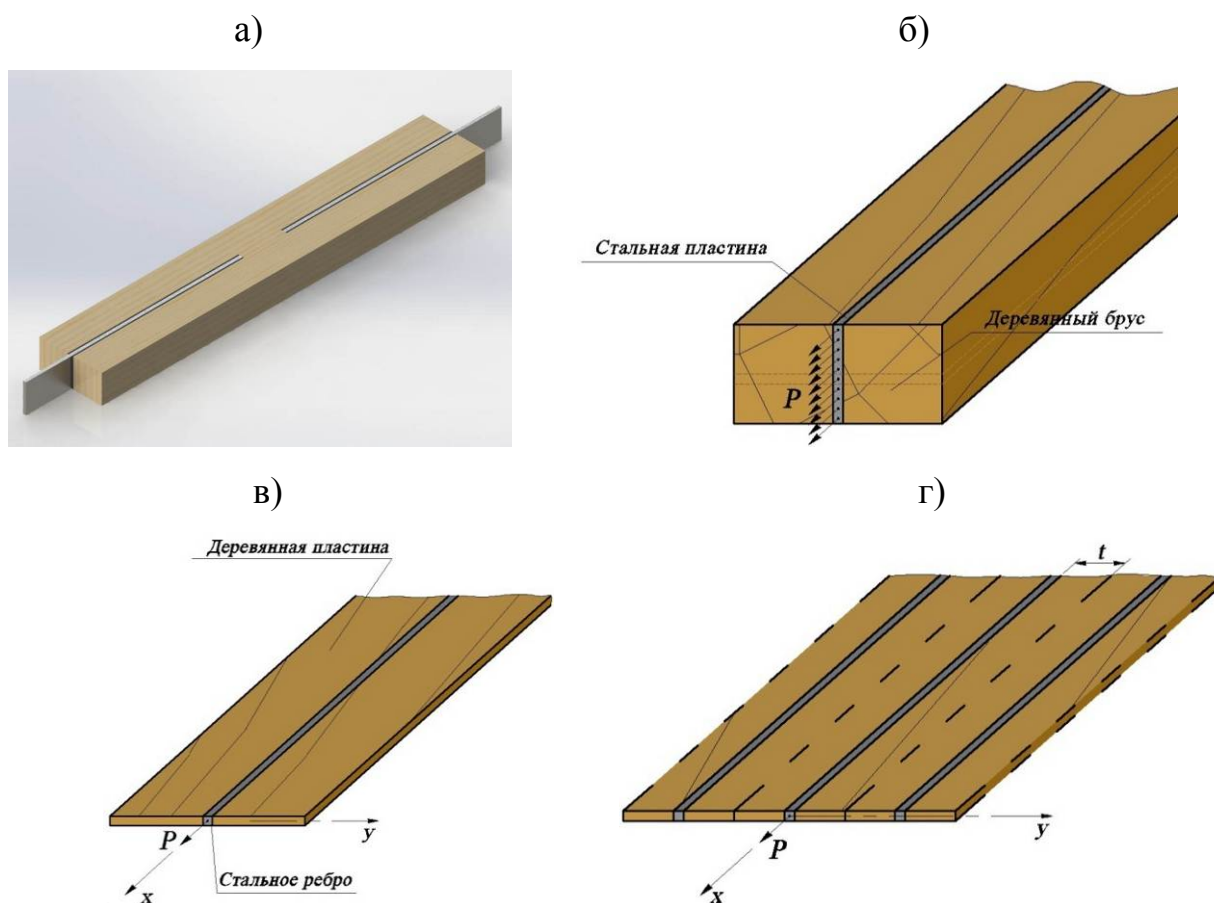
Рассматриваемые задачи относятся к, так называемой, бигармонической проблеме, которой почти 200 лет и которая все эти годы, всегда была предметом пристального внимания математиков и механиков. В наше время ее решением занимались М.В. Келдыш, О.А. Олейник, В.А. Кондратьев, П.Ф. Папкович, А.Ю. Ишлинский, И.И. Ворович, Н.Х. Арутюнян, А.И. Лурье, Г.А. Гринберг и многие другие. В.К. Прокоповым в 60 – 70 годы было опубликовано 2 обзора по однородным решениям (функции Фадля-Папковича, по принятой на западе терминологии), которые появляются естественным образом при решении краевой задачи методом разделения переменных. Особый интерес к проблеме проявился в 1940-1980 гг., после публикации П.Ф. Папковичем / 76 / его известного соотношения «обобщенной ортогональности», которому удовлетворяют однородные решения. В эти годы в СССР вышло не менее 2000 работ по бигармонической проблеме, в том числе, по соотношению обобщенной ортогональности Папковича. На западе публикаций было заметно меньше, они были разрозненны и значительно слабее отечественных. Следует отметить, что после восьмидесятых годов количество публикаций резко снизилось. Трудно указать работу (учитывая западные), которая оказала бы существенное влияние на изменение положения по бигармонической проблеме. Фундаментальный обзор одного из ярчайших специалистов по бигармонической проблеме В.В. Мелешко, написанный в 2003 г. в Нидерландах / 203 /, еще раз свидетельствует об этом. Это связано с известными изменениями в Российской науке и крушением Московской (М.И. Гусейн-Заде), Ленинградской (А.И. Лурье), Ростовской-на-Дону (И.И. Ворович) и Украинской (В.Т. Гринченко) школ, занимавшихся проблемой разложений по функциям Фадля-Папковича. Ведущие представители этих школ (указаны в скобках) хорошо осознавали фундаментальное значение точного решения бигармонической проблемы и для механики, и для математики. А также то, что точное решение краевой задачи для бигармонического уравнения может быть представлено

только в виде разложений по собственным функциям краевой задачи, т.е. по функциям Фадля-Папковича. Поэтому их изучению уделялось самое пристальное внимание. Западные ученые, как правило, шли по пути приближенного решения проблемы. Лишь немногие западные работы достигали уровня тех, что публиковались в СССР (Flugge W., Kelkar V.S., Little R.W., Childs S.B.). Однако точного решения проблемы получено не было. Главная причина этого заключается, по-видимому, в том, что ее решение искалось в рамках классических представлений теории базиса функции, тогда, как функции Фадля-Папковича не образуют классического базиса. Это особенно стало понятным после работ Ю.Ф. Коробейника, например / 48 /, по теории базиса для систем экспонент с комплексными показателями. Стало ясно, что функции Фадля-Папковича можно рассматривать, как обобщение систем экспонент. Выяснилось также, что, если следовать пути, намеченному А.Ф. Леонтьевым / 53 / и Ю.Ф. Коробейником в теории рядов экспонент, то к функциям Фадля-Папковича все же можно построить биортогональные системы функций, но определены они будут не в комплексной плоскости (как для рядов экспонент), а на римановой поверхности логарифма. Основой для этого построения служит преобразование Бореля в классе квазицелых функций экспоненциального типа (обобщение целых функций экспоненциального типа). Единственная работа по преобразованию Бореля в классе квазицелых функций экспоненциального типа принадлежит А. Пфлюгеру – создателю теории целых функций / 142 /. Опираясь, на статью А. Пфлюгера и дополнительные исследования / 43 /, удалось построить соотношения биортогональности для систем функций Фадля-Папковича и в 1997 г. впервые дать точное решение краевой бигармонической проблемы теории упругости в классической постановке: полуполоса со свободными продольными сторонами, нагруженная на торце сосредоточенной силой / 44 /. К 2010 году работа над теоретическим фундаментом, необходимым для решения краевых задач теории упругости в конечных канонических областях с сингулярной границей, была в основном завершена, а ее основы опубликованы в ведущих отечественных научных изданиях / в до-

кладах РАН, МТТ /. Разработанный математический аппарат составляет основу решения основных и смешанных краевых задач теории упругости не только в прямоугольнике, но и в конечных канонических областях другой формы (треугольник, параллелограмм), в других системах координат (усеченный клин, часть кольца – в полярной системе координат, цилиндр конечной длины – в цилиндрической системе координат). Решения всех краевых задач (основных и смешанных) представляются в виде явных разложений по собственным функциям краевой задачи - функциям Фадля-Папковича. Функции Фадля-Папковича точно удовлетворяют нулевым граничным условиям на двух противоположных сторонах канонической области, например, на продольных сторонах полуполосы. Удовлетворяя граничным условиям на торце, приходим к проблеме разложения заданных здесь двух граничных функций (например, нормального и касательного напряжений) в ряды по двум системам функций Фадля-Папковича. Функции Фадля-Папковича устроены достаточно сложно: они комплекснозначны и, как уже говорилось, не образуют базиса на отрезке – торце полуполосы, поэтому найти неизвестные коэффициенты разложений, основываясь на классических представлениях теории базиса функций, невозможно. Они представляют собой обобщение систем экспонент с комплексными показателями (А.Ф. Леонтьев, Ю.Ф. Коробейник) и с вырожденной в отрезок (торец полуполосы) областью аналитичности. Хотя они не образуют базиса, по ним все же можно строить разложения, поскольку они являются «представляющими системами» функций (термин Ю.Ф. Коробейника). Биортогональные к ним системы функций, с помощью которых определяются искомые коэффициенты разложений, строятся на римановой поверхности логарифма.

Выбор, сделанный в работе в пользу точных аналитических решений, получаемых на основе разложений по функциям Фадля-Папковича, обусловлен следующими соображениями. Во-первых, эти решения – точные, во-вторых, и это самое главное, рассмотренная в работе модель допускает обобщения в рамках метода.

Для решения этой задачи из реальной трехмерной конструкции (рисунок 2.1 а, б) вырежем двумя параллельными горизонтальными плоскостями пласт соединения единичной толщины (рисунок 2.1в), полагая, что в нем реализуется плоская деформация, и рассмотрим более простую периодическую задачу (рисунок 2.1г), в которой интересующая нас область расположена между штрих-пунктирными линиями. В силу принципа Сен-Венана, решение такой задачи не приведет к существенной погрешности в области, прилегающей к ребру (стальной полосе), при условии достаточной ширины деревянного бруса  $t$ . Такой подход дает возможность вместо конечной пластины рассматривать полубесконечную, когда длина вклеенной в древесину части, по крайней мере, вдвое больше ширины, что соответствует реальной расчетной схеме.



а) экспериментальный образец; б) трехмерная задача; в) задача плоской деформации для конечных канонических областей; г) аналогичная периодическая задача

Рисунок 2.1 Общий вид и расчетные схемы задач на выдергивание вклеенной пластины из бруса

Полученные расчетные схемы плоской деформации относятся к краевой задаче теории упругости для конечных канонических областей с угловыми точками границы и ребрами жесткости. Решения представлены в виде явных разложений по собственным функциям краевой задачи – функциям Фадля-Папковича. Разложения какой-либо функции по той или иной системе функций Фадля-Папковича можно рассматривать, как обобщение разложений в тригонометрические ряды Фурье, а решение краевых задач в виде разложений по этим функциям – как обобщение разложений Файлона-Рибьера.

Основные теоретические исследования и окончательная методология решения краевых задач теории упругости в прямоугольнике с различными граничными условиями на его сторонах в виде явных разложений по собственным функциям краевой задачи – функциям Фадля-Папковича приведены в диссертационной работе Меньшовой И.В. в 2013г / 201 /. В настоящей работе методика впервые применена для решения практической задачи выдерживания стальной полосы из массива древесины.

### **2.1.2 Решение задачи плоской деформации с помощью разложений по функциям Фадля-Папковича**

При решении рассматривалась полуполоса, у которой продольные стороны периодически подкреплены ребрами жесткости, работающими только на растяжение-сжатие и не воспринимающими изгибных нагрузок (рисунок 2.1г). Обозначим:  $G$  – модуль сдвига пластины,  $E_1$  – модуль упругости ребра;  $\nu_1, \nu_2$  – коэффициенты Пуассона для пластины и ребра;  $f$  – площадь поперечного сечения ребра;  $U(x, y) = G(x, y)$ ,  $V(x, y) = G\nu(x, y)$ , где  $u(x, y)$  и  $\nu(x, y)$  – соответственно продольное и поперечное перемещения в пластине,  $Y(x, y) = \sigma_y(x, y)$ ;  $X(x, y) = \tau_{xy}(x, y)$ .

Из условия равновесия элемента ребра (рисунок 2.2), на основании закона Гука, можно получить следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{E_1 f}{2Gt} \cdot \frac{d^2 U(x \pm 1)}{dx^2} - \tau_{xy}(x \pm 1) = 0 \quad (2.1)$$

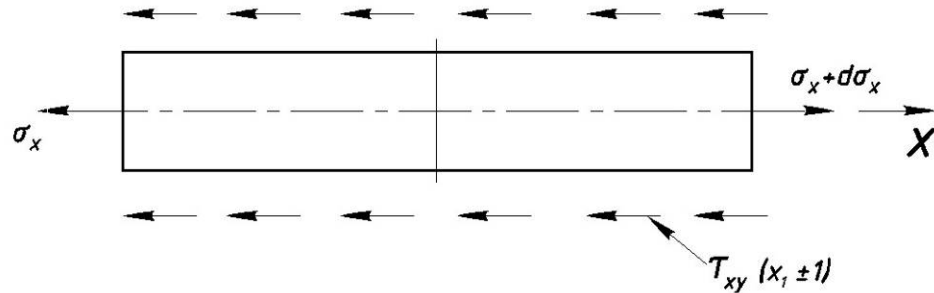


Рисунок 2.2 Условие равновесия элемента ребра длиной  $dx$

Второе граничное условие является следствием периодичности задачи

$$V(x, \pm 1) = 0 \quad (2.2)$$

Граничные условия при  $x=0$  могут быть различными, в частности, к ребрам могут быть приложены сосредоточенные силы  $F$ , действующие вдоль ребер.

Для построения решения краевой задачи воспользуемся методом начальных функций / 15 /, который позволяет быстро получать выражения для функций Фадля-Папковича.

Основные соотношения метода начальных функций имеют вид:

$$\begin{aligned} U(x, y) &= L_{UU}(y)U_0(x) + L_{UV}(y)V_0(x) + L_{UY}(y)Y_0(x) + L_{UX}(y)X_0(x), \\ V(x, y) &= L_{VU}(y)U_0(x) + L_{VV}(y)V_0(x) + L_{VY}(y)Y_0(x) + L_{VX}(y)X_0(x), \\ \sigma_x(x, y) &= A_U(y)U_0(x) + A_V(y)V_0(x) + A_Y(y)Y_0(x) + A_X(y)X_0(x), \\ Y(x, y) &= L_{YU}(y)U_0(x) + L_{YV}(y)V_0(x) + L_{YY}(y)Y_0(x) + L_{YX}(y)X_0(x), \\ X(x, y) &= L_{XU}(y)U_0(x) + L_{XV}(y)V_0(x) + L_{XY}(y)Y_0(x) + L_{XX}(y)X_0(x). \end{aligned} \quad (2.3)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned} L_{UU}(y) &= L_{XX}(y) = \cos \alpha y - \frac{1+\nu}{2} \alpha y \sin \alpha y, \\ L_{UV}(y) &= L_{YX}(y) = -\frac{1}{2} [(1-\nu) \sin \alpha y + (1+\nu) \alpha y \cos \alpha y], \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
L_{UX}(y) &= \frac{1}{4} \left[ \frac{3-\nu}{\alpha} \sin \alpha y + (1+\nu)y \cos \alpha y \right], \\
L_{VU}(y) = L_{XY}(y) &= \frac{1}{2} [(1-\nu) \sin \alpha y - (1+\nu)\alpha y \cos \alpha y], \\
L_{VV}(y) = L_{YY}(y) &= \frac{1}{2} (1+\nu)\alpha y \sin \alpha y + \cos \alpha y, \\
L_{VY}(y) &= \frac{1}{4} \left[ \frac{3-\nu}{\alpha} \sin \alpha y - (1+\nu)y \cos \alpha y \right], \tag{2.4} \\
L_{YU}(y) = L_{XU}(y) &= (1+\nu)\alpha^2 y \sin \alpha y, \\
L_{YV}(y) &= (1+\nu)\alpha(\alpha y \cos \alpha y - \sin \alpha y), \\
L_{XU}(y) &= -(1+\nu)\alpha(\alpha y \cos \alpha y + \sin \alpha y), \\
A_U(y) &= (1+\nu)\alpha(2 \cos \alpha y - \alpha y \sin \alpha y), \\
A_V(y) &= -(1+\nu)\alpha(\sin \alpha y + \alpha y \cos \alpha y), \\
A_Y(y) &= \nu \cos \alpha y - \frac{1}{2}(1+\nu)\alpha y \sin \alpha y, \\
A_X(y) &= \frac{1}{2} [(1+\nu)\alpha y \cos \alpha y + (3+\nu) \sin \alpha y].
\end{aligned}$$

Через  $\alpha$  обозначена производная  $\frac{\partial}{\partial x}$ , поэтому выражения (2.4) представляют собой дифференциальные операторы бесконечного порядка.

### Функции

$$\begin{aligned}
U_o(x) = Gu(x,0), \quad V_o(x) = Gv(x,0), \\
Y_o(x) = \sigma_y(x,0), \quad X_o(x) = \tau_{xy}(x,0), \tag{2.5}
\end{aligned}$$

определенные при  $y=0$ , называются начальными функциями. Зная начальные функции, с помощью формул (2.3) можно найти все перемещения и напряжения. В качестве начальных функций могут быть выбраны функции  $U(x,y), V(x,y), Y(x,y), X(x,y)$ , определенные при любом  $y = const$ . Практически их удобно выбирать так, чтобы две из них были известны сразу, например, из условий симметрии задачи.

Выберем начальные функции на оси симметрии  $y=0$ . Тогда нечетные начальные функции

$$V_o(x) = X_o(x) = 0.$$

С помощью формул (2.3) удовлетворим граничным условиям (2.1), (2.2), которые теперь будут выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} [D\alpha^2 L_{UU}(1) - L_{XU}(1)]U_o(x) + [D\alpha^2 L_{UY}(1) - L_{XY}(1)]Y_o(x) &= 0, \\ L_{VU}(1)U_o(x) + L_{VY}(1)Y_o(x) &= 0, \end{aligned} \quad (2.6)$$

где  $L_{UU}(1), L_{XU}(1)$  и т.д. – операторы метода начальных функций (2.4), определенные при  $y=l$ , а

$$D = \frac{E_1 f}{2Gt}.$$

Введем разрешающую функцию  $F(x)$  по формулам

$$U_o(x) = -L_{VY}(1)F(x), \quad Y_o(x) = L_{VU}(1)F(x). \quad (2.7)$$

При этом второе уравнение будет тождественно удовлетворено, а первое примет такой вид

$$\left(\sin^2 \alpha - D \frac{\alpha}{4} \left( (\nu - 3) \frac{\sin 2\alpha}{2} + (1 + \nu)\alpha \right)\right) F(x) = 0. \quad (2.8)$$

Разыскивая его решение в виде:

$$F(x) = e^{\lambda x}, \quad (2.9)$$

получим трансцендентное характеристическое уравнение:

$$\sin^2 \lambda - D \frac{\lambda}{4} \left( (\nu - 3) \frac{\sin 2\lambda}{2} + (1 + \nu)\lambda \right) = 0, \quad (2.10)$$

которое имеет два нулевых корня, один вещественный и бесконечное множество комплексных корней  $\{\pm \lambda_k, \pm \bar{\lambda}_k\}_{k=1}^{\infty}$ . Ниже для иллюстрации приведены значения первых пяти ненулевых корней уравнения (2.10) (табл. 1), рассчитанные для  $D=80$ . Это значение  $D$  получим, если считать  $E_1 = 200000$  МПа,  $G=500$  МПа,  $\nu = 0,3$ , толщина бруска с каждой стороны от пластины  $t=40$  мм, площадь поперечного сечения клеиваемой пластины равна  $F=4 \times 40$  мм.

Таблица 2.1 – Корни трансцендентного характеристического уравнения

№ корня $\lambda_k$	$\text{Re } \lambda_k$	$\text{Im } \lambda_k$
1	0.955663736694	0,00000
2	3.7919858546	1.02289780844
3	6.97447268966	1.3240208737
4	10.1363806285	1.50886558573
5	13.2904346598	1.64314247512

Следовательно, функция

$$F(x) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k e^{\lambda_k x} + \overline{a_k} e^{\overline{\lambda_k} x} (\lambda_k \in \Lambda, \text{Re } \lambda_k < 0)$$

(элементарное решение, соответствующее нулевым корням, не рассматривается). Подставляя функцию  $F(x)$  в формулы (2.7), найдем начальные функции, а затем, по формулам (2.3) – все перемещения и напряжения ( $\text{Re } \lambda_k < 0$ )

$$\begin{aligned} U(x, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} a_k U(\lambda_k, y) e^{\lambda_k x} + \overline{a_k} U(\overline{\lambda_k}, y) e^{\overline{\lambda_k} x}, \\ V(x, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} a_k V(\lambda_k, y) e^{\lambda_k x} + \overline{a_k} V(\overline{\lambda_k}, y) e^{\overline{\lambda_k} x}, \\ \sigma_x(x, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} a_k \sigma_x(\lambda_k, y) e^{\lambda_k x} + \overline{a_k} \sigma_x(\overline{\lambda_k}, y) e^{\overline{\lambda_k} x}, \\ \tau_{xy}(x, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} a_k \tau_{xy}(\lambda_k, y) e^{\lambda_k x} + \overline{a_k} \tau_{xy}(\overline{\lambda_k}, y) e^{\overline{\lambda_k} x}. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Функции Фадля-Папковича  $U(\lambda_k, y), V(\lambda_k, y)$  и т.д. имеют вид:

$$\begin{aligned} U(\lambda_k, y) &= \left( \frac{1+\nu}{4} \cos \lambda_k + \frac{\nu-3}{4\lambda_k} \sin \lambda_k \right) \cos \lambda_k y + \frac{1+\nu}{4} y \sin \lambda_k \sin \lambda_k y, \\ V(\lambda_k, y) &= \frac{1+\nu}{4} (-\cos \lambda_k \sin \lambda_k y + y \sin \lambda_k \cos \lambda_k y), \\ \sigma_x(\lambda_k, y) &= \left( \frac{1+\nu}{2} \lambda_k \cos \lambda_k - \frac{3+\nu}{2} \sin \lambda_k \right) \cos \lambda_k y + \frac{1+\nu}{2} \lambda_k y \sin \lambda_k \sin \lambda_k y, \\ \sigma_y(\lambda_k, y) &= \left( \frac{1-\nu}{2} \sin \lambda_k - \frac{1+\nu}{2} \lambda_k \cos \lambda_k \right) \cos \lambda_k y - \frac{1+\nu}{2} \lambda_k y \sin \lambda_k \sin \lambda_k y, \\ \tau_{xy}(\lambda_k, y) &= \left( \sin \lambda_k - \frac{1+\nu}{2} \lambda_k \cos \lambda_k \right) \sin \lambda_k y + \frac{1+\nu}{2} \lambda_k y \sin \lambda_k \cos \lambda_k y. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Удовлетворяя с помощью выражений (2.11) граничным условиям, заданным на торце полуполосы, приходим к задаче определения коэффициентов  $a_k$ ,  $\overline{a_k}$  из разложений по функциям Фадля-Папковича, например,

$$\begin{aligned}\sigma_x(y) &= \sum_{k=1}^{\infty} a_k \sigma_x(\lambda_k, y) + \overline{a_k} \sigma_x(\overline{\lambda_k}, y), \\ \tau_{xy}(y) &= \sum_{k=1}^{\infty} a_k \tau_{xy}(\lambda_k, y) + \overline{a_k} \tau_{xy}(\overline{\lambda_k}, y)\end{aligned}\quad (2.13)$$

где  $\sigma(y)$  и  $\tau(y)$  – заданные на торце полуполосы нормальные и касательные напряжения. Коэффициенты  $a_k$  находятся отсюда в явном виде с помощью биортогональных систем функций, которые находятся из решения уравнений:

$$\begin{aligned}\int_{-\infty}^{\infty} U(\lambda, y) U_k(y) dy &= \frac{L(\lambda)}{\lambda^2 - \lambda_k^2}; \quad \int_{-\infty}^{\infty} V(\lambda, y) V_k(y) dy = \frac{L(\lambda)}{\lambda(\lambda^2 - \lambda_k^2)}; \\ \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_x(\lambda, y) X_k(y) dy &= \frac{L(\lambda)}{\lambda(\lambda^2 - \lambda_k^2)}; \quad \int_{-\infty}^{\infty} \sigma_y(\lambda, y) Y_k(y) dy = \frac{\lambda L(\lambda)}{\lambda^2 - \lambda_k^2}; \\ \int_{-\infty}^{\infty} \tau_{xy}(\lambda, y) T_k(y) dy &= \frac{L(\lambda)}{\lambda^2 - \lambda_k^2}.\end{aligned}\quad (2.14)$$

Здесь  $U(\lambda, y)$ ,  $V(\lambda, y)$  и т. д. – порождающие функции, а

$$L(\lambda) = \sin^2 \lambda - D \frac{\lambda}{4} \left( (\nu - 3) \frac{\sin 2\lambda}{2} + (1 + \nu) \lambda \right).$$

При  $\lambda = \lambda_m$  из уравнений (2.14) получаются следующие соотношения биортогональности:

$$\begin{aligned}\int_T U(\lambda_m, y) U_k(y) dy &= \begin{cases} \frac{L'(\lambda_m)}{2\lambda_m} \text{ при } \lambda_m = \lambda_k, \\ 0 \text{ при } \lambda_m \neq \lambda_k \end{cases} \\ \int_T V(\lambda_m, y) V_k(y) dy &= \begin{cases} \frac{L'(\lambda_m)}{2\lambda_m^2} \text{ при } \lambda_m = \lambda_k, \\ 0 \text{ при } \lambda_m \neq \lambda_k \end{cases} \\ \int_T \sigma_x(\lambda_m, y) X_k(y) dy &= \begin{cases} \frac{L'(\lambda_m)}{2\lambda_m^2} \text{ при } \lambda_m = \lambda_k, \\ 0 \text{ при } \lambda_m \neq \lambda_k \end{cases}\end{aligned}\quad (2.15)$$

$$\int_T \sigma_y(\lambda_m, y) Y_k(y) dy = \begin{cases} \frac{L'(\lambda_m)}{2} \text{ при } \lambda_m = \lambda_k, \\ 0 \text{ при } \lambda_m \neq \lambda_k \end{cases}$$

$$\int_T \tau_{xy}(\lambda_m, y) T_k(y) dy = \begin{cases} \frac{L'(\lambda_m)}{2\lambda_m} \text{ при } \lambda_m = \lambda_k, \\ 0 \text{ при } \lambda_m \neq \lambda_k \end{cases}$$

где  $L' = (L(\lambda))'$  – производная функции  $L(\lambda)$ , определенная при  $\lambda = \lambda_m$ . Для комплексных значений  $\lambda$  прямую интегрирования  $-\infty, \infty$  в формулах (2.14) нужно заменить Т-образным контуром, лежащим в плоскости комплексного переменного  $z=x+iy$  и составленным из отрезка мнимой оси  $y \in [-1, 1]$  и луча  $x \in [-\infty, 0]$  / 42 / . Следует иметь в виду, что при всех  $\overline{\lambda}_m$

$$\int_T U(\overline{\lambda}_m, y) U_k(y) dy = \int_T U(\lambda_m, y) \overline{U_k(y)} dy = 0$$

$$\int_T V(\overline{\lambda}_m, y) V_k(y) dy = \int_T V(\lambda_m, y) \overline{V_k(y)} dy = 0$$

$$\int_T \sigma_x(\overline{\lambda}_m, y) X_k(y) dy = \int_T \sigma_x(\lambda_m, y) \overline{X_k(y)} dy = 0$$

$$\int_T \sigma_y(\overline{\lambda}_m, y) Y_k(y) dy = \int_T \sigma_y(\lambda_m, y) \overline{Y_k(y)} dy = 0, \quad (2.16)$$

$$\int_T \tau_{xy}(\overline{\lambda}_m, y) T_k(y) dy = \int_T \tau_{xy}(\lambda_m, y) \overline{T_k(y)} dy = 0,$$

Элементы  $U_k(y)$ ,  $V_k(y)$ ,  $X_k(y)$ ,  $Y_k(y)$  и  $T_k(y)$  биортогональных систем функций можно представить в виде суммы финитных, не равных нулю на отрезке  $|y| \leq 1$ , и не финитных частей, ортогональных ко всем функциям  $\{\sin m\pi\}_{m=1}^{\infty}$  и  $\{\cos m\pi\}_{m=1}^{\infty}$ . Финитные части биортогональных функций, имеют такой вид:

$$u_k(y) = \frac{C}{2} \left[ \frac{\lambda_k \cos \lambda_k y}{\sin \lambda_k} + \delta(y+1) + \delta(y-1) \right]; u_k(y) = -D \frac{\sin \lambda_k y}{2 \sin \lambda_k};$$

$$x_k(y) = D \frac{\cos \lambda_k y}{4 \lambda_k \sin \lambda_k}; y_k(y) = -\frac{D}{4} \left[ \frac{\lambda_k \cos \lambda_k y}{\sin \lambda_k} + \delta(y+1) + \delta(y-1) \right] \quad (2.17)$$

$$t_k(y) = -D \frac{\sin \lambda_k y}{4 \sin \lambda_k};$$

Здесь  $\delta$  – дельта-функции. Формулы (20) строятся так. Построим, например, функцию  $u_k(y)$ . Примем в первой формуле (14)  $\lambda = m\pi$  ( $m=1,2,\dots$ ). Получим:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} U(m\pi, y) u_k(y) dy = \frac{L(m\pi)}{(m\pi)^2 - \lambda_k^2}$$

или

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1+\nu}{4} \cdot (-1)^m \cos(m\pi y) u_k(y) \cdot dy = -\frac{D \frac{(1+\nu)}{4} (m\pi)^2}{(m\pi)^2 - \lambda_k^2}$$

Отсюда:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \cos(m\pi y) u_k(y) \cdot dy = -\frac{D(m\pi)^2}{(m\pi)^2 - \lambda_k^2} (-1)^m$$

Слева в последнем выражении стоит преобразование Фурье функции  $u_k(y)$  с параметром  $m\pi$ . Используя обратное преобразование Фурье, получим нужную функцию  $u_k(y)$  (2.17).

После того, как биортогональные системы функций построены, можно приступать непосредственно к решению краевой задачи. Приведем окончательные формулы для напряжений и перемещений в том случае, когда на торце полуплоскости приложена только нормальная нагрузка [1]

$$\begin{aligned} U(x, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} 2 \cdot \operatorname{Re} \left\{ \sigma_k \frac{U(\lambda_k, y)}{\lambda_k M_k} \lambda_k \bar{\lambda}_k \frac{\operatorname{Im}(-e^{\lambda_k x})}{\operatorname{Im}(\lambda_k)} \right\} \\ V(x, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} 2 \cdot \operatorname{Re} \left\{ \sigma_k \frac{V(\lambda_k, y)}{M_k} \frac{\operatorname{Im}(-\bar{\lambda}_k e^{\lambda_k x})}{\operatorname{Im}(\lambda_k)} \right\} \\ \sigma_x(x, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} 2 \cdot \operatorname{Re} \left\{ \sigma_k \frac{\sigma_x(\lambda_k, y)}{M_k} \frac{\operatorname{Im}(-\bar{\lambda}_k e^{\lambda_k x})}{\operatorname{Im}(\lambda_k)} \right\} \\ \sigma_y(x, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} 2 \cdot \operatorname{Re} \left\{ \sigma_k \frac{\sigma_y(\lambda_k, y)}{M_k \lambda_k^2} \lambda_k \bar{\lambda}_k \frac{\operatorname{Im}(-\lambda_k e^{\lambda_k x})}{\operatorname{Im}(\lambda_k)} \right\} \\ \tau_{xy}(x, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} 2 \cdot \operatorname{Re} \left\{ \sigma_k \frac{\tau_{xy}(\lambda_k, y)}{\lambda_k M_k} \lambda_k \bar{\lambda}_k \frac{\operatorname{Im}(e^{\lambda_k x})}{\operatorname{Im}(\lambda_k)} \right\} \end{aligned} \quad (2.18)$$

где

$$M_k := \frac{\left[ \frac{\nu-3}{2} \cdot \lambda_k \cdot \sin(\lambda_k)^2 + \frac{\lambda_k \cdot (1-3 \cdot \nu)}{4} - \sin(2 \cdot \lambda_k) \cdot \left( \frac{\nu-3}{8} \right) \right] \cdot D + \sin(2 \cdot \lambda_k)}{2 \cdot (\lambda_k)^2}$$

Будем считать, что к пластине приложена выдергивающая сила, равная 2000 кг. Тогда по формуле:

$$\sigma_k = \int_{-1}^1 \sigma(y) x_k(y) dy$$

получим

$$\sigma_k := \frac{D}{2 \cdot (\lambda_k)^2}$$

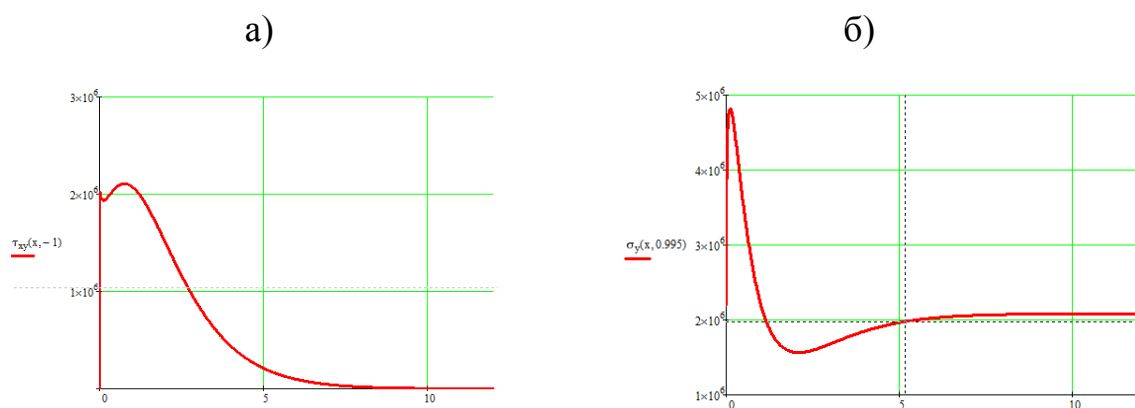
Приведем окончательные формулы для напряжений и перемещений, по которым выполнялись вычисления компонентов напряженно-деформированного состояния ( $a_1$  - значение вещественного корня):

$$\begin{aligned} \sigma_x(x, y) &= \frac{\sigma_x(\lambda_1, y) e^{a_1 x}}{M_1} \sigma_1 (1 - a_1 x) - \sum_{k=2}^n \left( 2 \operatorname{Re} \left( \frac{\sigma_x(\lambda_k, y)}{M_k} \sigma_k \frac{\operatorname{Im}(\overline{\lambda_k} e^{\lambda_k x})}{\operatorname{Im}(\lambda_k)} \right) \right) + C \\ \sigma_y(x, y) &= \frac{-\sigma_y(\lambda_1, y) e^{a_1 x} [\sigma_1 (1 + a_1 x)]}{M_1} - \sum_{k=2}^n 2 \operatorname{Re} \left[ \frac{\sigma_y(\lambda_k, y)}{M_k \lambda_k} (\overline{\lambda_k}) \sigma_k \frac{\operatorname{Im}(\lambda_k e^{\lambda_k x})}{\operatorname{Im}(\lambda_k)} \right] + C\nu \\ \tau_{xy}(x, y) &= \frac{-\tau_{xy}(\lambda_1, y) e^{a_1 x}}{M_1 \lambda_1} \sigma_1 (\lambda_1)^2 x - \sum_{k=2}^n \left[ 2 \operatorname{Re} \left[ \frac{\tau_{xy}(\lambda_k, y)}{M_k \lambda_k} (\overline{\lambda_k} \lambda_k) \sigma_k \frac{\operatorname{Im}(e^{\lambda_k x})}{\operatorname{Im}(\lambda_k)} \right] \right] \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$U(x, y) = \frac{U(\lambda_1, y) e^{a_1 x}}{M_1 \lambda_1} \sigma_1 a_1 (1 + a_1 x) + \sum_{k=2}^n \left( 2 \operatorname{Re} \left( \frac{U(\lambda_k, y)}{M_k \lambda_k} \overline{\lambda_k} \sigma_k \frac{\operatorname{Im}(\overline{\lambda_k} e^{\lambda_k x})}{\operatorname{Im}(\lambda_k)} \right) \right) + \frac{1-\nu}{2} Cx$$

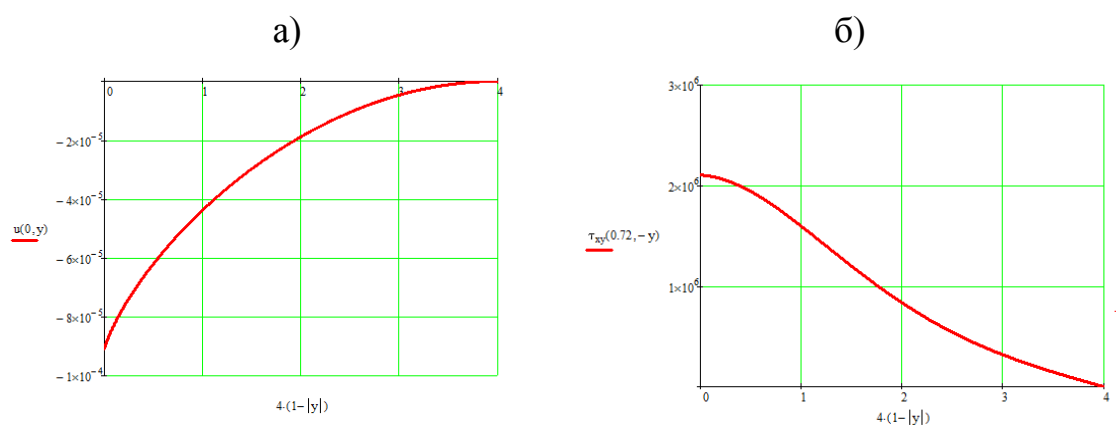
$$V(x, y) = \frac{V(\lambda_1, y) e^{a_1 x}}{M_1} \sigma_1 (-1 + a_1 x) + \sum_{k=2}^n \left( 2 \operatorname{Re} \left( \frac{\chi(\lambda_k, y)}{M_k} \sigma_k \frac{\operatorname{Im}(\overline{\lambda_k} e^{\lambda_k x})}{\operatorname{Im}(\lambda_k)} \right) \right)$$

На рисунках 2.3 - 2.5 показаны законы распределения компонентов напряженно-деформированного состояния в элементах соединения при выдергивании пластины из бруска, полученные точным решением и визуализированные в системе компьютерной алгебры Mathcad.



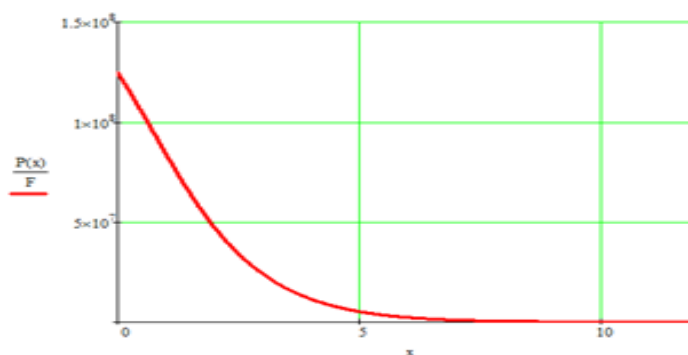
а) напряжений  $\sigma_y$  в бруске по контакту с пластиной, Па; б) там же касательных напряжений, Па;

Рисунок 2.3 Распределение компонентов НДС вдоль соединения на длине вклейки от 0 до  $1/2l_{вкл}$



а) перемещений, Па; б) касательных напряжений, Па;

Рисунок 2.4 Распределение компонентов НДС в поперечном сечении правой части бруса



г) напряжений  $\sigma_x$  в пластине, Па

Рисунок 2.5 Распределение компонентов НДС вдоль соединения на длине вклейки



Главными результатами аналитического решения задачи на выдергивание пластины из древесины следует считать выявление значительных касательных и нормальных напряжений ( $\tau_{xy}$  и  $\sigma_y$ ), а также незначительную деформативность соединения, позволяющую отнести его к соединению жесткого типа.

## 2.2 Численные исследования напряженно-деформированного состояния клеевого соединения стальных пластин с древесиной

Для подтверждения результатов, полученных аналитически, в программном комплексе ANSYS (г. Канонсберг, штат Пенсильвания, США) и APMCivilEngineering (г. Королев, Московская область, Россия) были созданы конечно-элементные модели экспериментального образца с параметрами клеевого соединения, рассчитанного теоретически. Выбор программных комплексов обусловлен, в первую очередь, возможностью учета анизотропию материалов. Кроме этого, программный комплекс ANSYS позволяет создавать параметрические модели с возможностью дальнейшей оптимизацией задаваемых параметров.

Вычисление статических перемещений в программных комплексах происходит на основе решения уравнения в матричной постановке метода конечных элементов, имеющего следующий вид / 30 /:

$$[K] \cdot \{u\} = \{F\} \quad (2.20)$$

где  $[K]$  – глобальная матрица жесткости;  $\{u\}$  – вектор узловых смещений;  $\{F\}$  – вектор нагрузки.

Глобальная матрица жесткости формируется путем вычисления суммы интегралов следующего вида:

$$[K] = \sum_m \int_V [B^{(e)}]^T \cdot [D^{(e)}] \cdot [B^{(e)}] \cdot dV \quad (2.21)$$

где  $[B^{(e)}]$  – матрица деформаций-смещений единичного элемента, определяемая по формуле:

$$[B^{(e)}] = [L] \cdot [H^{(e)}] \quad (2.22)$$

где  $[L]$  – дифференциальная матрица, определяемая для каждой конкретной задачи согласно теории упругости;  $[H^{(e)}]$  – интерполяционная матрица смещений, формируемая на основе функций формы конкретного типа конечного элемента;  $[D^{(e)}]$  – матрица упругости единичного элемента, определяемая для каждой конкретной задачи согласно теории упругости;  $m$  – общее количество элементов.

Вектор узловых смещений может быть записан следующим образом:

$$\{u\} = \sum_m \{u^{(e)}\} \quad (2.23)$$

где  $\{u^{(e)}\}$  – вектор смещений единичного элемента, который в общем случае при наличии  $n$  узлов может быть записан в следующей форме:

$$\{u^{(e)}\}^T = \{u_{x_1} \ u_{y_1} \ u_{z_1} \ \varphi_{x_1} \ \varphi_{y_1} \ \varphi_{z_1} \ \dots \ u_{x_n} \ u_{y_n} \ u_{z_n} \ \varphi_{x_n} \ \varphi_{y_n} \ \varphi_{z_n}\} \quad (2.24)$$

Вектор нагрузки  $\{F\}$  включает в себя три составляющие, обусловленные действием объемной, поверхностной и сосредоточенной нагрузки:

$$\{F\} = \{F_B\} + \{F_S\} + \{F_C\} \quad (2.25)$$

где  $\{F_B\}$  – вектор объемной нагрузки, определяемый по формуле:

$$\{F_B\} = \sum_m \int_V [H^{(e)}]^T \cdot f^{B(e)} \cdot dV ; \quad (2.26)$$

где  $\{F_S\}$  – вектор поверхностной нагрузки, определяемый по формуле:

$$\{F_S\} = \sum_m \int_S [H^{S(e)}]^T \cdot f^{S(e)} \cdot dS \quad (2.27)$$

где  $\{F_C\}$  – вектор внешних сосредоточенных сил, действующих на узловые точки;  $f^{B(e)}$  – массовые силы, Н;  $f^{S(e)}$  – силы трения, действующие на поверхность, Н;  $[H^{S(e)}]$  – поверхностная интерполяционная матрица смещений, полу-

чаемая из объемной интерполяционной матрицы смещений  $[H^{(e)}]$  подстановкой координат поверхности элемента.

Выражение (2.20) описывает статическое равновесие. Если приложенные силы изменяются во времени, это выражение применимо к любому конкретному моменту.

Решение уравнения статического равновесия (2.20) в программных комплексах может быть получено как прямыми, так и итерационными методами. В данном случае при анализе напряженно-деформированного состояния соединения для решения системы линейных уравнений, сгенерированных конечно-элементной процедурой использовался прямой метод решения, реализуемый решателем «Sparse Direct Solver». Данный решатель, основанный на применении разреженных матриц, для решения систем уравнений использует треугольное разложение матрицы жесткости  $[K]$ . В соответствии с этим уравнение (68) может быть записано в следующей форме:

$$[L] \cdot [U] \cdot \{u\} = \{F\} \quad (2.28)$$

где  $[L]$  – нижняя треугольная матрица;  $[U]$  – верхняя треугольная матрица;

После выполнения подстановки вида:

$$\{w\} = [U] \cdot \{u\} \quad (2.29)$$

неизвестный вектор узловых смещений  $\{u\}$  может быть найден на основе решения уравнения:

$$[L] \cdot \{w\} = \{F\} \quad (2.30)$$

В случае если матрица  $[K]$  является симметричной, описанная процедура допускает следующую замену:

$$[K] = [L] \cdot [L]^T \quad (2.31)$$

Данное выражение может быть преобразовано к следующему виду:

$$[K] = [L'] \cdot [D] \cdot [L']^T \quad (2.32)$$

где  $[D]$  – диагональная матрица;  $[L']$  – нижняя треугольная матрица, не учитывающая квадратные корни отрицательных элементов.

С учетом последнего выражения уравнение (2.20) может быть переписано в следующем виде:

$$[L'] \cdot [D] \cdot [L']^T \cdot \{u\} = \{F\} \quad (2.33)$$

Подстановка:

$$\{w\} = [D] \cdot [L']^T \cdot \{u\} \quad (2.34)$$

дает уравнение:

$$[L'] \cdot \{w\} = \{F\}, \quad (2.35)$$

решение которого относительно  $\{w\}$  и его обратная подстановка обеспечивает нахождение вектора узловых смещений  $\{u\}$ .

### 2.2.1 Построение конечно-элементных моделей соединения

Для твердотельного моделирования составляющих клеевого соединения стальной пластины с деревянным брусом в программных комплексах ANSYS и APMCivilEngineering были использованы объемные конечные элементы «Solid185» тетраэдрической формы и прямоугольные параллелепипеды соответственно / 29, 62 /. Функции формы для элемента «Solid185» с опциями, использованными при формировании модели, имеют следующий вид:

$$U_X = U_{X_i} \cdot L_1 + U_{X_j} \cdot L_2 + U_{X_k} \cdot L_3 + U_{X_m} \cdot L_4, \quad (2.36)$$

где  $U_{X_{i...p}}$  – смещение соответствующего индексу узла элемента в направлении оси X;

$s, t, r, L_1, L_2, L_3, L_4$  – однородные координаты произвольной точки элемента.

Для двух остальных координатных направлений функции формы не приводятся, так как имеют аналогичную структуру записи.

Размеры конечного элемента приняты в пластине, клеевой прослойке и в древесине в зоне контакта с клеем с таким расчетом, чтобы в самом тонком слое, в данном случае в слое клея, по толщине размещалось не менее 2-х конечных элементов, что обеспечивает корректность вычислений. Геометрические модели, созданные в программных комплексах, показаны на рисунке 2.6.

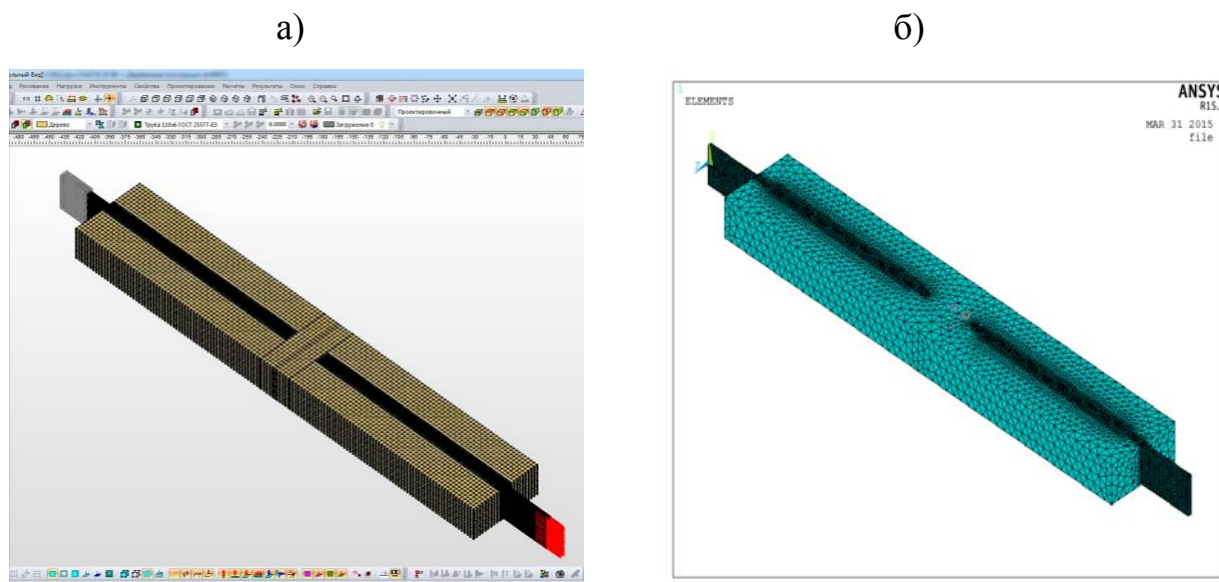


Рисунок 2.6. Конечно-элементные модели образца, созданные в программных комплексах APMCivilEngineering (а) и ANSYS (б)

К созданным конечно-элементным моделям прикладывалось экспериментально полученное минимальное значение разрушающей нагрузки в 20 кН.

Перед введением в модели исходных данных было проведено экспериментальное определение физико-механических характеристик применяемых материалов. Пластины изготавливались из наиболее распространенной стали марки Ст3пс в полосовом прокате по ГОСТ 103-2006. Химический состав поставленной партии приведен в таблице 2.2.

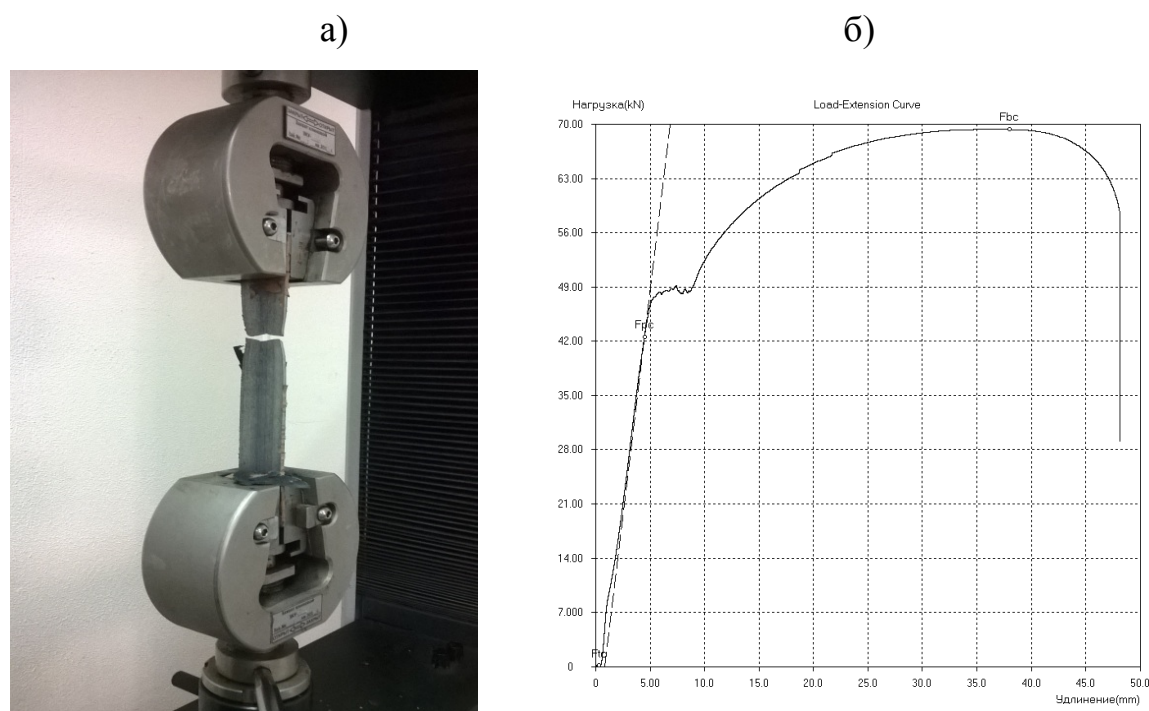
Таблица 2.2 – Химический состав стали Ст3пс (в процентах)

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu
0,15	0,16	0,53	0,12	0,012	0,021	0,15	0,24

Предел текучести стали в соответствии с сертификатом поставки составил 235 МПа. Для подтверждения физико-механических характеристик стали пластин были проведены испытания на растяжение в соответствии с ГОСТ 1497-84 – Металлы. Методы испытания на растяжение. Общий вид образца в захватах испытательной машины и диаграмма испытаний приведены на рисунок 2.7.

В качестве клеевой композиции применялся двухкомпонентный клей на основе эпоксидных смол с добавлением цемента. В состав первого компонента входит эпоксидно-диановая смола ЭД-20 на основе диглицидилового эфира дифенилолпропана модифицированной пластификатором-олигомером ДЭГ-1. Второй компонент - отвердитель ПЭПА.

Физико-механические характеристики древесины определялись в соответствии с ГОСТ 16483.10-73 «Древесина. Метод определения предела прочности при сжатии вдоль волокон» (рисунок 2.8). Для изготовления брусков применялись пиломатериалы из той же партии древесины сосны, что и образцы для испытаний клеевого соединения. Влажность древесины, замеренная электронным влагомером, составила 12, 3%.



а – общий вид образца после разрушения; б – диаграмма испытаний

Рисунок 2.7 – Испытание стальных пластин на растяжение



а – общий вид испытательной установки; б – диаграмма испытаний

Рисунок 2.8 – Испытание древесины на сжатие вдоль волокон

По результатам испытаний и имеющимся данным в расчет вводились следующие значения физико-механических характеристик и упругих констант.

Сталь Ст3пс: Модуль Юнга – 200 000 МПа, коэффициент Пуассона – 0,3, Модуль сдвига – 81 000 МПа, расчетное сопротивление растяжению – 235 МПа

Древесина – сосна 2-го сорта: модуль нормальной упругости вдоль волокна – 10 000 МПа; поперек волокна – 400 МПа; коэффициент Пуассона поперек волокон (напряжения вдоль волокон) – 0,45; вдоль волокон (напряжения поперек волокон) – 0,018; модуль сдвига вдоль и поперек волокон – 500 МПа; расчетное сопротивление растяжению – 10 МПа; сжатию – 14 МПа; скалыванию вдоль волокон при изгибе – 1,6 МПа, местное скалывание в клеевых соединениях – 2,1 МПа

Клеевая эпоксидная композиция: модуль упругости - 3000 МПа; коэффициент Пуассона - 0,017; модуль сдвига - 1250 МПа, расчетное сопротивление растяжению -70МПа.

Результаты вычислений напряжений в древесине в программных комплексах APMCivilEngineering и ANSYS показаны на рисунках 2.9, 2.10. Ниже, на рисунке 2.11 показаны аналогичные сравнительные карты распределения напряжений в стальной пластине.

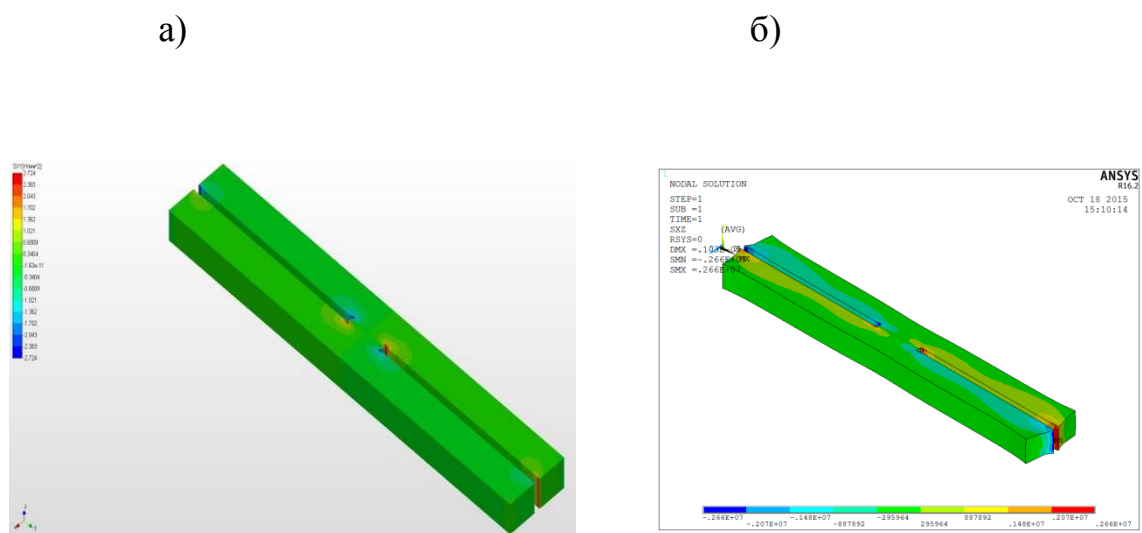


Рисунок 2.9. Характерное распределение касательных напряжений в бруске, полученная в APMCivilEngineering (а) и в ПК ANSYS (б)

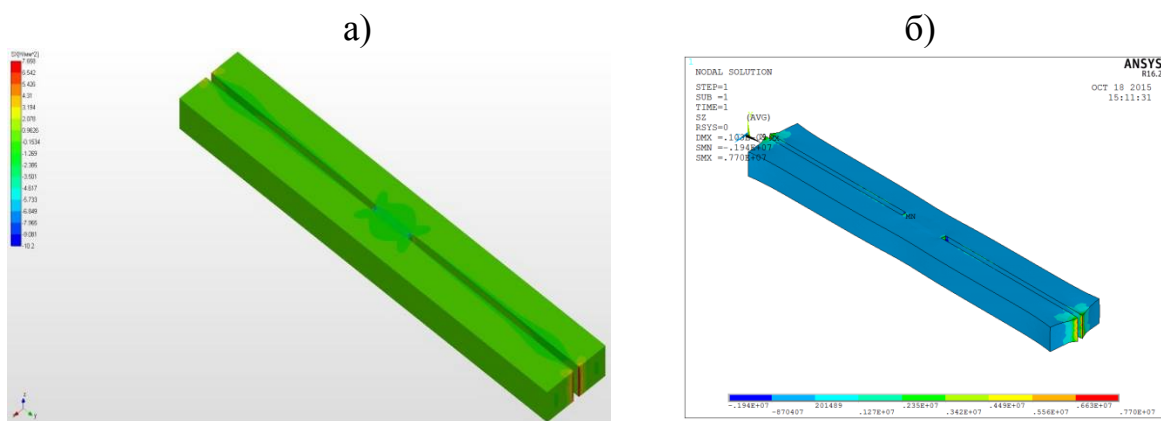


Рис 2.10. Характерное распределение нормальных отрывающих напряжений, полученная в APMCivilEngineering (а) и в ПК ANSYS (б)

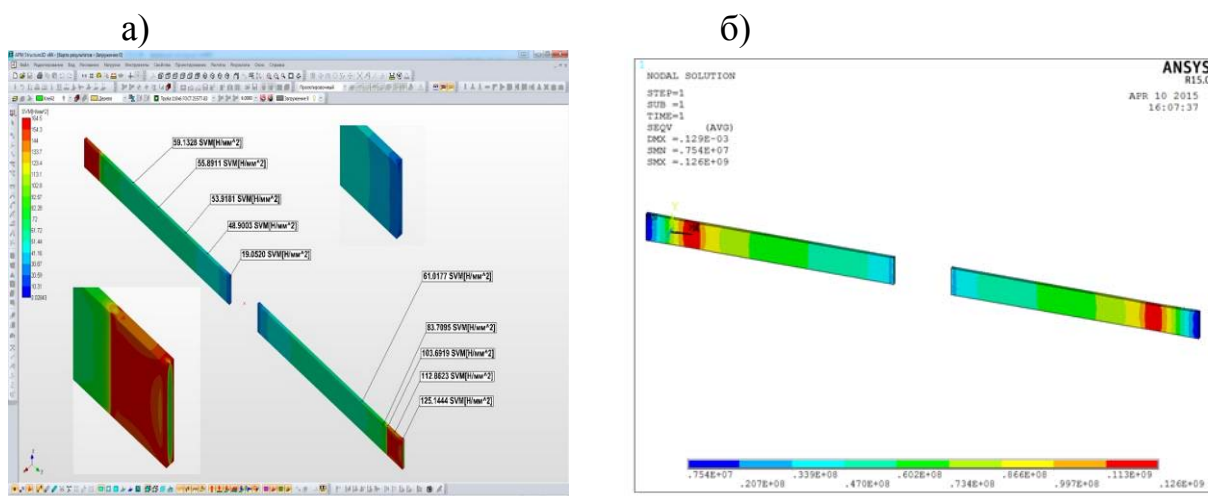


Рисунок 2.11. Карта распределения экв. напряжений в пластине, полученная в APMCivilEngineering (а) и в ПК ANSYS (б)



В силу того, что расхождения между значениями компонентов напряженно-деформированного состояния, определенных в двух программных комплексах, составляют не более 1,5% можно говорить о корректности и адекватности полученных результатов, а дальнейший анализ вести по данным численных расчетов, полученных в любом из них. В связи с наличием больших возможностей, в частности, возможности построения параметрических моделей и оптимизационных вычислений в ПК ANSYS, в дальнейших расчетах использовался именно этот программный комплекс.

### 2.2.2 Анализ напряженно-деформированного состояния элементов клеевого соединения

Для исследования напряженно-деформированного состояния клеевого соединения стальной пластины с древесиной и сравнения результатов аналитического и численного расчетов были построены наиболее значимые совмещенные графики распределения компонентов НДС по длине вклеенной части стальной пластины и по торцу соединения, приведенные на рисунках 2.12.-2.13  $(\sin^2 \alpha - D \frac{\alpha}{4} \left( (\nu - 3) \frac{\sin 2\alpha}{2} + (1 + \nu)\alpha \right)) F(x) = 0$ . Следует отметить, что, принимая во внимание расчетную схему задачи, графики распределения компонентов НДС по торцу, построенные по результатам аналитических расчетов, обрываются на полосе контакта со стальной пластиной.

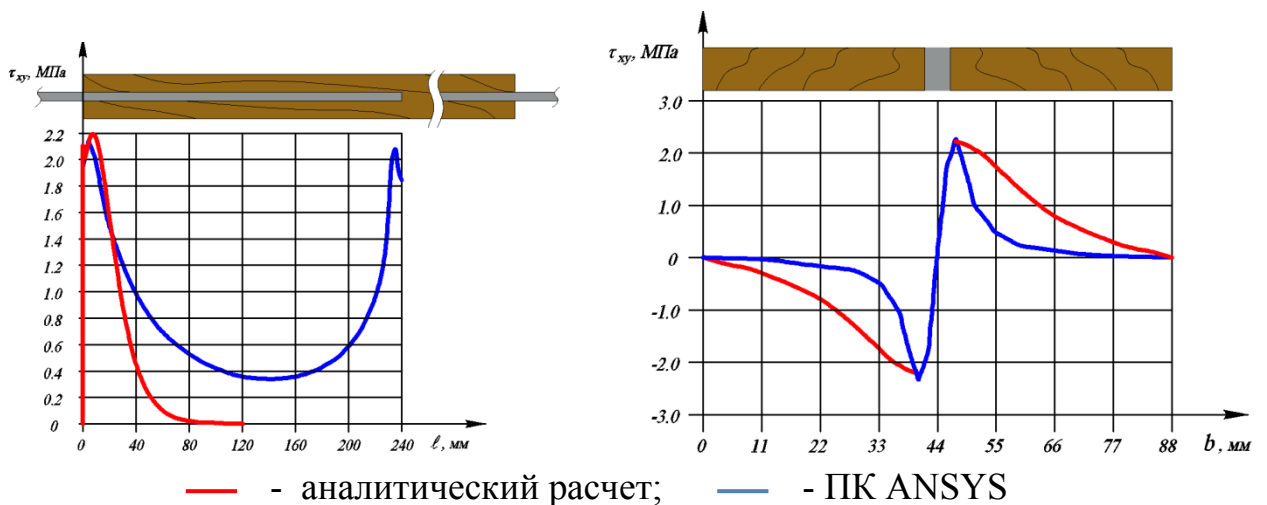


Рисунок 2.12 Графики распределения касательных напряжений в древесине по длине пластины(а) и сечению соединения (б)

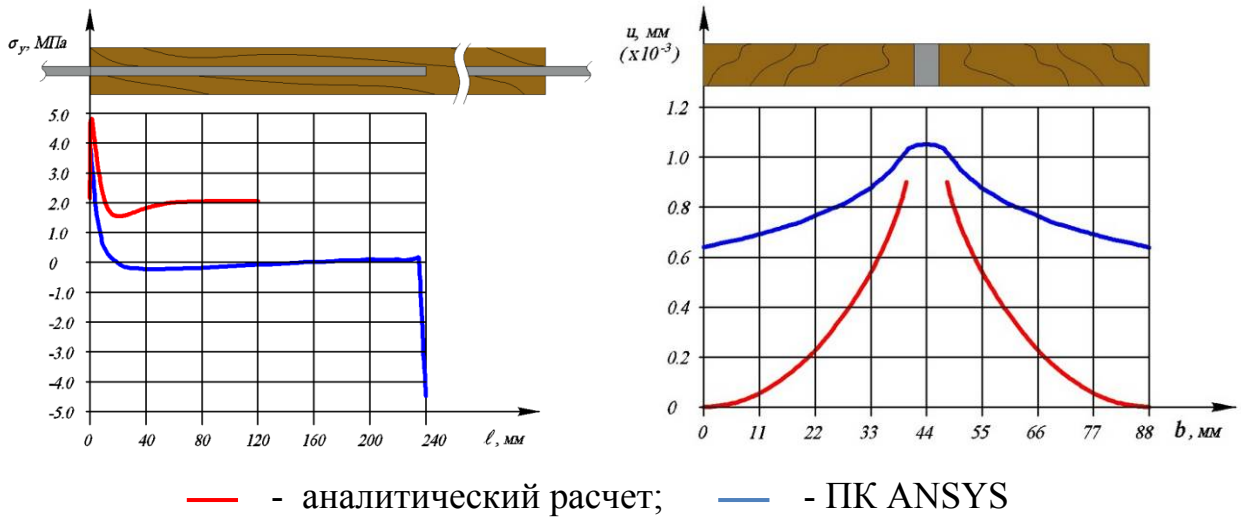


Рисунок 2.13 Графики распределения отрывающих напряжений  $\sigma_y$  по длине пластины (а) и перемещений по сечению (б)

Анализируя результаты теоретических исследований, следует отметить, что при выдергивании пластины из древесины в соединение действуют наиболее опасные, с точки зрения его разрушения, касательные напряжения  $\tau_{xy}$ , вызывающие скол древесины, и нормальные к клеенной поверхности пластины напряжения  $\sigma_y$ , вызывающие отрыв контактных поверхностей друг от друга. При этом касательные напряжения в бруске достигают максимальных значений у торца соединения по контактной поверхности древесины и равны расчетному сопротивлению древесины сколу в клеевых соединениях, интенсивно падают практически до нулевого значения к середине длины клейки пластины и аналогичным образом возрастают до максимального значения к концу клеенной части пластины независимо от ее длины. Отрывающие напряжения  $\sigma_y$ , также максимальны у торца соединения и достигают значений до 60% от расчетного сопротивления отрыва клея от металлической поверхности. Нормальные к сечению напряжения  $\sigma_x$ , как в пластине, так и в бруске, не значительны и составляют соответственно 50% и 10% от соответствующих расчетных сопротивлений. В то же время касательные  $\tau_{xy}$  и нормальные  $\sigma_y$  напряжения практически затухают на расстоянии в 20 мм от контактной поверхности бруса с клеем. В связи с этим, при проектировании соединения

толщину части бруса от клеевой композиции до наружной грани следует принимать не менее 20 мм.

На параметрической конечно-элементной модели соединения с пазами в пластине, созданной в ПК ANSYS (рисунок 2.14), исследовалось влияние угла наклона и глубины прямоугольных в сечении пазов, наносимых на пластину для увеличения адгезии по контакту «клей-металл» (рисунок 2.15, 2.16).

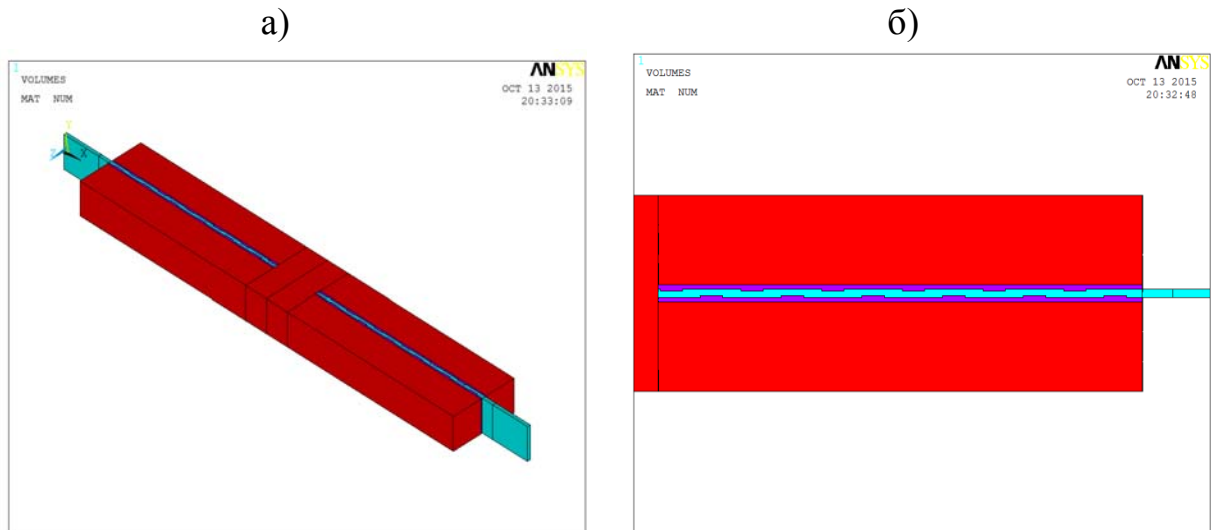


Рисунок 2.14 Геометрическая параметрическая модель экспериментального образца с пазами, выбранными в пластине в аксонометрической проекции (а) и на виде сверху (б)

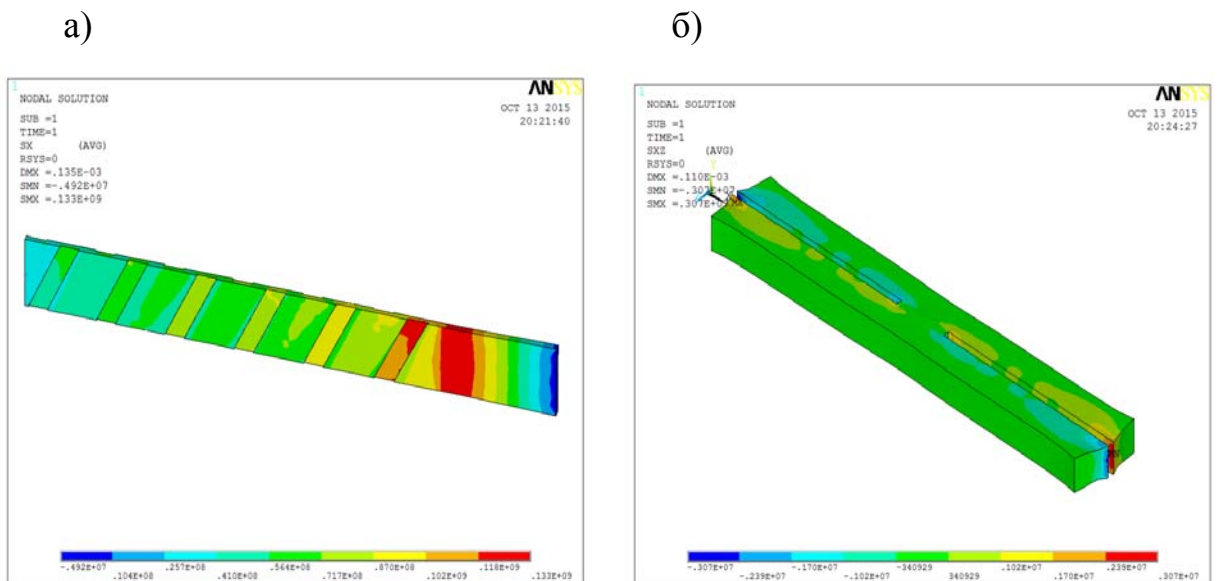


Рисунок 2.15 Карта нормальных напряжений в пластине (а) и касательных в бруске (б)

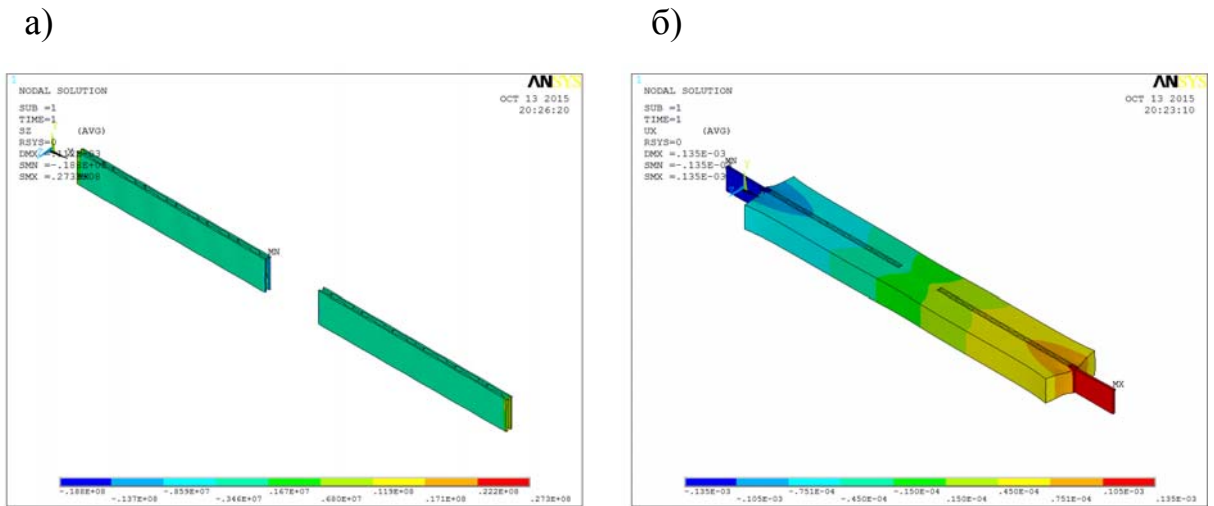


Рисунок 2.16 Карта напряжений нормального отрыва  $\sigma_y$  в клеевом слое (а) и перемещений образца (б)

Варьирование указанными параметрами при 500 пересчетах показало (рис. 2.15, 2.16), что снижение максимальных значений касательных напряжений на 10-12% и деформативности соединения на 8-10% в различных сочетаниях по сравнению с этими же компонентами НДС, возникающими в соединении с пластиной без пазов, происходит при наклоне паза в  $45^\circ \pm 3^\circ$  к продольной оси пластины. Однако, со значительным увеличением глубины паза происходит, с одной стороны незначительное уменьшение касательных напряжений в древесине, с другой стороны – увеличение нормальных напряжений в пластине до критических значений. На этом основании при изготовлении соединения рекомендуется задаваться глубиной паза не более 0,25 от толщины пластины.

### 2.3 Основные результаты теоретических исследований

К основным результатам теоретического исследования следует отнести следующие положения.

1. Аналитическое решение задачи на выдергивание пластины из древесины позволило выявить наличие в соединении двух наиболее опасных с точки зрения его прочности видов напряжений  $\tau_{xy}$  и  $\sigma_y$ , вызывающих скол древе-

сины и отрыв компонентов соединения друг от друга, а также незначительную деформативность соединения, позволяющую отнести его к соединению жесткого типа. При этом наиболее опасными являются касательные напряжения, значения которых при разрушении соединения равны расчетному сопротивлению скола древесины в клеевом соединении (2,1 МПа).

2. Результаты аналитического расчета по характеру распределения и количественным значениям компонентов напряженно-деформированного состояния в соединении, особенно напряжений, вызывающих разрушение соединения, хорошо коррелируются с результатами расчетов в программном комплексе ANSYS. В то же время результаты, полученные в ПК ANSYS имеют высокую сходимость с результатами, полученными в ПК APMCivilEngineering, что в целом свидетельствует об адекватности и корректности проведенных теоретических исследований.

3. Детальный анализ напряженно-деформированного состояния соединения под выдергивающей нагрузкой позволил установить закономерности влияния на работу узловых соединений геометрических и конструктивных параметров стальных вклеенных пластин.

### **3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КЛЕЕВОГО СОЕДИНЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ПЛАСТИН С ДРЕВЕСИНОЙ**

Целью исследования клеевого соединения пластин с древесиной при действии кратковременной нагрузки было:

- определение области наиболее перспективных экспериментальных исследований;
- изучение действительной картины напряженно-деформированного состояния соединения в зависимости от параметров соединения;
- проверка опытным путем теоретических методов расчета клеевого соединения стальных пластин с древесиной;
- выявление конструктивных особенностей, позволяющих рационально проектировать данный вид соединения

Для решения поставленных целей на первый план встала задача разработки методики проведения многофакторных экспериментов для обеспечения объективности исследования с оптимальной минимизацией затрат времени, материалов и трудовых ресурсов.

#### **3.1 Методика обработки экспериментальных данных и проведения эксперимента**

Для составления программы испытаний многофакторного эксперимента был выполнен факторный анализ результатов численных исследований с целью выделить наиболее значимые компоненты эксперимента. Одним из главных методов факторного анализа как раз и является методом главных компонент.

Метод главных компонент совпадает с методом расчленения ковариационной или корреляционной матрицы на совокупность ортогональных векторов (компонент) или направлений по числу рассматриваемых переменных. Указанные векторы соответствуют собственным векторам и собственным значениям корреляционной матрицы. По этому методу собственные значения

выделяются в порядке убывания их величины, что становится существенным, если для описания данных должно быть использовано лишь незначительное число компонент. Векторы попарно ортогональны, и компоненты, полученные по ним, некоррелированы. Хотя несколько компонент могут выделить большую часть суммарной дисперсии переменных, однако для точного воспроизведения корреляций между переменными требуются все компоненты.

В тех случаях, когда применяется метод главных компонент, не нужно делать никаких гипотез о переменных, они не обязаны даже быть случайными.

Факторный анализ заранее объясняет матрицу ковариаций наличием минимального или по крайней мере небольшого числа гипотетических переменных или факторов. В то время, как метод главных компонент ориентирован на дисперсии, факторный анализ ориентирован на ковариации (или на корреляционную связь).

В факторном анализе основным предположением является равенство:

$$X_i = \sum_{r=1}^k a_{ir} * F_r + e_i \quad (3.1)$$

$r=1; (i=1,2,\dots,p)$

где  $X_i$  — ая переменная;

$F_r$  —  $r$ -ый фактор,

$a_{ir}$  — факторная нагрузка,

$k$  — количество факторов,

$e_i$  — остатки, которые представляют источники отклонений, действующие только на  $X_i$ .

Эти  $p$  случайных величин  $e_i$  предполагаются независимыми, как между собой, так и с  $k$  величинами  $F_r$ .

Уравнение (3.1) нельзя проверить непосредственно, поскольку  $p$  переменных  $X_i$  выражены в них через  $(p+k)$  ненаблюдаемых переменных.

Но эти уравнения заключают в себе гипотезу о ковариациях и дисперсиях  $X_p$ , которую можно проверить.

Когда число факторов  $k > 1$ , то ни факторы, ни нагрузки не определяются однозначно, поскольку в уравнении (3.1) факторы  $F_r$  могут быть заменены любым ортогональным преобразованием их с соответствующим преобразованием нагрузок. Это свойство использовано для преобразования или вращения факторов, полученных в каком-либо практическом исследовании.

Вращение подбирается так, чтобы переменные, которые в большей или меньшей степени измеряют некоторые легко опознаваемые стороны, имели бы достаточно высокие нагрузки на один фактор и нулевые или почти нулевые на другие факторы.

Первым этапом исследования многопараметрических процессов является отбор параметров, ответственных за процесс. Из полного списка всех возможных параметров ранговыми методами производят их ранжирование и априорное отсеивание.

Математическая обработка результатов наблюдения за оставленными на первом этапе исследования параметрами включает в себя проверку гипотезы о нормальности распределения результатов наблюдения в выборке по каждому параметру, получение корреляционной матрицы и регрессионный анализ.

Обработку целесообразно вести, производя предварительно центрирование и нормирование результатов наблюдений, т. е. переходя к стандартизованным переменным.

При решении задач, связанных с отысканием оптимальных условий протекания сложных многопараметрических процессов, широкое распространение получили полиномиальные математические модели процесса:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^m b_i * X_i + \sum_{i < j}^m b_{ij} * X_i * X_j + \dots \quad (3.2)$$

где  $y$  — параметр оптимизации;

$b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  — выборочные коэффициенты регрессии, полученные по результатам эксперимента;



$X_i, X_i X_j$  — параметры и их взаимодействия,  $i, j=1, 2, \dots$ .

Теоретически коэффициенты уравнения регрессии можно определить из системы линейных нормальных уравнений, используя метод наименьших квадратов относительно этих коэффициентов.

Однако для вычисления коэффициентов уравнений регрессии многопараметрических процессов ( $m > 2$ ) и высокого порядка полинома ( $k > 2$ ) система нормальных уравнений практически оказывается малоприменимой ввиду большой потери точности при ее решении (причем потеря точности сказывается тем сильнее, чем больше количество переменных и выше порядок полинома). Не решенным остается и вопрос оптимального порядка полинома.

В случае нелинейной зависимости вид функции  $f_s(X_s)$  определяется с помощью корреляционного поля, потом по виду определяется тип зависимости и способом наименьших квадратов рассчитываются коэффициенты.

Расчет выполнялся по комплексу программ, описание которых приведено в / 122 /.

Для определения парных обусловленностей была построена матрица исследования с параметрами-столбиками:

- (1. Ширина пластины -  $b_p$ , мм)
- (2. Толщина пластины -  $t_p$ , мм)
- (3. Толщина клея -  $t_k$ , мм)
- (4. Нагрузка -  $N$ , кН)
- (5. Длина вклеенной части пластины -  $l_{вкл}$ , мм)
- (6.  $b_{хст}$ )
- (7.  $b_{уст}$ )
- (8.  $t_{худр}$ )
- (9.  $b_{др}$  (м))
- (10.  $b_{хдр}$ )
- (11.  $b_{удр}$ )
- (12.  $b_{клей}$  (м))
- (13.  $U_{ст}$ )

Результаты факторного анализа приведены ниже в виде таблиц программного счета.

Таблица-Сумма квадратов нагрузок по факторам

НОМЕР ФАКТОРА	СУММА КВАДРАТОВ НАГРУЗОК
1	4.936
2	1.766
3	3.226
4	1.339

Таблица-Объединение по фактору-3

НОМЕР	НАЗВАНИЕ ПАРАМЕТРА	НАГРУЗКА
1	(1.Ширина пластины $b_p$ , мм)	0.7953
2	(2.Толщина пластины - $t_p$ , мм)	0.9155
3	базовый параметр- (2.Толщина пластины - $t_p$ , мм)	2

Таблица-Объединение по фактору-1

НОМЕР	НАЗВАНИЕ ПАРАМЕТРА	НАГРУЗКА
4	(4.Нагрузка $N$ , кН)	-0.8313
6	(6.бхст)	-0.7063
7	(7.буст)	-0.7523
9	(9.бдр (м))	-0.8233
10	(10.бхдр)	-0.8633
11	(11.будр)	-0.8660
12	(12.бклей (м))	-0.7647

в факторе-1 базовый параметр-11 (11.будр)

Таблица-Объединение по фактору-2

НОМЕР	НАЗВАНИЕ ПАРАМЕТРА	НАГРУЗКА
5	(5.Длина клеенной части пластины - $l_{вкл}$ , мм)	0.9319
13	(13.Уст)	0.8247

в факторе- 2 базовый параметр-5 (5.Длина клеенной части пластины -  $l_{вкл}$ , мм)

Таблица-Объединение по фактору-4

НОМЕР	НАЗВАНИЕ ПАРАМЕТРА	НАГРУЗКА
8	(8.тхудр)	0.8663

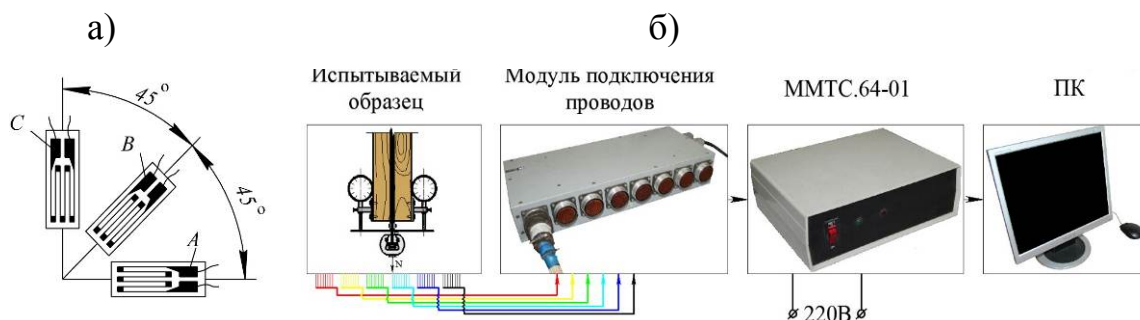
в факторе- 4 базовый параметр- 8 (8.тху др)

Таким образом, по результатам факторного анализа наиболее значимыми факторами в проведенных численных исследованиях явились:

- длина вклеенной части пластины (нагрузка - 0,9319);
- толщина пластины (нагрузка - 0,9155);
- касательное напряжение  $\tau_{xy}$  в древесине (нагрузка - 0,8663);
- отрывающее напряжение  $\sigma_y$  (нагрузка - 0,8660);
- деформация пластины  $u_{ст}$  (нагрузка - 0,8247).

Полученный в результате проведения пилотных экспериментов опыт и результаты факторного анализа позволили определить и методику проведения эксперимента. Необходимость определения влияния значимых параметров пластин на напряженно деформированное состояние в соединении предопределило выбор методов исследований. В частности, для определения напряжений в компонентах соединения отдано предпочтение методу натурной тензометрии, поскольку он наилучшим образом удовлетворяют критерию «стоимость-эффективность», при этом обладая оптимальным сочетанием характеристик / 204 /. Метод тензометрии позволяет точно определять деформации и напряжения, в том числе касательные при помощи розеток из одиночных тензодатчиков (рисунок 3.1 а)

Датчики типа ПКС-12-200 и тензосистема ММТС-64 (рисунок 3.1 б), используемые в эксперименте, изготовлены в СибНИА им. Чаплыгина. Инструкция по применению комплекта позволяет применять датчики и аппаратуру при тензометрировании как древесины, так и стали, при условии их приклейки клеем «Циакрин».



а) прямоугольная тензорозетка; б) тензосистема ММТС 64-01

Рис. 3.1 Средства натурной тензометрии

Эксперименты по выдергиванию клеенных стальных пластин из бруса проводились на испытательной машине ИР-5047 с развиваемым усилием в 100 кН Ивановского ООО «Точприбор».

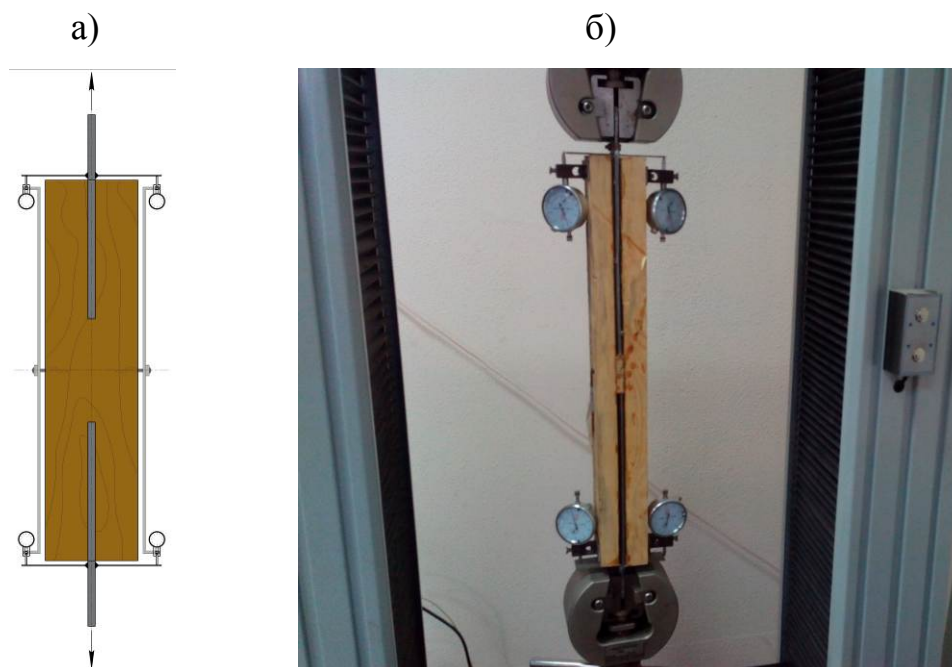


Рисунок 3.2 Схема размещения индикаторов (а) и установка образца в захваты испытательной машины (б)

Деформации определялись путем замера смещения клееной пластины относительно торца призмы индикаторами часового типа с ценой деления  $1 \times 10^{-6}$  и  $1 \times 10^{-5}$  м. Крепление индикаторов показано на рисунке 3.2 а. На рисунке 3.2 б показано размещение образца в захватах разрывной машины.

Испытания проводились при температуре 18-20°C и влажности 50-60 %.

### 3.2 Конструкция опытных образцов и материалы соединения

Испытания проводились на образцах в виде призм, аналогичных примененным в предварительном эксперименте. Перед клейкой пластин в призмах выбирались пазы шириной, равной толщине клеиваемой пластины, увеличенной на 0,002 м. Ширина призм с каждой стороны от пластины назначалась из условия, определенных по результатам численного эксперимента, не менее 30 мм до поверхности пластин. Высота призмы соответствовала ширине кле-

иваемых пластин. Образцы изготавливались по сериям, у которых варьировались толщина пластин (4, 5, 6, 8 и 10 мм), ширина пластин (от 40 до 100 мм) и длина клеиваемой части (2b, 4b, 6b, 8b).

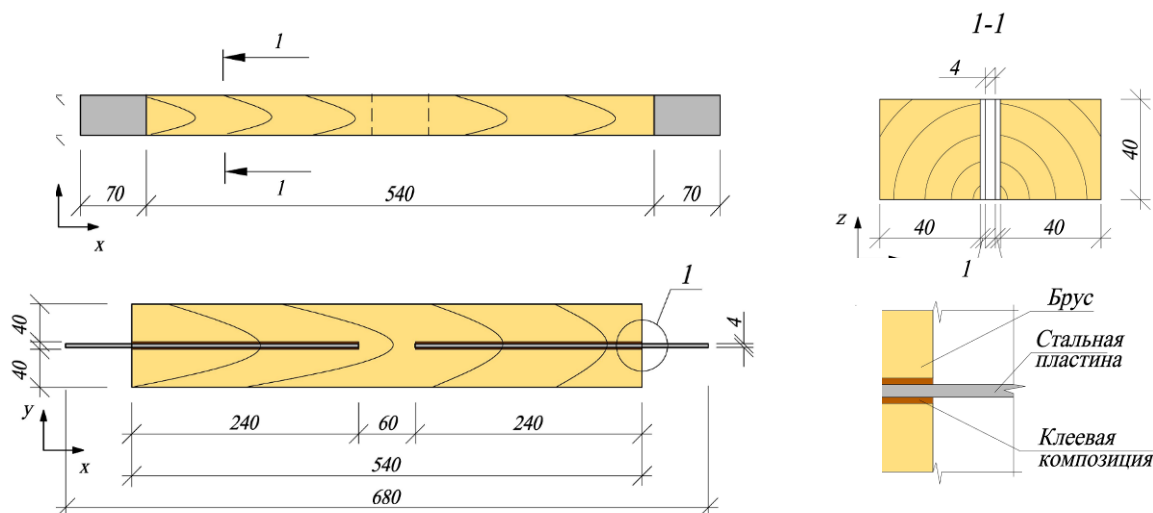


Рисунок 3.3 Геометрическая форма экспериментального образца с клеенной пластиной  $4 \times 40 \times 240 (l_{\text{вкл}})$

На одном образце из каждой серии наклеивались тензодатчики. Перед наклейкой тензодатчиков в пластине под них с обеих сторон выбирали пазы (рис. 4а). Затем, для увеличения адгезии по контакту «клей-металл», обе поверхности стальных пластин были развиты наклонными пазами под углом  $50^\circ$  к продольной оси шириной 2,5 мм глубиной 0,75 мм, нанесенными на вертикально-фрезерном станке с шагом 2,5 мм (рис. 4б). После монтажа датчиков типа ПКС-12-200 (рис 4в) пластину клеивали в деревянный брус.



а) фрезерование пазов под тензодатчики; б) фрезерование пазов для увеличения адгезии пластины с клеевой композицией; в) монтаж тензодатчиков

Рисунок 3.4 Подготовка пластины перед клеиванием в брус

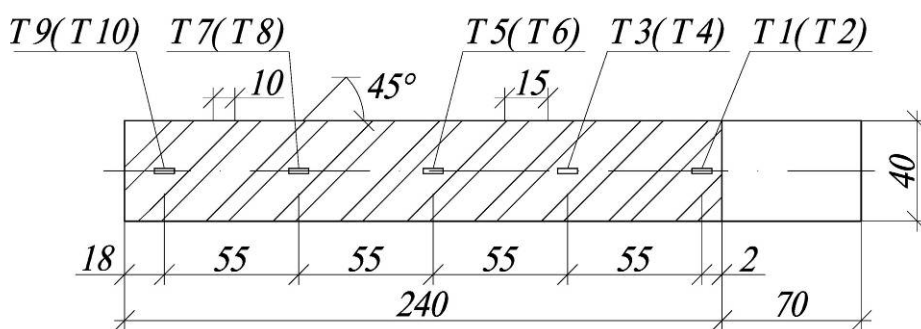


Рисунок 3.5 Схема наклейки на пластину и маркировка тензодатчиков

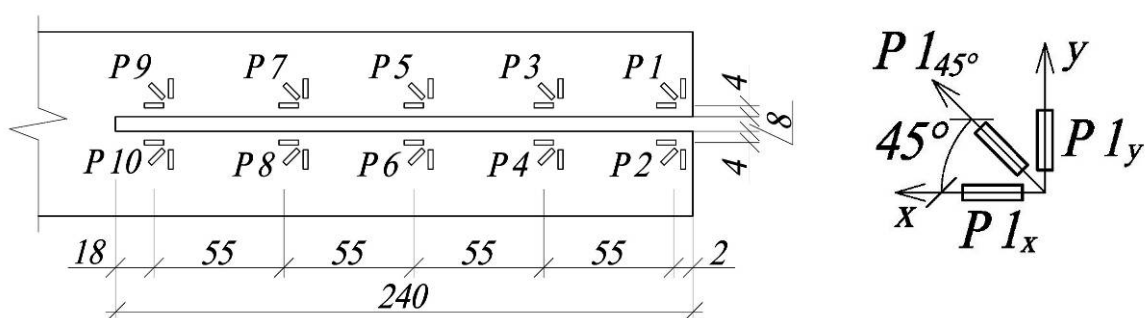


Рисунок 3.6 Схема наклейки на брус и маркировка тензодатчиков

Перед наклейкой тензодатчиков в пластине с обеих сторон выбирали пазы (рис. 4а) под их наклейку. Затем, для увеличения адгезии по контакту «клей-металл», обе поверхности стальных пластин были развиты наклонными пазами под углом  $50^\circ$  к продольной оси шириной 2,5 мм глубиной 0,75 мм, нанесенными на вертикально-фрезерном станке с шагом 2,5 мм (рис. 4б). После монтажа датчиков типа ПКС-12-200 (рис 4в) пластину клеивали в деревянный брус.

Для определения продольных напряжений в сечениях деревянных брусков в плоскости контакта «клей-древесина» на внутреннюю поверхность брусков наклеивали одиночные тензодатчики типа ПКС-12-200. Для определения напряжений  $\tau_{xy}$  на верхних гранях брусков монтировали прямоугольные трехэлементные тензорозетки (рисунок 3.1 а).

Подготовленный образец закреплялся в захватах испытательной машины ИР-50-47, подключался к тензосистеме ММТС 64.01 и нагружался. Общий вид экспериментальной установки показан на рис. 3.7. Нагружение образцов осуществлялась ступенями в соответствии с рекомендациями / 87 /.



Рис. 3.7 Испытательная установка для изучения НДС соединения

Все серии образцов изготавливались из одной партии древесины сосны с влажностью  $9,0 \pm 1\%$ . Формирование выборки при определении физико-механических характеристик древесины осуществляли методом случайного отбора. Объем выборки устанавливали с учетом предполагаемых значений дисперсии по ГОСТ 16483.0-78\*. после проведения испытаний вычисляли относительную точность измерений при заданной доверительной вероятности  $\alpha = 0,02$ . Если точность оказывалась недостаточной, то требуемый объем выборки вычисляли с учетом полученных значений дисперсии или коэффициентов вариации. При проведении стандартных испытаний (смотри главу 2) определяли предел прочности древесины при сжатии вдоль волокон по ГОСТ 164483.10-73\*, условный предел прочности при сжатии поперек волокон по ГОСТ 164483.110-73\*, модули упругости древесины при сжатии поперек волокон в радиальном и тангенциальном направлении по ГОСТ 164483.25-73\*. Опытные физико-механические характеристики приведены в таблице 3.1.

В качестве пластин использовался полосовой прокат также из одной партии для каждого типоразмера сечения по ГОСТ 103-2006. В соответствии с сертификатом поставки материал проката сталь СтЗпс со следующими физико-

Таблица 3.1 – Физико-механические характеристики образцов древесины

Наименование показателей	Значения min-max	Статистические показатели				
		$M$	$\sigma$	$\nu, \%$	$m$	$P, \%$
Влажность, %	8,0-9,6	8,8	0,51	4,30	0,06	0,51
Предел прочности при сжатии вдоль волокон, МПа	35,8-45,3	40,0	2,37	5,93	0,28	0,70
Условный предел прочности при сжатии поперек волокон, МПа	3,3-4,7	3,8	0,37	9,74	0,04	1,05
Модуль упругости при сжатии вдоль волокон, МПа	9,9-12,5	11,0	0,84	7,64	0,10	0,91
Модуль упругости при сжатии поперек волокон в радиальном направлении, МПа	589-731	648	36,4	5,62	4,3	0,66
Модуль упругости при сжатии поперек волокон в тангенциальном направлении, МПа	488-590	532	32,3	6,07	3,8	0,71

Примечания. Статистические показатели определены по результатам испытаний шести серий образцов. Количество образцов в серии 12 штук.  $M$  – среднее арифметическое;  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение;  $\nu$  – вариационный коэффициент, %;  $m$  – средняя ошибка;  $p$  – показатель точности, %.

механическими и упругими характеристиками: модуль упругости при растяжении – 200 000 МПа, коэффициент Пуассона – 0,3, модуль упругости при сдвиге – 81 000 МПа, расчетное сопротивление растяжению – 235 МПа.

Вклеивание стержней производилось вдоль волокон древесины эпоксидно-цементным компаундом ЭПЦ-1 на базе эпоксидной смолы ЭД-20.



### 3.3 Основные результаты экспериментальных исследований

В результате испытаний установлено, что соединения на клеенных стальных пластинах обладают достаточной прочностью и малой деформативностью. Исследования показали, что прочность соединения, в первую очередь, зависит от геометрических параметров стальной пластины – длины клеенной части, ширины и толщины пластины.

Разрушение образцов происходило хрупко, в результате скалывания древесины по слою «клей-древесина» от действующих касательных напряжений, отмеченного у 95% образцов (рисунок 3.6). Еще у 5% образцов разрушение, начинавшееся скалыванием древесины около торца соединения, заканчивалось отрывом в средней части (рисунок 3.7), при этом нагрузка разрушения соответствовала или на 2-4% была больше указанной выше. Характерные зоны разрушения разделены линией стенки паза.

Толщина выколовшегося слоя древесины колебалась от 0,001 до 0,004 м. После скалывания на пластине оставалась клеевая обойма с волокнами древесины. Разрушению от скалывания предшествовали значительный рост деформаций и наличие потрескивания. На первом этапе разрушения происходило скалывание древесины в начальной зоне клейки пластины с дальнейшим распространением в глубь. На последующем этапе происходил резкий выкол деревянной призмы вокруг клеевой обоймы стержня.

Разрушению соединения от скалывания предшествовало активное развитие значительных, до 0,003 мм, деформаций соединения.

Ниже, на рисунках 3.10 - 3.13 приведены графики зависимости разрушающей нагрузки от параметров клеенных пластин.

На графиках распределения касательных напряжений (рисунки 3.14- 3.17) четко прослеживается неравномерность распределения касательных напряжений в древесине по длине клеенной части пластины, при чем, максимальные значения находятся у концов пластины, минимальные – в средней части длины клейки.



Рисунок 3.8 Характерное разрушение образца скалыванием древесины



Рисунок 3.9 Разрушение отдельных образцов скалыванием с последующим отрывом по поверхности «клей-сталь»

При этом с увеличением длины клежки нарастание несущей способности соединения уменьшается, а при длине клежки более  $8b$  практически приостанавливается (процент увеличения несущей способности не превышает 10% от максимального значения, достигаемого при длине клежки  $8b$ ). Данный факт необходимо учитывать в практических расчетах. По аналогии с СП 64.13330.2011 / 104 / такой учет целесообразно выполнить при помощи корректировочного коэффициента  $k_l$ . Квадратичная аппроксимация полученных экспериментальных кривых фактического распределения касательных напряжений по длине клеенной части пластины позволила получить уравнение для коэффициента  $k_l$ , которое удобно с точки зрения практического применения:

$$k_l = 1,125 + 0,9l^2 - 1,36l \quad (3.3)$$

Отметим, что использование аппроксимационной формулы дает погрешность расчета не более 2%.

Аналогичная аппроксимация экспериментальных данных, отражающих линейную зависимость прочности соединения от толщины пластины, позволила получить следующее значение коэффициента  $k_t$ , учитывающего это влияние.

$$k_t = 0,85 + 30t_{nn} \quad (3.4)$$

Из графиков, приведенных на рисунке 3.18 следует, что, во-первых, приращение значений нормальных растягивающих напряжений при ступенчатом нагружении образца одинаковы, что подтверждает тип соединения. Во-вторых, их значения увеличиваются от конца клеенной части к торцу соединения и, судя по результатам численных исследований, достигают максимума за пределами клеенной части. Поэтому при практическом расчете соединения следует сечение открытой части пластин проверять из условия прочности при растяжении-сжатии.

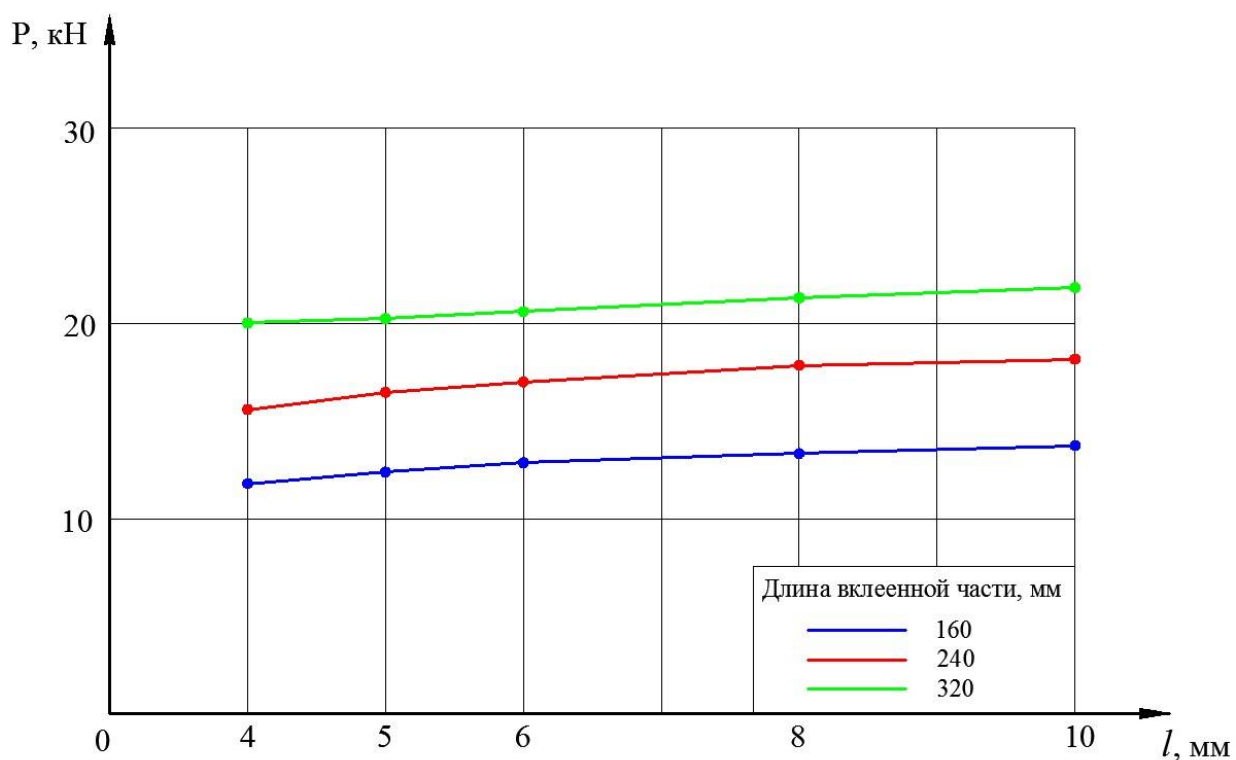


Рисунок 3.10 Зависимость разрушающей нагрузки от толщины пластины шириной 40 мм

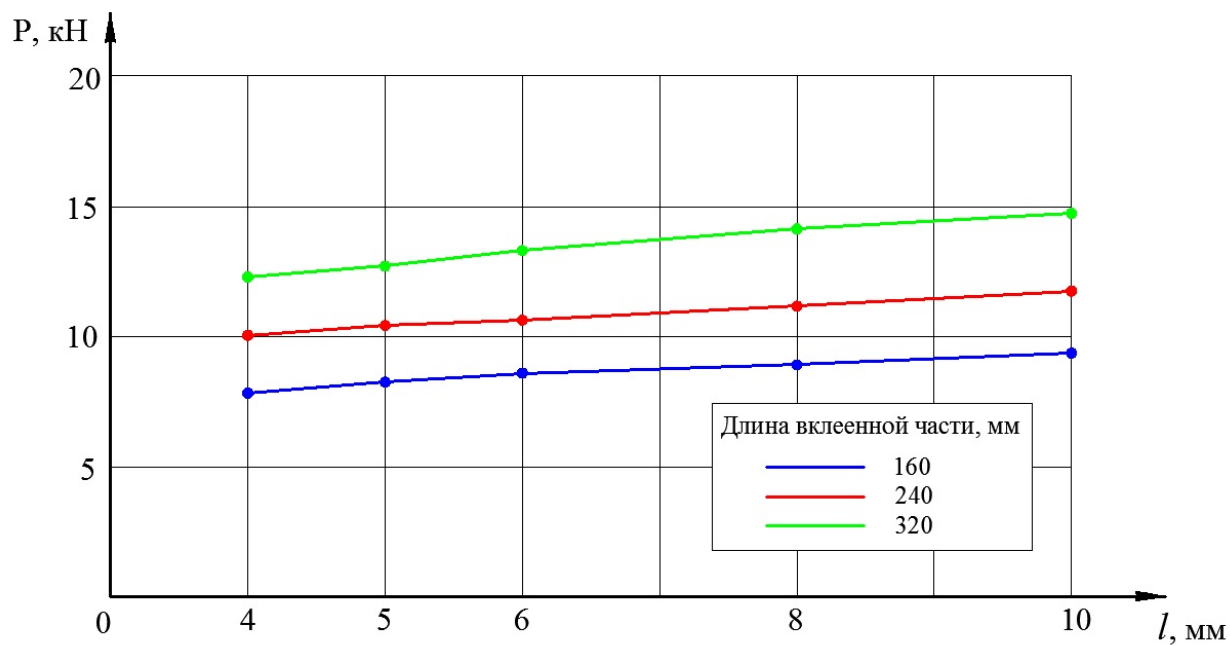


Рисунок 3.11 Зависимость разрушающей нагрузки от толщины пластины шириной 50 мм

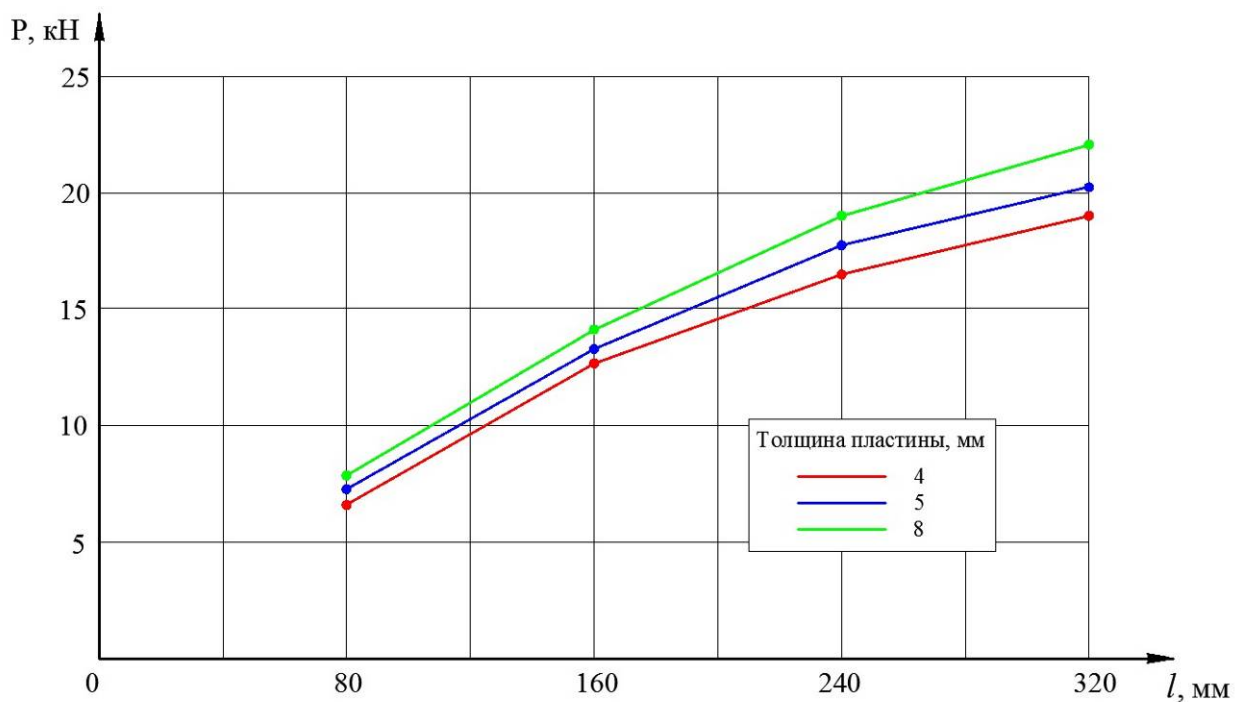


Рисунок 3.12 Зависимость разрушающей нагрузки от длины вклеенной части пластины шириной 40 мм

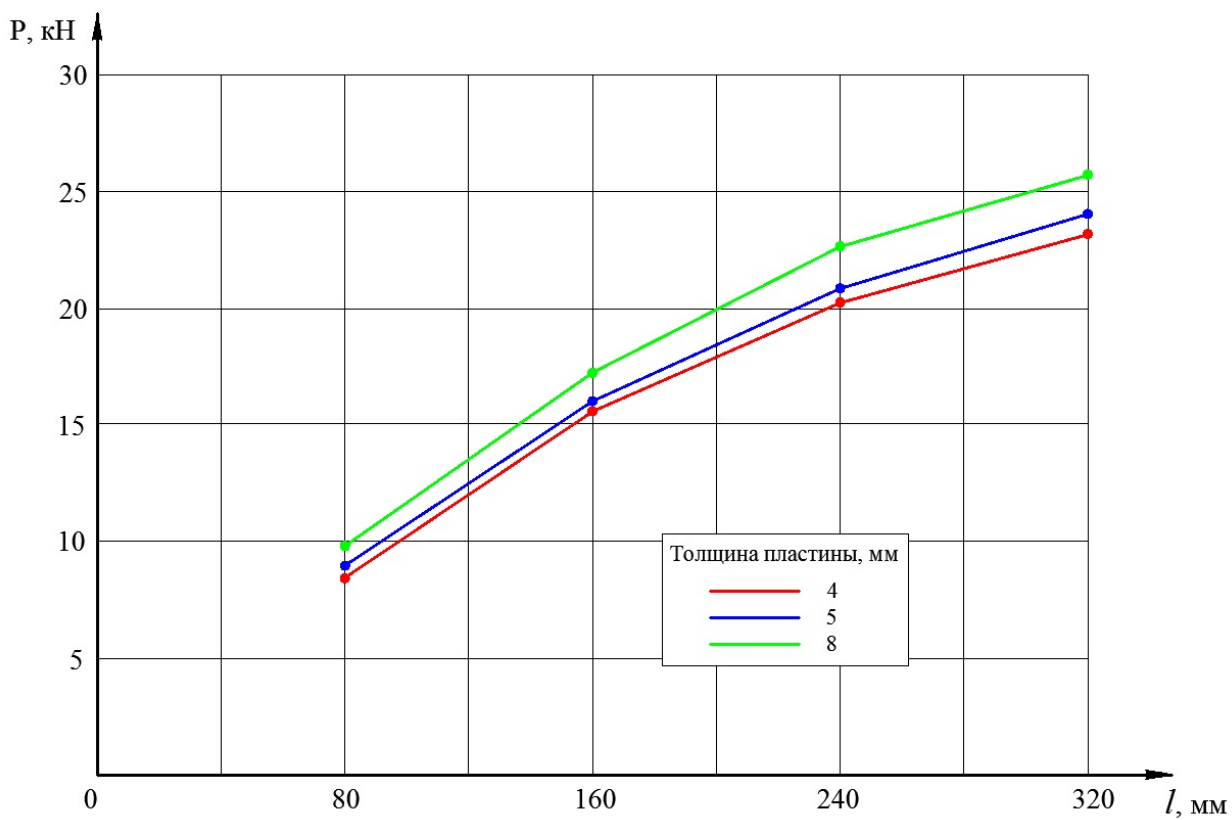


Рисунок 3.13 Зависимость разрушающей нагрузки от длины вклеенной части пластины шириной 50 мм

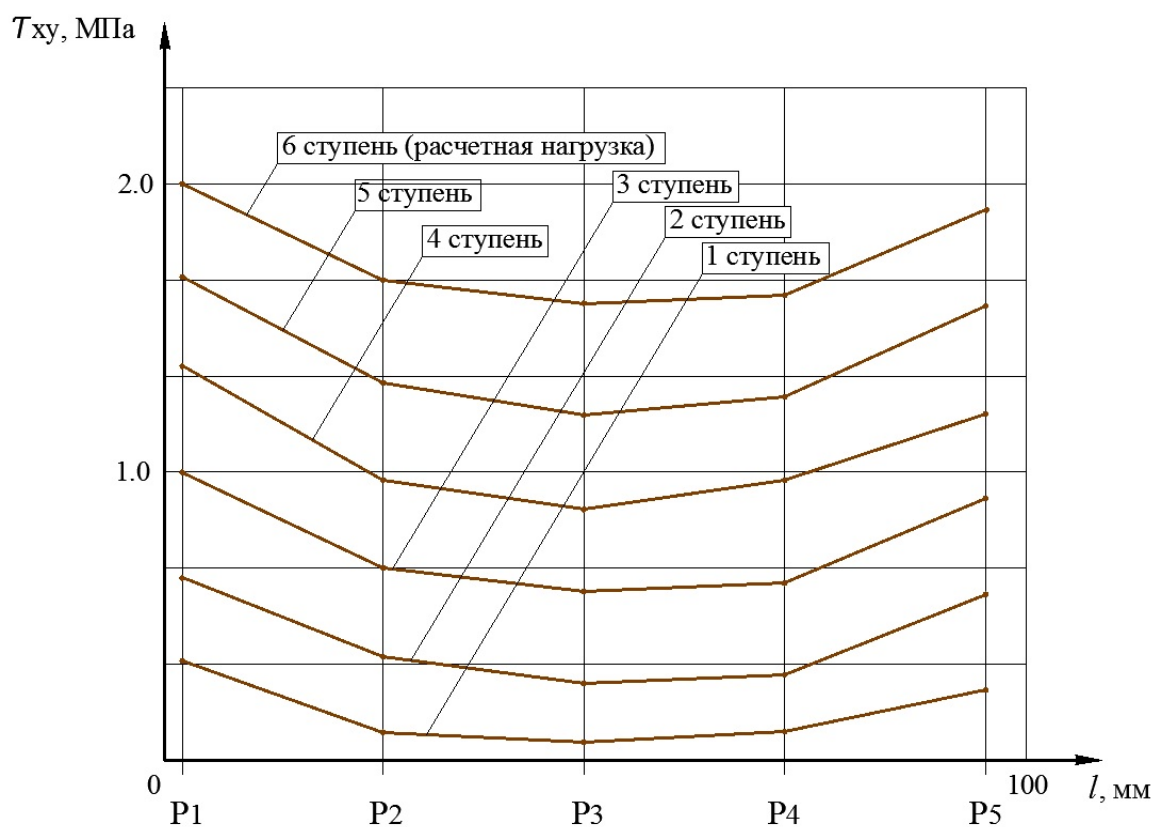


Рисунок 3.14 Распределение касательных напряжений по длине  $2b$  вклеенной части пластины (по ступеням нагружения)

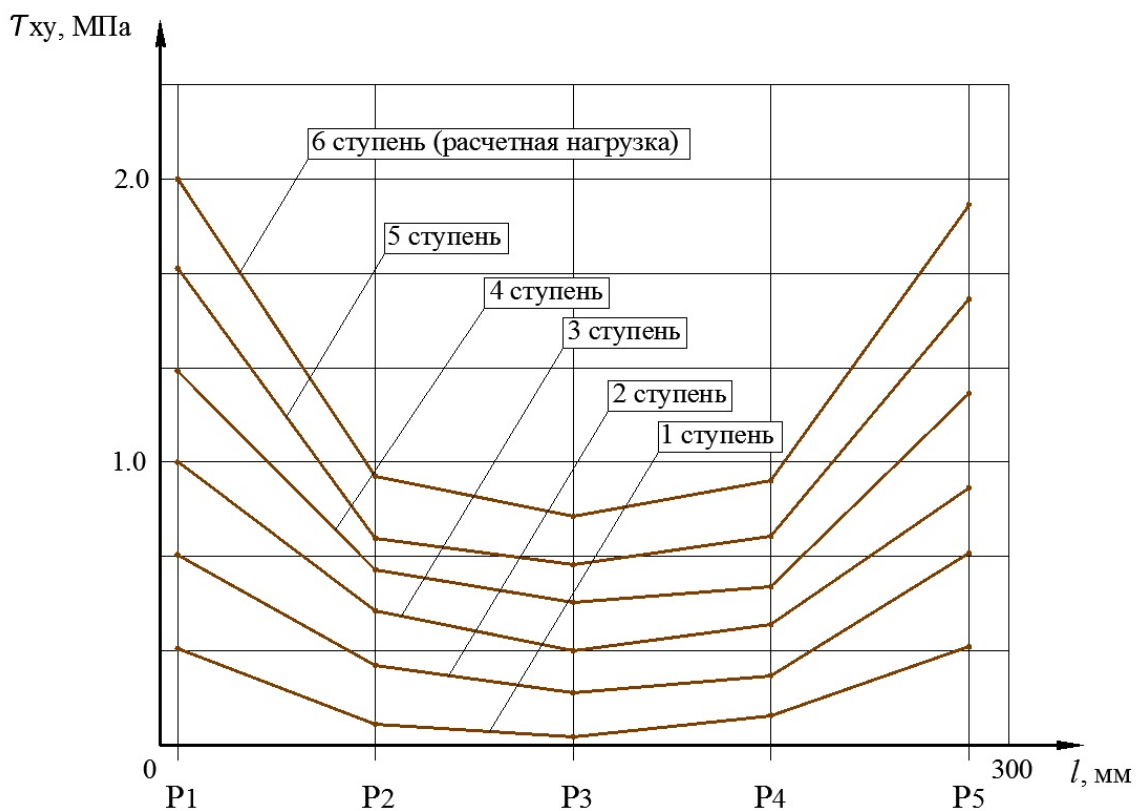


Рисунок 3.15 Распределение касательных напряжений на длине  $4b$  вклеенной части пластины (по ступеням нагружения)

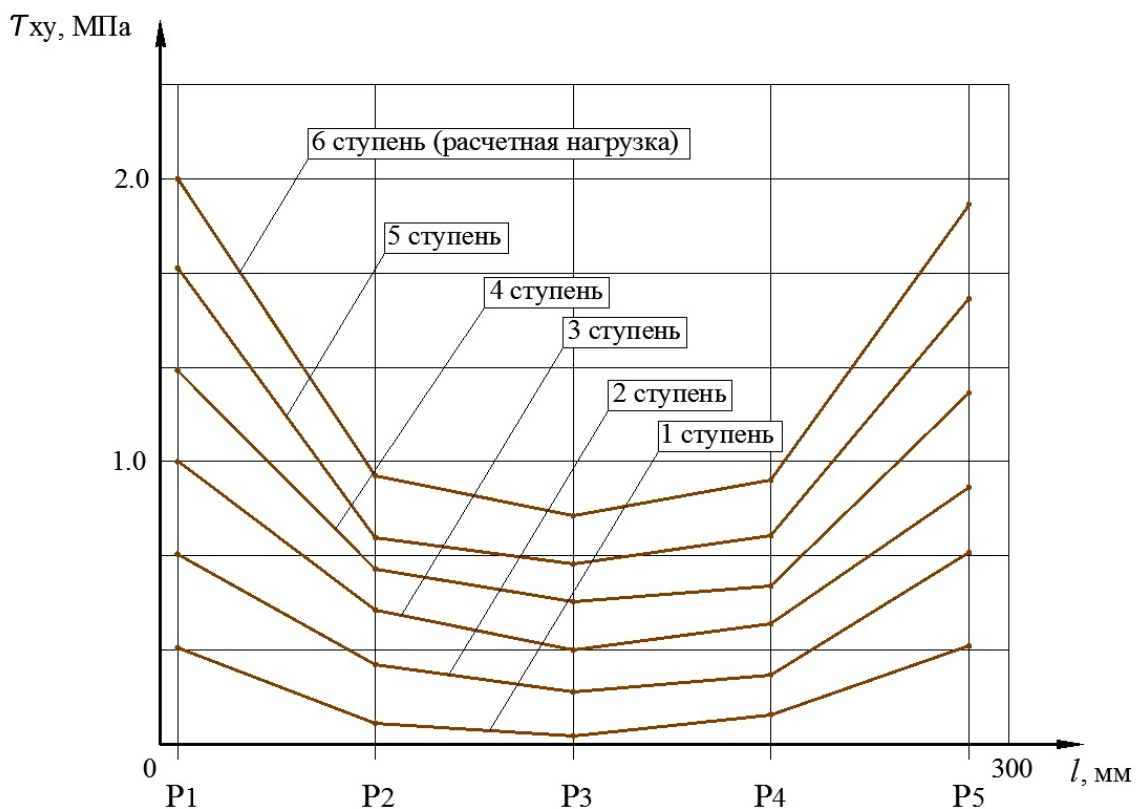


Рисунок 3.16 Распределение касательных напряжений на длине  $6b$  вклеенной части пластины (по ступеням нагружения)

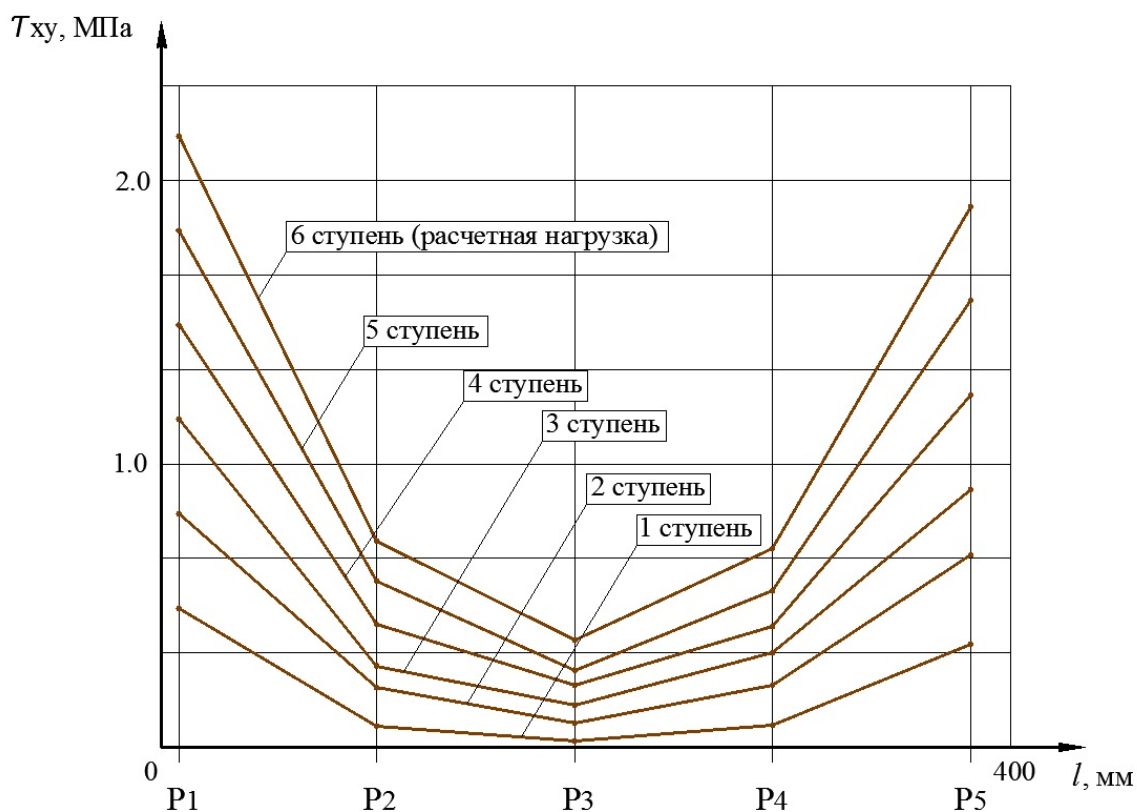
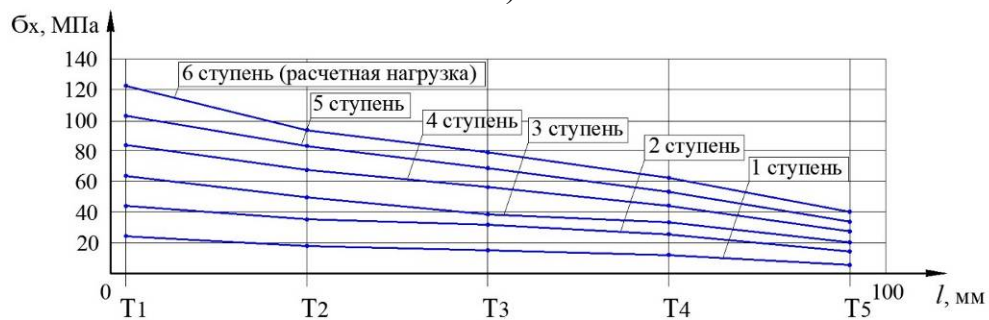


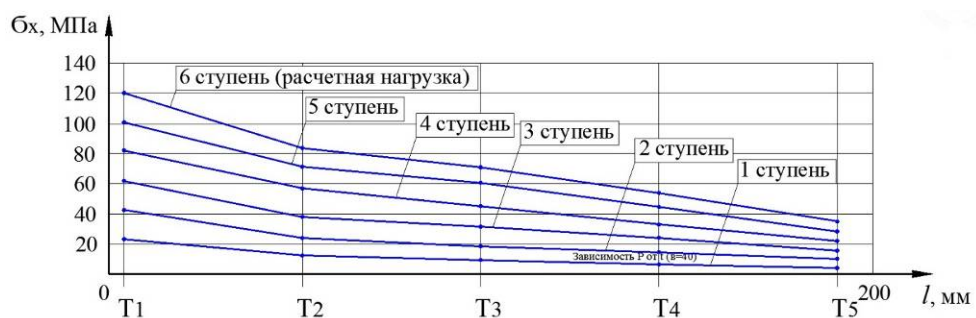
Рисунок 3.17 Распределение касательных напряжений на длине  $8b$  вклеенной части пластины (по ступеням нагружения)



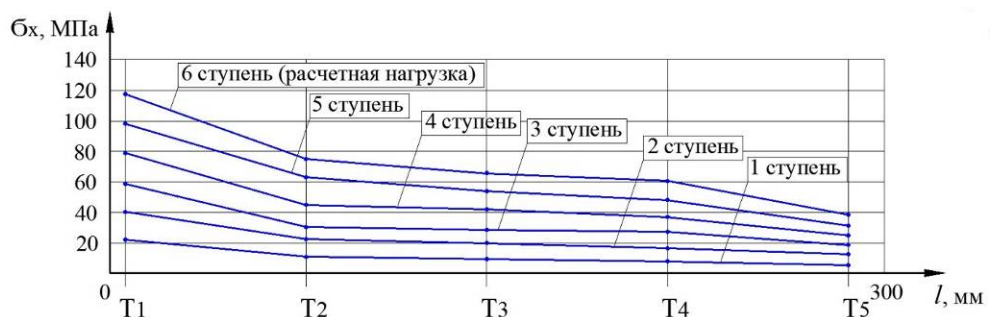
а)



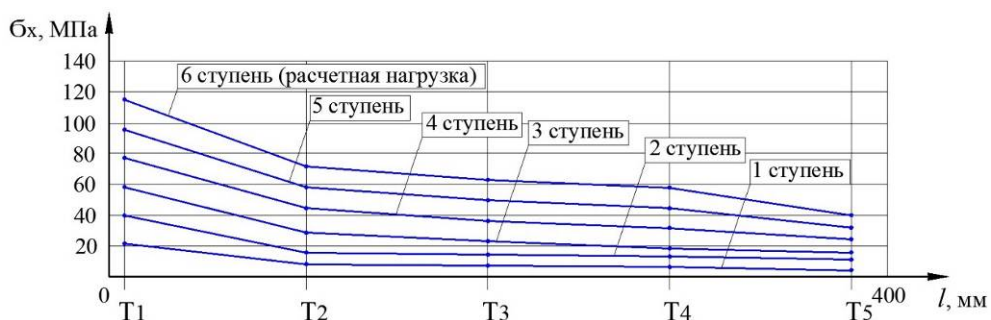
б)



в)



г)



а)  $l_{вкл} = 2b$  мм; б)  $l_{вкл} = 4b$  мм; в)  $l_{вкл} = 6b$  мм; г)  $l_{вкл} = 8b$  мм

3.18 Зависимость нормальных напряжений в пластине 5x50 мм от длины вклеенной части  $l_{вкл}$  (по ступеням нагружения)



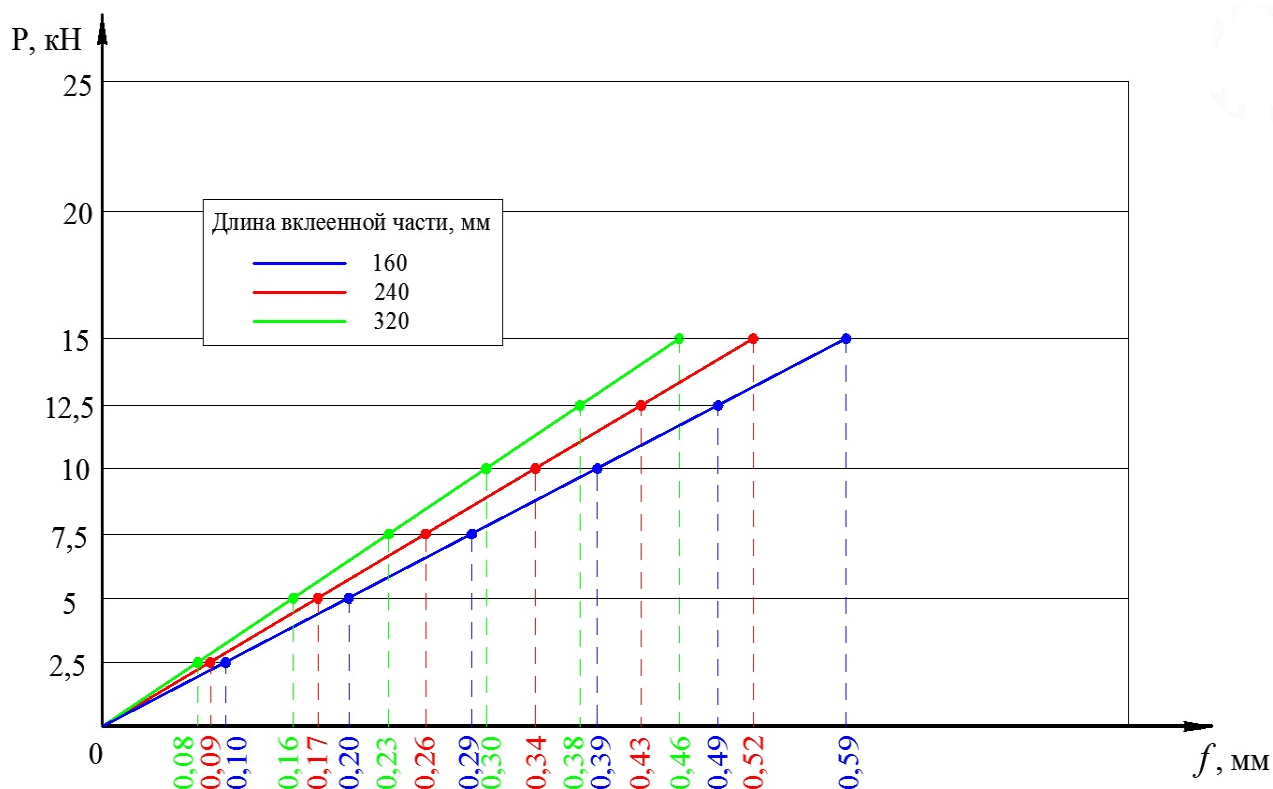


Рисунок 3.19 График «нагрузка – деформация»

Экспериментально определенная деформация соединения при ее выдергивании не превышает 0,6 мм (рисунок 3.19), что позволяет говорить о жесткости соединения, превышающей жесткость нагельного соединения в 3 раза.

В результате проведенных исследований также выявлено, что отрывающие напряжения в древесине, направленные перпендикулярно продольной оси соединения, максимальны у торца соединения по контакту «клей-древесина», уменьшаются с увеличением длины клежки и затухают в брус до нулевого значения на расстоянии до 20 мм от торца пластины и имеют тенденцию к снижению до нулевого уровня на расстоянии в 30 мм от контактной поверхности «клей-древесина» по ширине бруса независимо от размеров сечения. В связи с этим при проектировании соединения со сквозным по высоте пазом, толщину части бруса от клеевой композиции до наружной грани следует принимать не менее 30 мм.

### 3.4 Сравнение результатов экспериментальных и численных исследований

С целью оценки возможности применения расчета соединений элементов деревянных конструкций на клеенных пластинах с применением программных комплексов было проведено сопоставление экспериментальных и теоретических напряжений, возникающих в применяемых материалах. Кроме того, проводилось сравнение экспериментальных и теоретических деформаций соединений при расчете по второму предельному состоянию.

Следует отметить, что экспериментальные результаты отбирались из большего количества опытных данных с критическим анализом для исключения влияния случайных факторов, искажающих действительную картину напряженного состояния. Напряженное состояние в точке дублировалось несколькими тензодатчиками на одинаковых типоразмерах образцов. Аномальные показания тензодатчиков при анализе экспериментальных данных исключались.

Для достоверности выводов сравнение результатов проводилось по сериям, объединяющим образцы одинаковых типоразмеров.

В рисунке 3.20 приведены сравнение экспериментальных напряжений в древесине с клеенной стальной пластиной  $5 \times 50 \times 300 (l_{вкл})$  и соответствующими величинами, полученными в програмном комплексе ANSYS. Сравнение показывает, что экспериментальные и теоретические результаты достаточно хорошо согласуются друг с другом. Отклонение значений напряжений составляет до 6 % в точках начальной и конечной зоны клейки, где напряжения значительны. В отдельных точках разница между ними не превышает 3 %. В точках с меньшим значением напряжений погрешность увеличивается до 12%

Сравнение экспериментальных касательных напряжений в брус  $\sigma_o^{\exists}$  при клеивании стальной пластины  $5 \times 50 \times 300 (l_{вкл})$  со значениями напряжений, подсчитанных в программном комплексе  $\sigma_o^{ПК}$  на последней ступени нагружения (при расчетной нагрузке), приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Сравнение напряжений в стальной пластине

№ ступени	№ Датчика	Величины полученные		Расхождение, %
		по эксперименту $\sigma_{\sigma}^{\text{э}}$ , МПа	в ПК $\sigma_{\sigma}^{\text{ПК}}$ , МПа	
1	2	3	4	5
6	P1	2,04	2,13	4,2
	P2	0,98	0,91	7,1
	P3	0,81	0,71	12,3%
	P4	0,95	0,91	4,2
	P5	2,01	2,12	5,2%

Несмотря на небольшие различия, соответствие характера распределения теоретических и экспериментальных напряжений в поперечных сечениях деревянной призмы прослеживается на всех типоразмерах образцов. Подтверждением тому служит характер их разрушения. Наиболее интенсивное развитие трещин наблюдается в зонах, близких к торцу деревянной призмы, что подтверждается слышимым треском и увеличением деформации соединения на торце. Разрушение происходит в результате скола по контактной поверхности древесины с клеем, что также соответствует зоне максимальных напряжений.

Оценка возможности применения метода конечных элементов для получения картины распределения напряжений в поперечных сечениях стальной пластины по длине вклеенного стержня проводилась и графическим сравнением результатов счета в ПК ANSYS с экспериментальными значениями (рисунок 3.20). Сопоставление теоретических кривых распределения напряжений с экспериментальными точками показывает достаточно хорошую сходимость полученных значений.

Совпадение величин напряжений оказалось вполне удовлетворительным, и разница между ними не превышает 9 %. В отдельных точках расхождение не превышало 2 %. Переход распределения напряжений в поперечных сечениях стальной пластины от резко неравномерного в начале вклейки

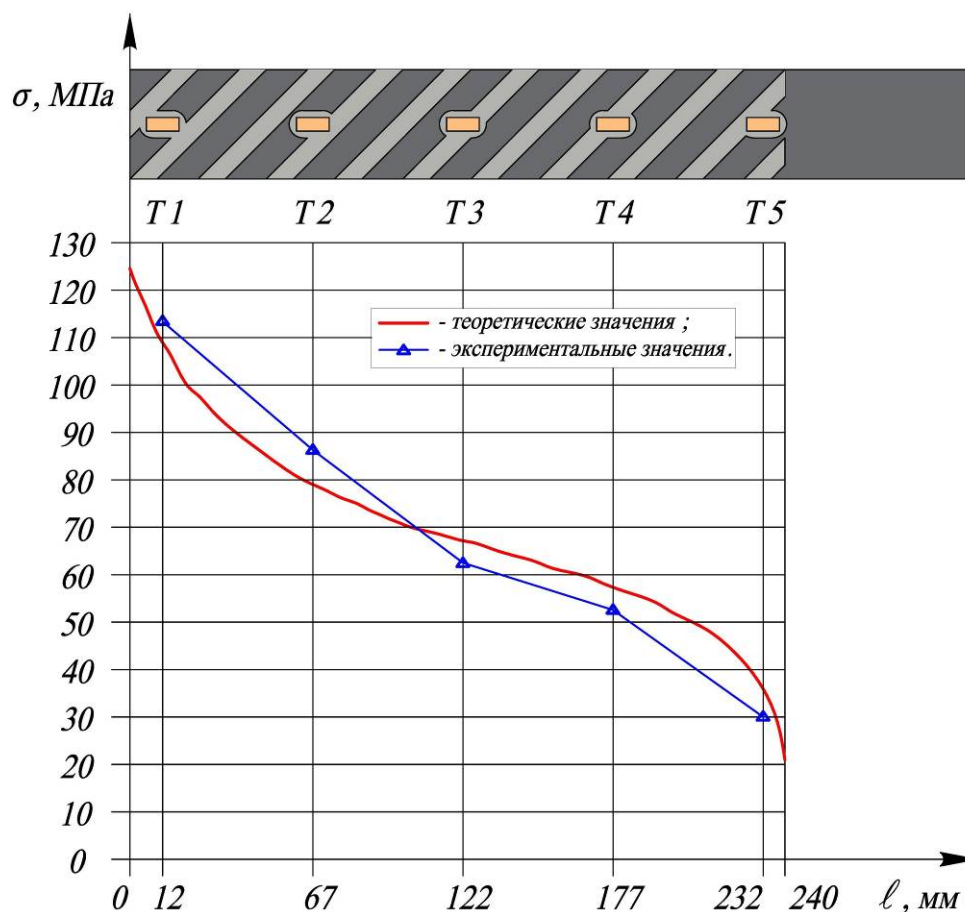


Рисунок 3.20 Сравнение нормальных напряжений в пластине

стержня к более пологому, свидетельствует о постепенной передаче всей нагрузки на брус. Постоянные значения напряжений, полученные численным методом, в ряде случаев очень точно совпадают с линией графика, полученного по экспериментальным точкам. Следовательно, полученные значения напряжений позволяют правильно отражать качественную картину напряженного состояния.

Из сравнения результатов замеров и расчетов деформаций видно, что величины численных и экспериментальных значений достаточно близки. Наибольшее расхождение наблюдается при вклеивании стальных пластин, сечением  $4 \times 40$  мм и достигает 20 % при сопоставлении с аналитическим методом. Дальнейшее увеличение диаметра и длина вклеенного стержня снижает разницу значений до 8 % при сравнении по обоим вариантам.

Проведенное выше сравнение результатов эксперимента и расчетов в ПК ANSYS показало, что оба метода расчета достаточно точно отражают ра-

боту соединений под нагрузкой. При этом максимальные значения напряжений и характер их распределения, определенные обоими методами, хорошо коррелируются с результатами аналитического расчета. Отклонения в результатах составляет не более 8%.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что расчет соединения элементов деревянных конструкций на клеенных пластинах из стали можно производить методом конечных элементов, в частности в программных комплексах APMCivilEngineering и ANSYS с учетом анизотропии древесины.

### 3.5 Выводы по третьей главе

1. Разработанный алгоритм минимизации количества параметров исследования с учетом факторного анализа и ступенчатого регрессивного метода позволил провести объективный анализ влияния длины клежки, ширины и толщины пластины, способов обработки ее поверхностей, толщины клеевой прослойки на напряженно-деформированное состояние соединения, определить область экспериментальных исследований с наиболее эффективными соединениями, обладающими наибольшей несущей способностью и малой деформативностью.

2. Наиболее сильное влияние на напряженно-деформированное состояние клеевого соединения оказывает длина клежки пластины. Увеличение ее величины приводит к росту несущей способности соединения. Однако при увеличении длины клежки более  $8b_{пл}$  прирост прочности соединения резко замедляется и не превышает 10% от максимального значения, достигаемого при длине клежки  $8b_{пл}$ . С учетом обеспечения качества клежки пластины в массив древесины и надежности соединения длина клежки  $l_{вк}$  должна находиться в интервале  $2b_{пл} \leq l_{вк} \leq 8b_{пл}$ .

3. Выявлен неравномерный характер распределения нормальных напряжений в клеенных пластинах и касательных напряжений в древесине по линии контакта с клеевой композицией. Степень неравномерности увеличивается с увеличением длины клежки. Данный факт необходимо учитывать в прак-

тических расчетах предлагаемого типа соединений, что предложено делать с применением аппроксимационной формулы:  $k_l = 1,125 + 0,9l^2 - 1,36l$ , где  $l$  - длина вклеенной части пластины,  $k_l$  - коэффициент, вводимый к площади пластины при определении ее несущей способности и учитывающий степень неравномерного распределения напряжений.

4. Предложенный тип соединения элементов деревянных конструкций обладает малой деформативностью, в 4-6 раз меньшей, чем у традиционных нагельных соединений.

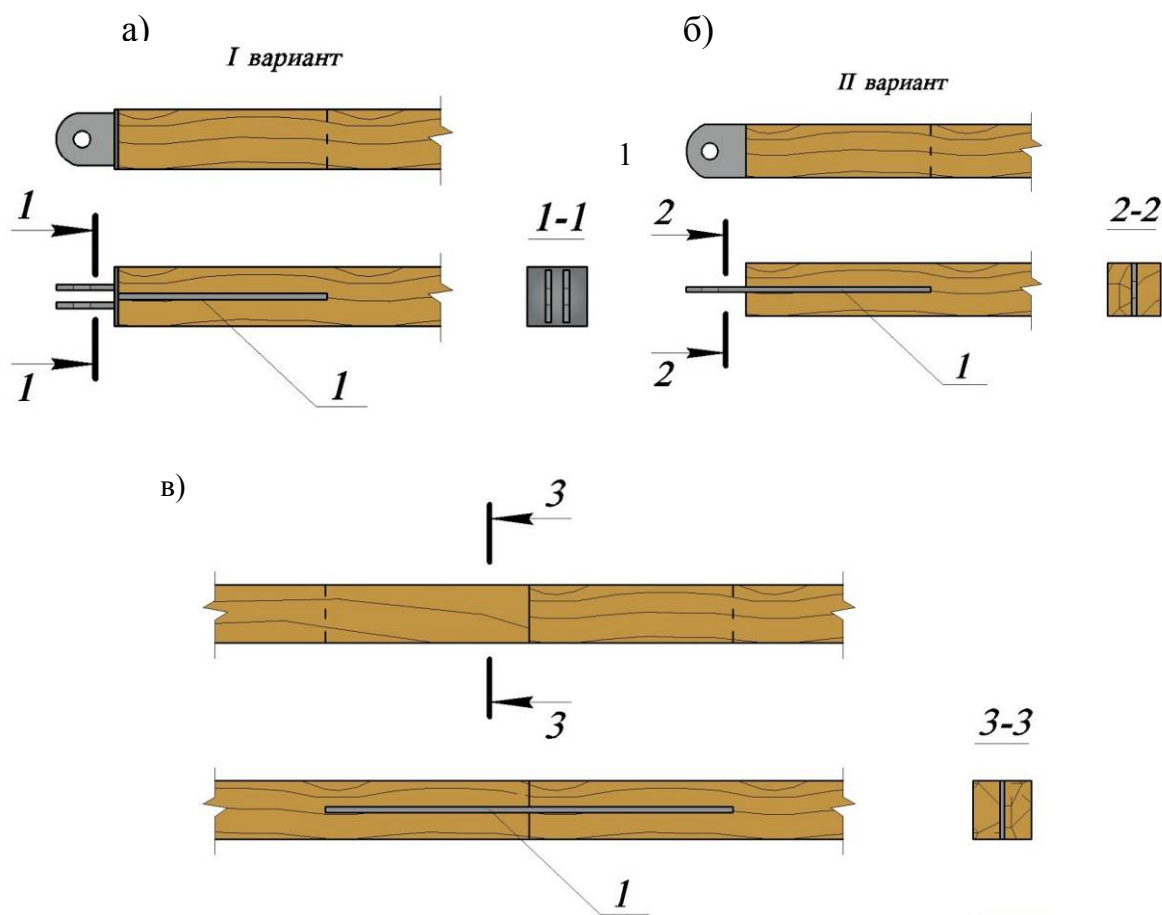
5. Экспериментальные исследования клеевого соединения стальных пластин с древесиной в целом подтвердили возможность использования аналитического и численного методов расчетов для оценки прочности и деформативности соединений (расхождение между теоретическими и экспериментальными данными не превышало 9% по всем сравниваемым величинам).

## **4 ЧИСЛЕННЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УЗЛОВ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ НА СТАЛЬНЫХ ВКЛЕЕННЫХ ПЛАСТИНАХ**

### **4.1 Конструктивные решения узлов деревянных конструкций на вклеенных стальных пластинах**

Конструктивные решения узлов соединения деревянных конструкций на стальных вклеенных пластинах разработаны исходя из основных принципов конструирования - обеспечение максимальной несущей способности и жесткости соединения при минимизации трудоемкости изготовления и монтажа соединений, основанных на современных технологиях и эффективном использовании свойств применяемых материалов. В то же время разработанные соединения обладают и достаточно высокой коррозионной стойкостью за счет того, что с трех внутренних сторон вокруг вклеенных пластин образуется клеевая обойма, надежно защищающая стержень от внешних воздействий, а видимое наружное ребро пластин доступно для периодической обработки антикоррозионными составами. Эта же конструктивная особенность соединения повышает и предел огнестойкости стыков / 205 /.

На рисунке 4.1 представлены варианты простейших растянутых стыков, разработанные на основе использования пластин, вклеенных в древесину. Показанные варианты разъемного однопластинчатого соединения (рисунок 4.1, а) могут быть применены в качестве растянутых элементов, как в плоских сквозных конструкциях (фермах, арках с затяжками, стропильных системах), так и в пространственных системах (структурах, шатровых покрытиях, блок-фермах), а также в сборно-разборных подсобных конструкциях (строительных лесах, спортивной оснастке и др.). Особенно эффективным представляется использование таких соединений с пластинами, вклеенных в заводских условиях, в сборно-разборном строительстве, в частности, при строительстве в труднодоступных районах, при ликвидации последствий чрезвычайных



1 - клеенные стальные пластины

Рисунок 4.1. Варианты разъемного (а, б) и неразъемного (в) однопластинчатых стыков

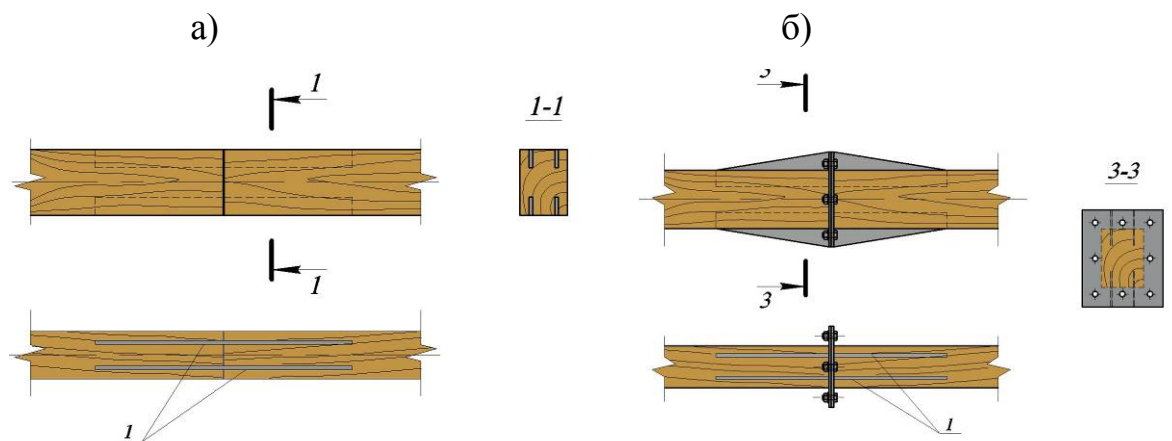
ситуаций, при возведении мобильных военных объектов. Наличие отверстий в свободной части пластин позволяет в качестве соединительного элемента применять удобные при монтаже резьбовые соединения.

Неразъемный однопластинчатый стык (рисунок 4.1, б) служит для удлинения растянутых и сжатых элементов деревянных конструкций как при монтаже новых, так и при восстановлении эксплуатируемых элементов. Следует отметить, что однополосные стыки при работе на растяжение-сжатие в зависимости от геометрических параметров пластины по расчётам могут обеспечивать несущую способность соединения в достаточно широком диапазоне от 6 до 60 кН.

Повысить несущую способность соединения предлагается увеличением количества пластин в соединении до 2, 4, 6 и 8 штук, располагая их симметрично по сечению бруса. Несущая способность такого стыка возрастает прак-



тически пропорционально количеству пластин, что позволяет применять его при соединении растянутых и сжатых элементов большепролетных конструкций. На рисунке 4.2 приведены неразъемный (рисунок 4.2, а) и разъемные стыки (рисунок 4.2, б) на примере соединения с 4-мя клееными пластинами. В известных решениях разъемных растянутых узлов, в основном, используют нагельное соединение, которое, являясь, в отличие от предлагаемого, податливым соединением, требует дополнительного значительного расхода древесины. Стык же системы ЦНИИСК, несмотря на свою универсальность, в основном изготавливается как неразъемное соединение при больших нагрузках. Применение разъемных стыков на стальных клеенных пластинах повысит практически до 100 % заводскую готовность элементов несущих деревянных конструкций, оставляя на стройплощадке только монтажные работы.



а - неразъемный стык; б - разъемный стык с фланцем;

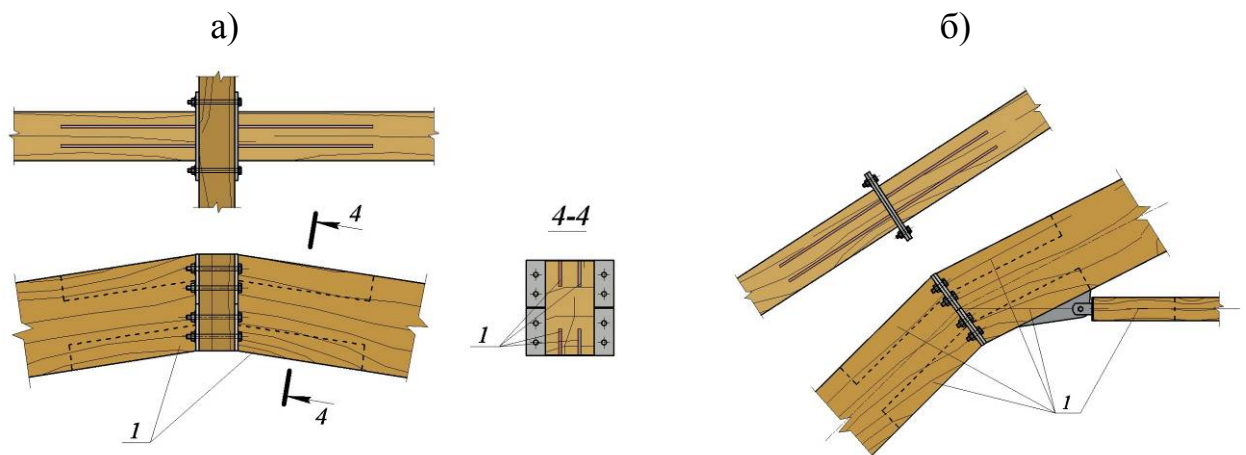
Рисунок 4.2 Конструкции сжато-растянутого стыка с пластинами, расположенными симметрично по сечению

Следует отметить, что, сжимающие напряжения в сечении между соединяемыми брусками воспринимаются только пластинами и для обеспечения включения в работу древесины при сжатии при необходимости предусматривается приторцовка брусьев в зоне стыка, обеспечивающая плотность сопряжения. Возможно также применение уплотняющих жидких материалов с прочностью на сжатие не менее прочности древесины (смола, мелкозернистый бетон, полимерные композиции и т.п.).

В разъемном стыке, показанном на рисунке 4.2, б, растягивающие и сжимающие усилия осуществляется через фланцы, приваренные к клееным пластинам. При этом растягивающее усилие передается через клеенные пластины и воспринимается болтами между фланцами, расчет которых следует вести по несущей способности при растяжении / 174 /. Сжимающие усилия воспринимаются фланцами и частично передаются, как на клеевое соединение, так и на торец бруса.

Всеми преимуществами соединений на клеенных пластинах обладают и узлы, разработанные для соединения характерных элементов деревянных конструкций. Заслуживает внимания вариант - аналог конструктивному решению шарнирных узлов деревянного сетчатого свода (рисунок 4.3, а), разработанных ИСИ СФУ г. Красноярск И.С. Инжутовым / 180 /. В оригинальном решении в узле в одном уровне сходятся 2 поперечных элемента и один продольный. Сопряжение элементов между собой осуществлено через 2Т-образные детали, выполненные из стальных пластин. Связь узловых элементов между собой осуществлена через нагельные соединения. В предлагаемом решении нагельные соединения заменены на стальные клеенные пластины, что с учетом большого количества узлов на 35% снижает расход металла на свод.

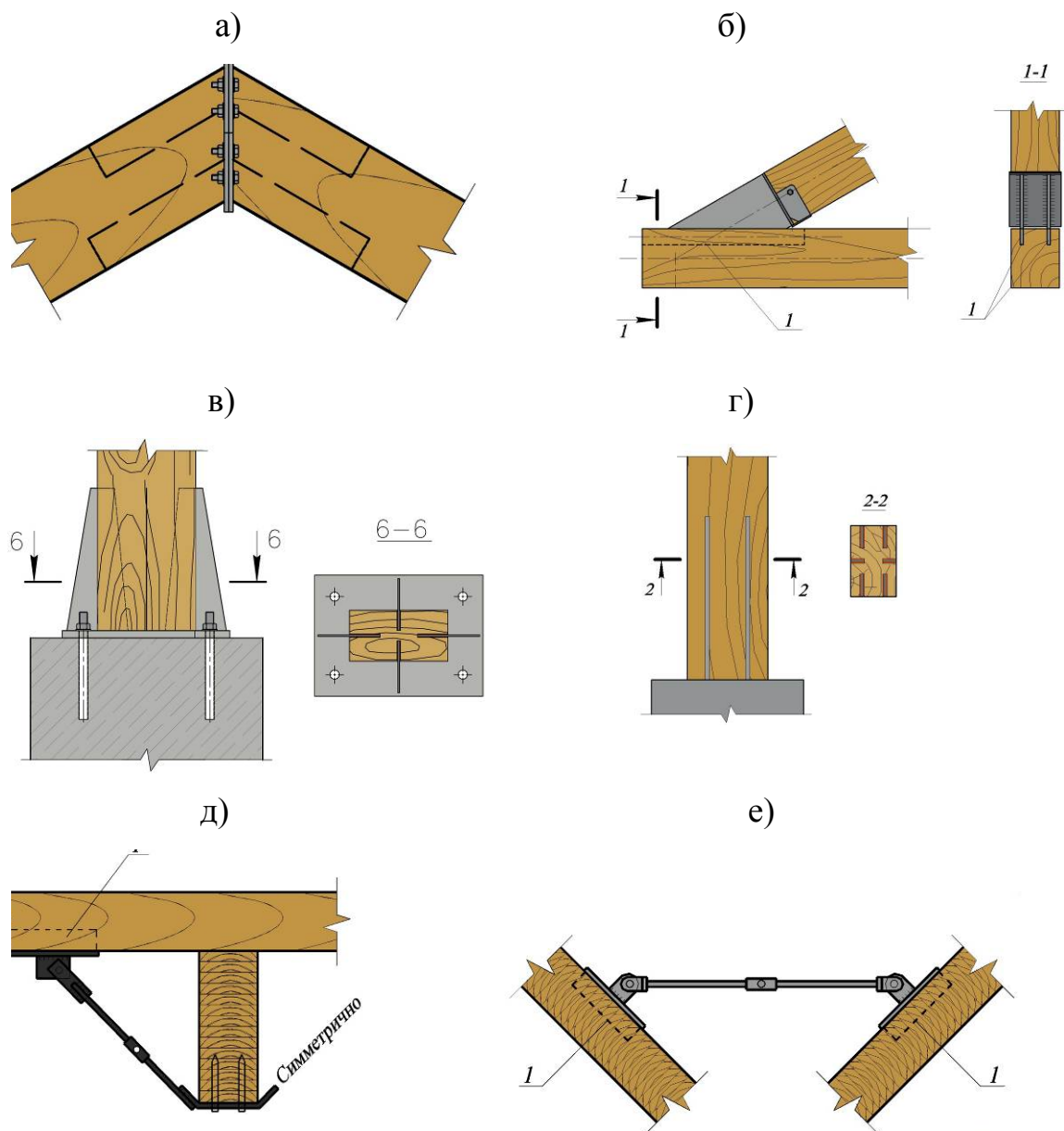
В компактном узле, показанном на рисунке 4.3б, одна из пластин, клеенных в пояс арки, воспринимает усилие, возникающее в затяжке.



а - шарнирный узел свода; б - узел сопряжения с затяжкой

Рисунок 4.3 Варианты узлов арок и сводов с применением клеенных стальных пластин

На рисунке 4.4 показаны наиболее характерные узлы конструкций на клеенных стальных пластинах, предложенные автором для элементов деревянного каркаса зданий. Основное преимущество сконструированных узловых соединений заключается в их малой податливости под действием эксплуатационных нагрузок, что обеспечивает проектное положение несущих конструкций и, как следствие, эксплуатационную надежность зданий и сооружений.



а) коньковый узел; б) опорный узел; в) разборный узел крепления колонны к фундаменту г) тоже неразборный; д) обеспечение устойчивости плоской формы балок стальными затяжками; е) соединение элементов деревянной складки в ендове

Рисунок 4.4 Варианты узлов деревянных конструкций с применением стальных клеенных пластин, работающих на выдергивание (вдавливание)

## **4.2 Результаты численных исследований особенностей напряженно-деформированного состояния предложенных типов узловых соединений**

Исследование напряженно-деформированного состояния однополосных соединений, приведенных на рисунке 4.1, численными и экспериментальными методами фактически проведено во 2-й и 3-й главе. Однако, судить об НДС многопластинчатого соединения по результатам этих исследований было бы не совсем корректно. В стыках с двумя и более вклеенными пластинами возникает несколько иное напряженно-деформированное состояние в связи с тем, что, во-первых, в брусках выбирается полуглухой паз, а во-вторых – не исключено, что компоненты НДС между вклеенными пластинами распределяются иначе, чем в однополосном соединении между полосой и краем бруса. Это касается, как «базового» стыка на 4-х вклеенных пластинах (рисунок 4.2, а), так и, например, опорного узла фермы (рисунок 4.4, б), у которого к тому же изменена схема приложения нагрузки в виде равномерно-распределенной на части длины, характерная и для других разработанных узлов. Из этих соображений был проведен модельный эксперимент в ПК ANSYS именно с этими двумя узлами.

Растянутый стык моделировался параметрически, по аналогии с экспериментальным образцом. В связи с принятым решением не моделировать пазы в пластинах, появилась возможность в качестве конечных элементов принять гексаэдр (прямоугольную призму), что несколько увеличивает точность вычислений. При этом в зоне контакта пластина-клеевая композиция-древесина производилось сгущение сетки. Торцевые и нижние продольные грани пластин с контактирующими поверхностями бруса в модели не «склеивались».

В расчет вводились физико-механические характеристики и упругие константы, аналогичные приведенным во второй главе.

Геометрические параметры узла принимались таким образом, чтобы иметь возможность сравнить полученные результаты с результатами числен-

но рассчитанного и экспериментально исследованного однополосного соединения. Исходя из этого, длина вклейки полосы с размерами 5x50 мм была принята в 300 мм. Размеры сечения бруса – 100x150 мм. Толщина клея – 2 мм. Геометрия созданной модели, разбитой на конечные элементы, показана на рисунке 4.5.

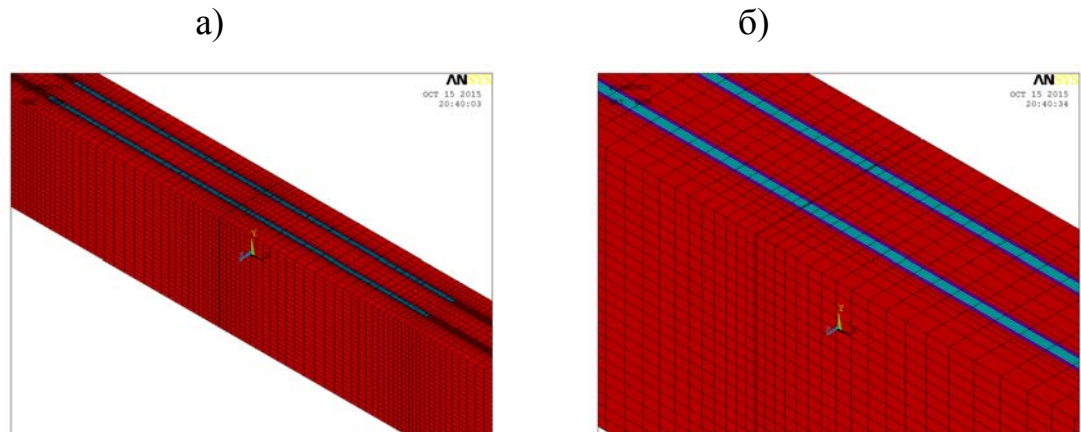
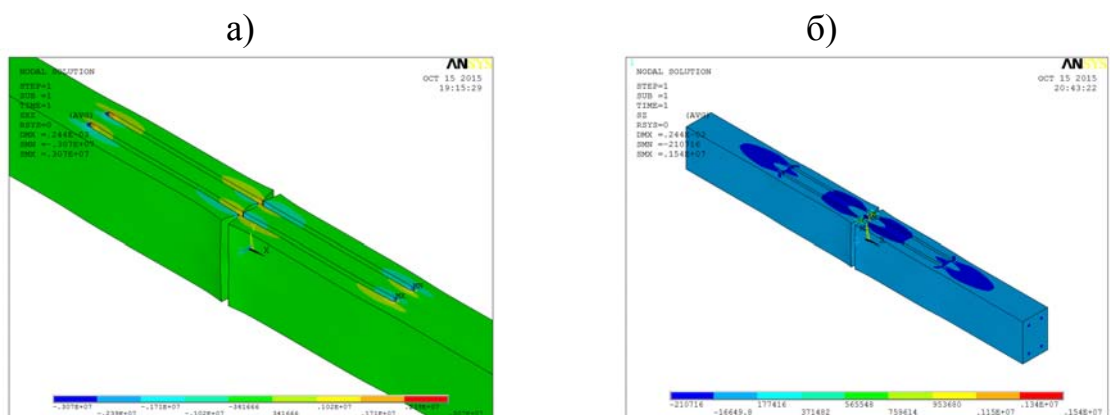


Рисунок 4.5 Геометрическая модель соединения в обычном (а) и увеличенном масштабе области клеевого соединения (б)

Растягивающая нагрузка, равная учетверенной расчетной нагрузке для однополосового соединения, определенной по формуле 5.3, прикладывалась как равномерно распределённая по поверхности к торцам бруса.

Результаты расчета в виде изокарт основных компонентов НДС приведены на рисунках 4.6-4.8.



а) касательных  $\tau_{xy}$  в древесине; б) нормальных  $\sigma_y$  в древесине

Рисунок 4.6 Карты напряжений

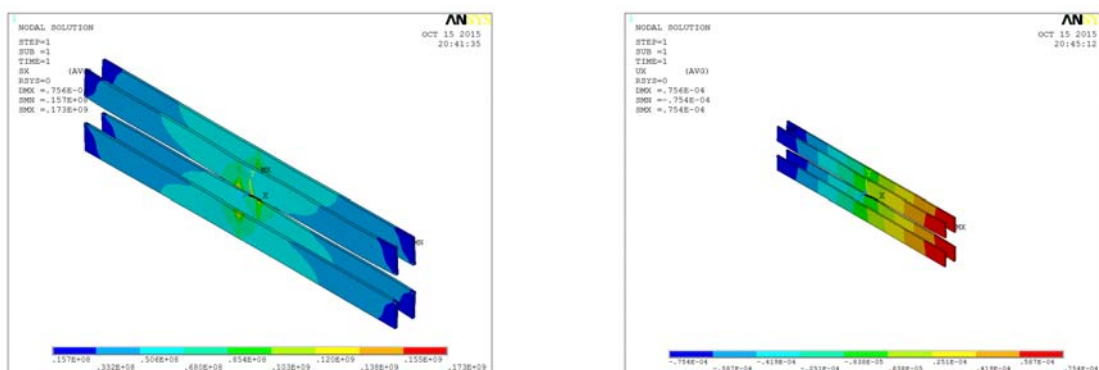


Рисунок 4.7 Карта напряжений  $\sigma_x$  (а) и перемещений  $u_x$  (б) в пластинах

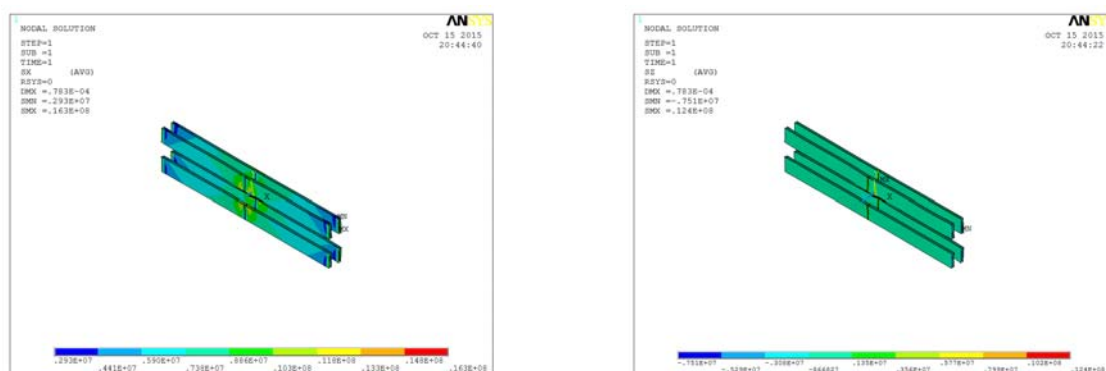


Рисунок 4.8 Карта напряжений  $\sigma_x$  (а) и  $\sigma_y$  (б) в клеевой композиции

Пошаговая методика создания модели растянутого стыка с 4-мя клееными полосами была применена и при создании твердотельной конечно-элементной модели опорного узла фермы с двумя клееными полосами. Особенностью работы стыка, отраженной в модели, стало приложение распределенной нагрузки к верхней грани клеенной пластины по линии контакта с пластиной верхнего пояса. Нагрузка прикладывалась вдоль верхнего пояса фермы под углом  $30^\circ$  к оси нижнего пояса. На рисунке 4.9 приведена расчетная схема, принятая в модели.

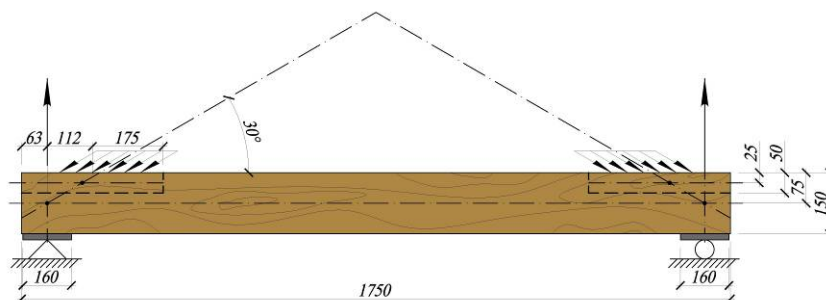


Рисунок 4.9 Расчетная схема, принятая в модели



На рисунке 4.10 – 4.13 показаны геометрическая модель с конечно-элементной сеткой и результаты ее расчета.

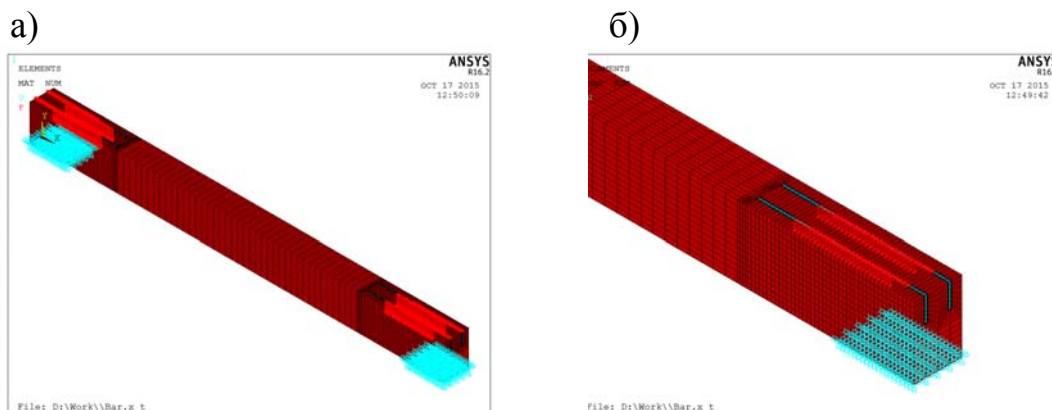
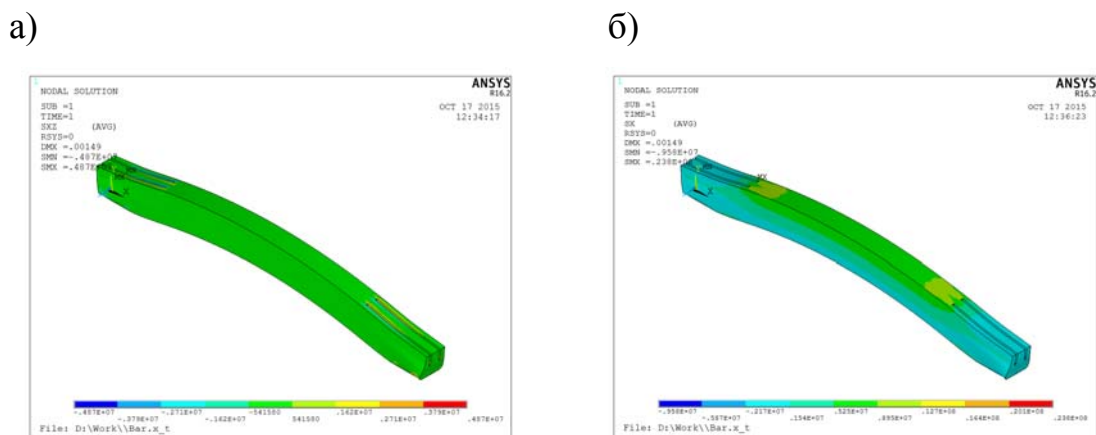
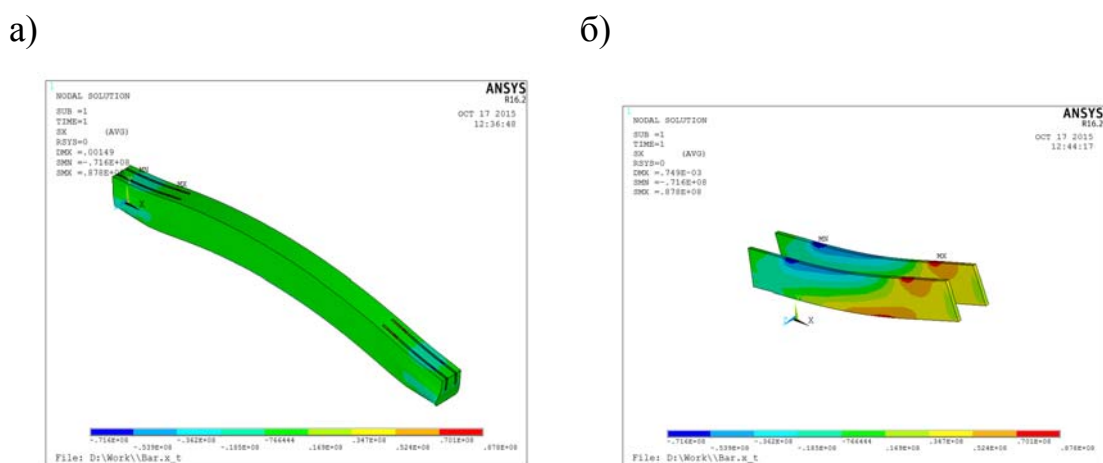


Рисунок 4.10 Геометрическая модель соединения в обычном (а) и увеличенном масштабе области опорного узла (б)



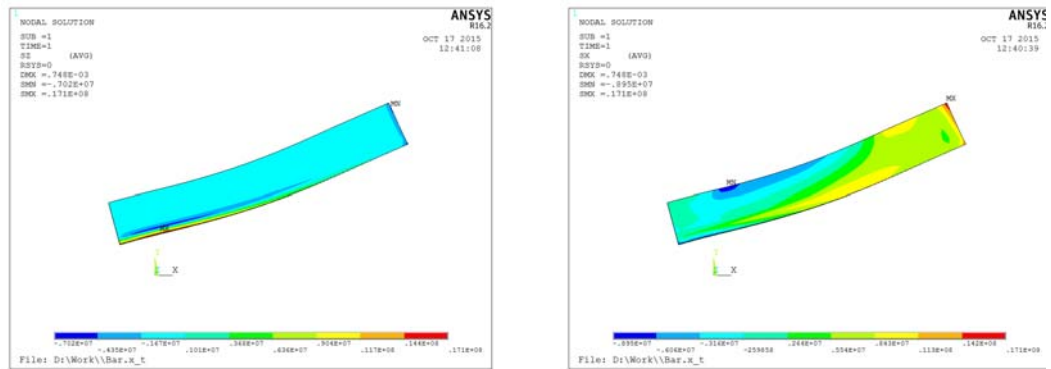
а - касательных  $\tau_{xy}$  в древесине; б - нормальных  $\sigma_y$  в древесине

Рисунок 4.11 Карты напряжений



а - нормальных  $\sigma_x$  в древесине; б - нормальных  $\sigma_x$  в пластинах

Рисунок 4.12 Карты напряжений



а - касательных  $\tau_{xy}$ ; б - нормальных  $\sigma_x$

Рисунок 4.13 Карты напряжений в клеевой композиции

### 4.3 Экспериментальная оценка работы узловых соединений на вклеенных пластинах

#### 4.3.1 Методика экспериментальных исследований натуральных узлов

Для проверки адекватности численных исследований были проведены натурные испытания растянутых стыков на четырех вклеенных пластинах и опорных узлов фермы с двумя вклеенными пластинами. Целью экспериментальных исследований узловых соединений на стальных вклеенных пластинах стало определение их фактической прочности и жесткости при действии кратковременных нагрузок.

Испытания растянутого стыка проводились на деревянных образцах постоянного поперечного сечения 0,12x0,12 м. Образцы изготавливались из одной партии древесины, что и образцы для испытаний при вклеивании одного стержня, физико-механические характеристики которых приведены в главе 3.

Образцы состояли из двух симметричных частей, в предварительно выбранные полуглухие пазы которых симметрично относительно горизонтальной плоскости симметрии сечения вклеивались 4 стальных пластины. Пазы выбирались дисковой фрезой толщиной 10 мм с доработкой пазов стамеской, с последующей соскабливанием отщепов и продувкой пазов. В качестве пластин для всех образцов использовался полосовой прокат 5x50 мм по ГОСТ



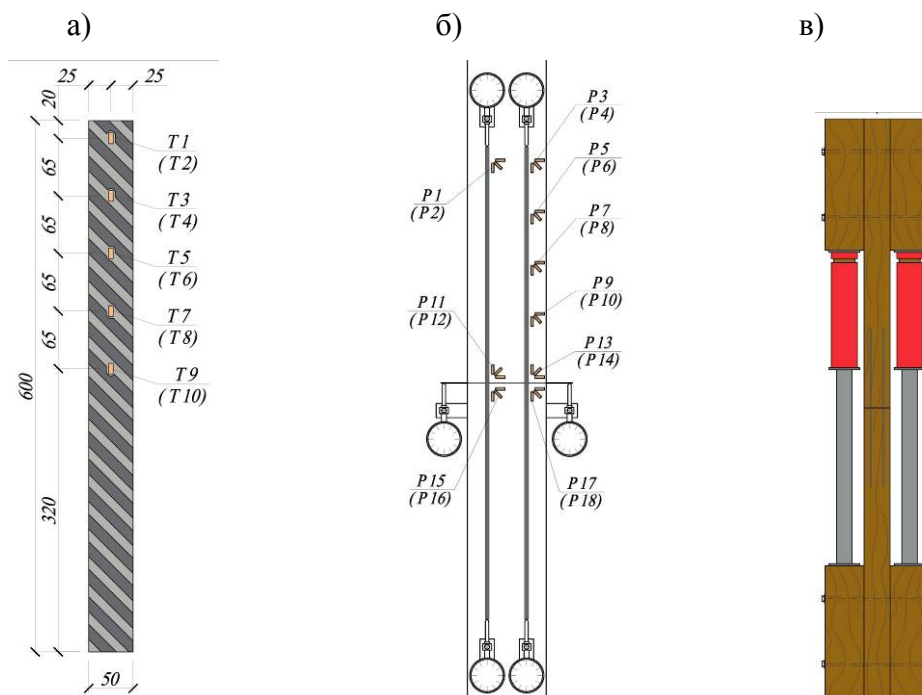
103-2006 из стали СтЗпс. Длина клейки принималась равной  $6b$  (300 мм) и была выбрана из расчета удобства сравнения с имеющимися данными для однополосного соединения и конструирования данного вида соединения. Размер паза с учетом результатов предшествующих исследований принимался в 2,5 мм. Расстояния между осями пластин составили 50 мм, от края бруса - 25 мм.

С обеих сторон предварительно выровненных пластин концевой фрезой выбирались пазы сечением 10x0,75 мм и расстоянием между осями в 22 мм (рисунок 4.14а) в соответствии с выявленными во 2-й главе зависимостями. На гребни пластин в пяти сечениях наклеивались пленочные тензодатчики ПКС-12-200 с константановыми проводниками. Тензодатчики наклеивались на зачищенную обезжиренную поверхность пластины, согласно «Инструкции по наклейке тензорезисторов» 2ПБК № 1УО.255.001 Д1, М.1978 г. В дальнейшем, после клейки пластин в брус, тензодатчики подключались по одиночной схеме к тензосистеме ММТС 64.01. Тензодатчики и тензосистема изготовлены и неоднократно комплексно апробированы в Сибирском институте авиации им. Чаплыгина на конструкциях из различных материалов. В соответствии с рекомендациями предприятия-изготовителя датчики клеились на клей «Циакрин ЭО» по ТУ 6-09-30-86 после предварительной обработки поверхности.

Подготовка и вклеивание пластин производились в той же последовательности, что и при изготовлении однополосных образцов (см. главу 3) без необходимости закреплять опалубочную пластинку с глухой стороны паза. Для этого симметричные части образцов устанавливались торцами встык, в совмещенные пазы вставлялась пластина, которая расклинивалась в пазах калиброванными вставками. Клеевой компаунд нагнетался в пространство пазов шприцом с наконечником, имеющим отверстие диаметром 2 мм, исключаящим разлив клея и непрочлей.

Для исследования плоского напряженного состояния на поверхность бруса в непосредственной близости от контактной линии «клей-древесина» наклеивались тензодатчики, из которых формировались прямоугольные тензорозетки по аналогии с предыдущими экспериментами. Значения напряжений

в исследуемых точках определялись как среднее арифметическое из показаний двух симметрично наклеенных датчиков или тензорозеток.



а) подготовленная пластина с приклеенными тензодатчиками; б) схема расстановки измерительных приборов; в) схема

Рисунок 4.14 Схема испытательной установки и расстановки средств измерений

Для определения деформаций соединения (ширины раскрытия стыка) использовались индикаторы часового типа ИЧ-10, ИЧ-5 с ценой деления 0,01 мм, установленные с противоположенных сторон бруса для исключения погрешности измерений (рисунок 4.14 б). Ножки индикаторов упирались в пластину, закрепленную к ответной части соединения. Деформации каждой из полос также определялись с помощью индикаторов часового типа, закрепленных на грани бруса, ножки которых упирались в предварительно приклеенный к полосе упор.

Эксперименты проводились на специально подготовленной испытательной установке, состоящей из непосредственно образца со стыком на клеенных пластинах, к боковым граням которого на расстоянии 600 мм от стыка приклеивались упоры из бруса размером 150x150x500 мм на эпоксидный клей ЭПЦ-1 без наполнителя. Общая площадь склеивания обеспечивала возможность воспринимать сдвиговое усилие в 18 кН, что почти в два раза превышает

ло несущую способность исследуемого соединения. Кроме этого упоры и части образца после нанесения клея скреплялись 2-мя стальными нагелями диаметром 16 мм. Между упорами в распор вставлялись 2 домкрата, параллельно подключённые к насосной станции, позволяющей развивать усилие в 500 кН. Усилие от домкратов через упоры передавалась на испытуемый стык в виде растягивающей нагрузки. Контроль нагрузки осуществлялся по прецизионному манометру МЦП-2-0,3 с помощью корреляционной таблицы, входящими наряду с домкратами и насосной станции в комплект оборудования «Энерпред».

Программа проведения испытаний предусматривала два этапа: на первом - изучение упругой работы соединения в пределах расчетной нагрузки; на втором - доведение образцов до разрушения.

Перед началом испытаний проводилось обжатие опытных стыков под пробной нагрузкой, равной  $1/5$  от расчетной, с целью притирки и обмятия креплений, опробования измерительной аппаратуры, после чего нагрузка снималась. Экспериментальные исследования проводились согласно «Рекомендаций по испытанию соединений деревянных конструкций» / 87 /, по схеме «промежуточного скалывания» (выдергивании при растяжении). На первом этапе испытаний – в упругой стадии, нагружение стыков осуществлялось с постоянной скоростью 2кН/мин ступенями, равными  $1/5$  расчетной нагрузки. Время загрузки каждой ступенью четко контролировалось по секундомеру. Отсчеты по приборам снимались на каждой ступени загрузки: от тензорезисторов – автоматически, с индикаторов – записью в журнал. Затраты времени для снятия отсчетов составляли не более 20 секунд минут. После достижения расчетной нагрузки у ряда образцов с интервалом в 20 минут производилось разгрузка ступенями в обратном порядке, с целью контроля правильности снятия показаний по индикаторам и тензористорам. На втором этапе испытаний образцы доводились до разрушения. Отсчеты с приборов снимались до момента разрушения с применением необходимых мер безопасности. Появление трещин, потрескивания отмечалось в журнале наблюдений.

Изготовление соединения и испытания опорного стыка ферм проводился по аналогичной методике. На рисунке 4.15 приведена схема испытательной установки, включающая два опорных узла.

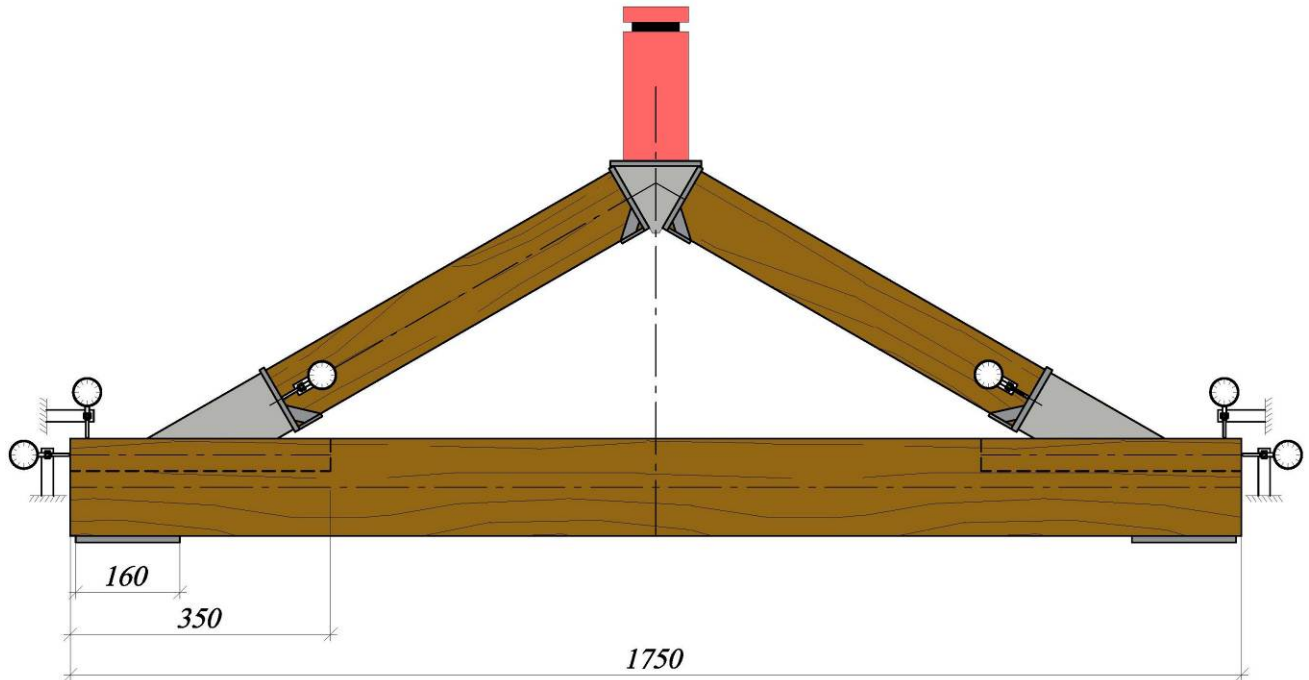


Рисунок 4.15 Схема испытательной установки для проведения экспериментальных исследований опорных узлов ферм с применением клеенных пластин

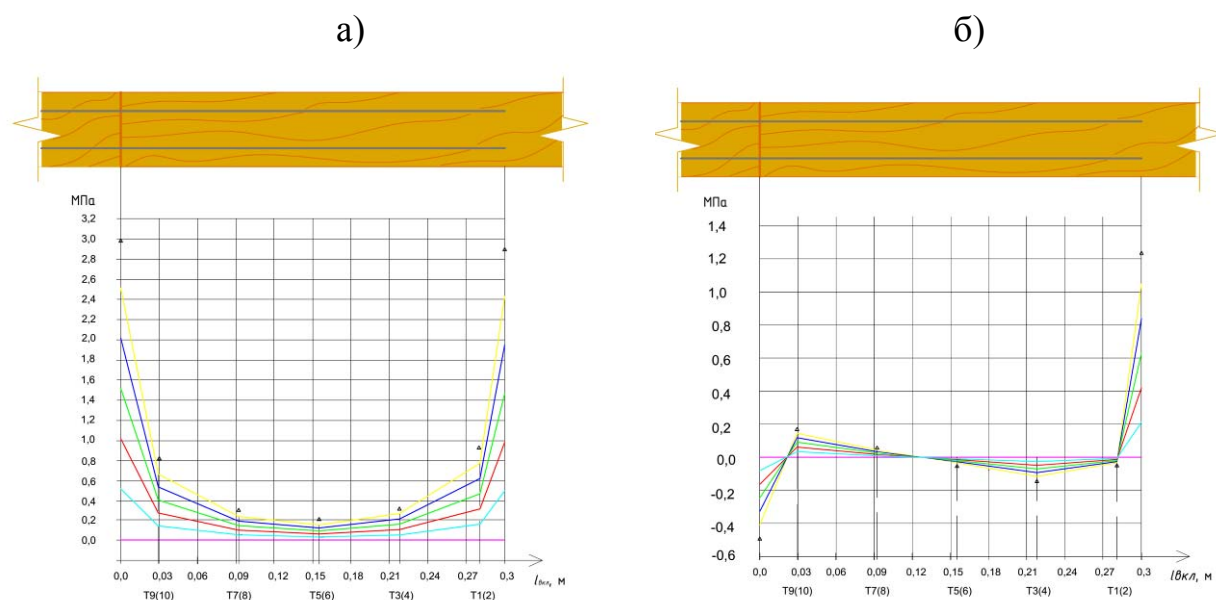
В процессе испытаний измерялась деформация клеенных пластин вдоль оси нижнего пояса, а также контролировались деформации пластин в вертикальной плоскости и бруса верхнего пояса.

Во время испытаний постоянно велся контроль температуры и относительной влажности воздуха в лаборатории. Так как лаборатория находилась в подвальном помещении со стабильными температурными и влажностными характеристиками, колебания составили: температуры в пределах 18-20 °С, влажности – 50-60 %. Учитывая незначительность их колебаний и соответственно влияние на прочностные и упругие характеристики древесины, можно сделать вывод, что результаты испытаний сравнимы между собой без введения дополнительных коэффициентов.

### 4.3.2 Результаты кратковременных испытаний растянутого стыка

В ходе испытания зафиксировано наличие неравномерности деформирования вклеенных пластин в начальный момент испытаний, несмотря на то, что эти образцы изготавливались: со строгим контролем геометрических параметров, состава клея, качества древесины. Наличие неравномерности деформирования вклеенных пластин наблюдалось в 70 % от количества изготовленных стыков, т.е. следует отметить, что были соединения, деформации концов стержней которых были равномерными, расхождения перемещений в этих случаях было в пределах 2-4 %. При последующем нагружении показания индикаторов выравнивались.

По результатам обработки данных экспериментов получены значения деформации соединения при различных значениях нагрузки, а также графики распределения касательных и нормальных к продольной оси образца напряжений в древесине в непосредственной близости (0,002 м) от контактной поверхности с клеем по длине вклеенной части пластин и нормальных к сечению пластин напряжений в пластине. Графики показаны на рисунках 4.16, 4.17



а) касательных; б) нормальных к продольной оси пластины

Рисунок 4.16 Распределение напряжений в древесине по длине вклеенной части пластин по линии «клей-древесина»

На графиках различными цветами обозначены значения напряжений на различных ступенях нагружения соединения, а точками соответствующие значения, полученные численным методом.

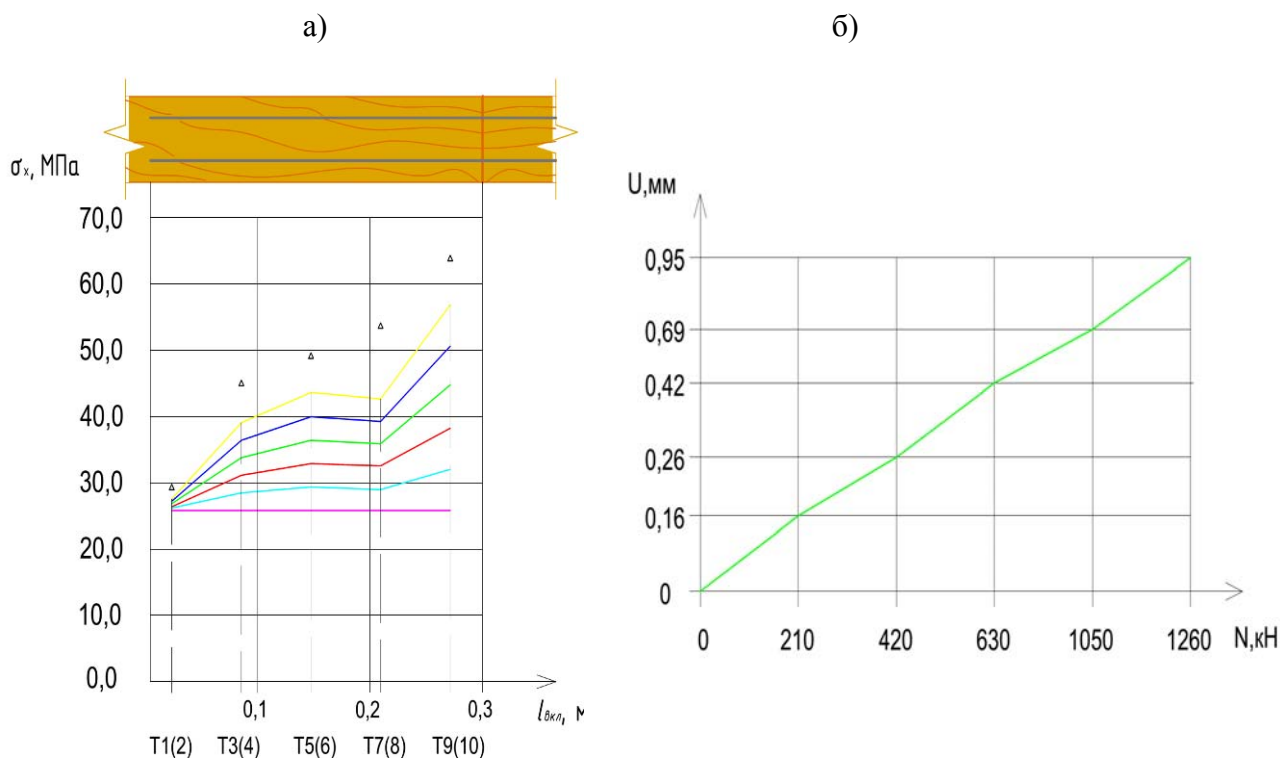


Рисунок 4.17 Распределение нормальных напряжений во вклеенной части пластин (а) и деформация пластины.

В ходе испытаний была определена разрушающая нагрузка, деформация и касательные напряжения в брус по линии контакта «клей-древесина». Разрушение соединений происходило хрупко в результате скалывания по граничному слою клей- древесина. После скалывания на поверхности пластин имелись клеевой слой с остатками древесины. Разрушению от скалывания предшествовало наличие потрескивания. На последующем этапе происходил резкий выкол деревянного бруса по поверхности контакта с клеем. Толщина выколовшегося слоя древесины колебалась от 0,001 до 0,004 м.

### 4.3.3 Результаты длительных испытаний растянутого стыка

Длительным испытаниям был подвергнут неразъемный растянутый узел, конструкция которого приведена на рисунке 4.18. В одном узле были совмещены испытания фактически четырех пластин, что позволило говорить об объективности полученных результатов. Испытания начаты 01 июня 2015 года. Опытный узел был загружен расчетной нагрузкой  $N=37,4$  кН и выдержан 90 суток до 29 августа 2015 года.

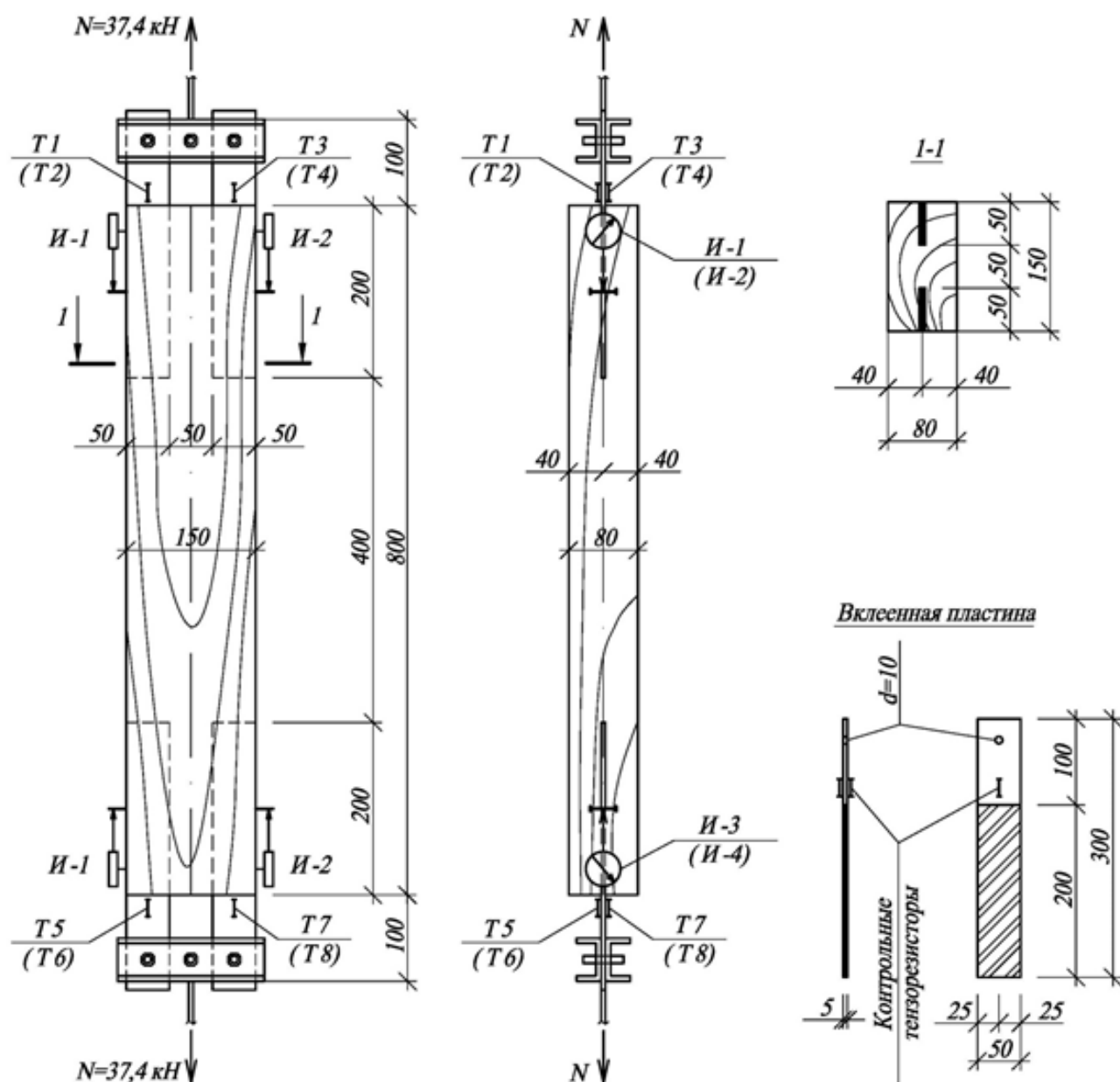


Рисунок 4.18 – Конструкция опытного образца для проведения длительных испытаний

В продолжении всего эксперимента в лаборатории, где проводились длительные испытания, постоянно (не реже 1 раза в день) проводили запись температуры и влажности воздуха по термометру и психрометру. На рисунке 4.19 показаны графики, характеризующие температурно-влажностный режим лаборатории в период эксперимента.

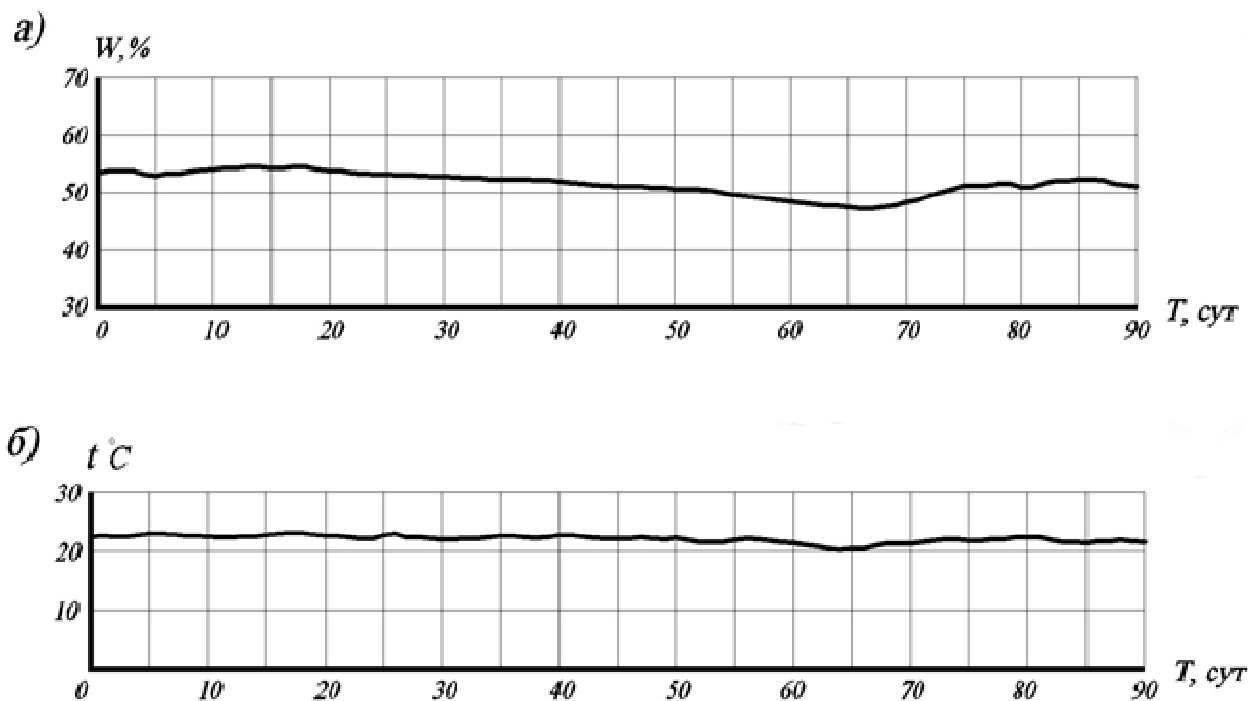


Рисунок 4.19 – Изменение относительной влажности (а) и температуры (б) в помещении лаборатории в период проведения испытания

В целях выравнивания влажности деревянный брус, предназначенный для изготовления опытного образца, в течение полугода выдерживались в помещении лаборатории практически при указанном выше температурно-влажностном режиме.

Длительные испытания проводили на рычажной установке (рисунок 4.20). Заданное соотношение плеч рычагов 1:11 выдерживалось посредством использования центрирующих призм. Плавное постепенное загрузку образцов обеспечивалось использованием мелких грузов весом не более 0,2 % от прикладываемой нагрузки. Расчетная нагрузка определена в соответствии с положениями методики расчета, приведенной в главе 5. Величину испытательной





Рисунок 4.20 – Общий вид стенда с рычажной установкой для проведения длительных испытаний



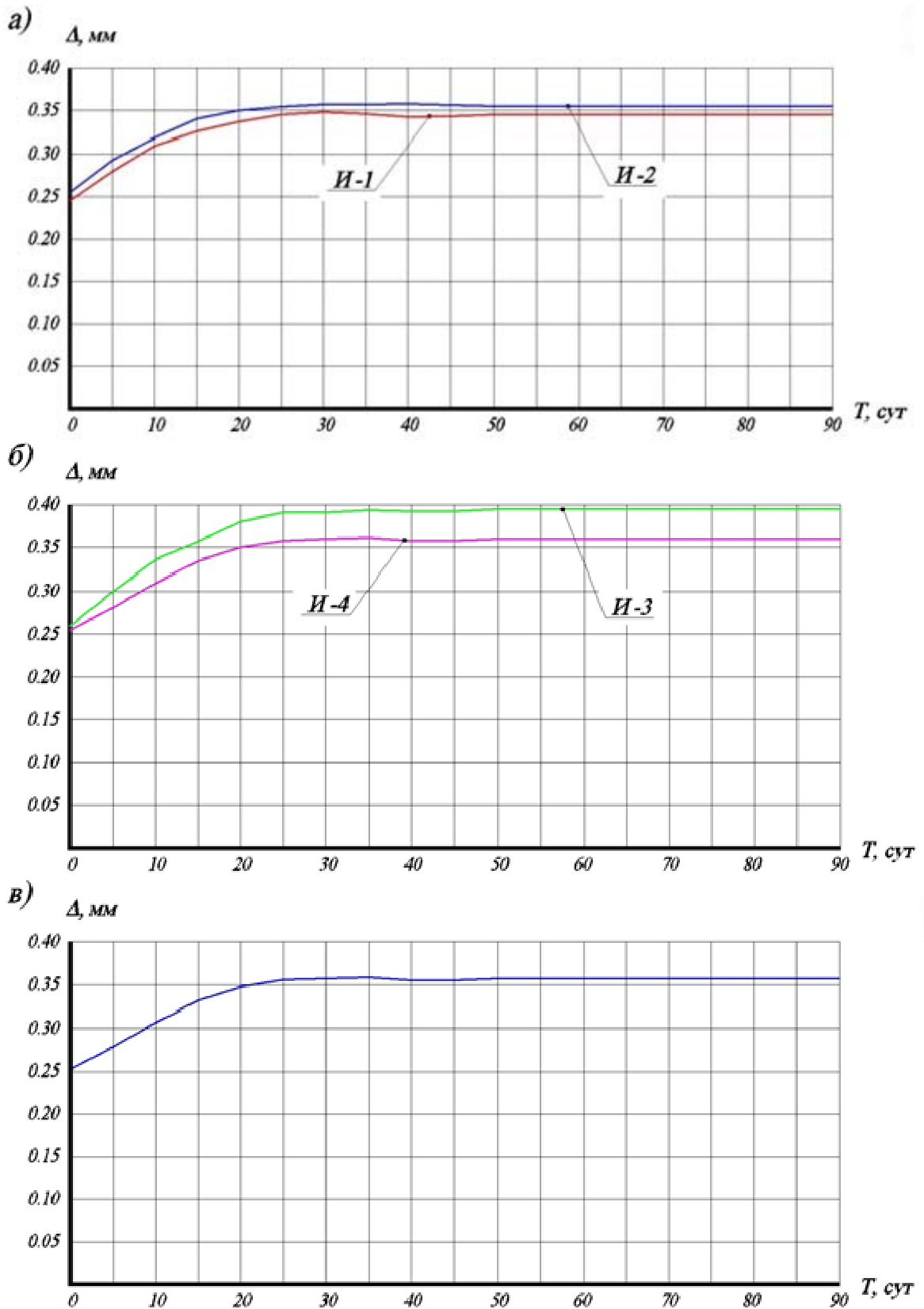
Рисунок 4.21 – Измерение деформаций клеенных пластин относительно массива древесины при помощи индикаторов ИЧ-10

нагрузки при загрузке платформы контролировали динамометром растяжения, который был установлен по оси приложения нагрузки. В ходе испытания вели замер деформаций пластин относительно массива древесины при помощи индикаторов ИЧ-10 с ценой деления шкалы 0,01 мм (рисунок 5.2).

Наблюдения за опытным образцом показало, что наиболее интенсивное нарастание деформаций пластины относительно массива древесины во времени (рисунок 4.22) наблюдалось первые 20...25 суток. В последующие 65 суток значения деформаций практически не увеличивались у всех четырех пластин. По окончании испытаний максимальные значения измеряемых деформаций составили 0,34 мм, 0,36 мм, 0,36 мм и 0,39 мм для каждой из четырех клеенных пластин соответственно. Среднее значение деформации сдвига пластин относительно древесины было равно 0,36 мм (рисунок 4.22 в), таким образом, деформации возросли по сравнению с кратковременными в 1,44 раза.

Характер изменения деформаций, полученных в ходе эксперимента (рисунок 4.22), позволяет сделать вывод о том, что ползучесть экспериментальных соединений имела установившийся характер в период первых 25 суток испытаний, а в последующее время – ограниченный. Деформативность соединения подчиняется обычным временным закономерностям изменения прочности древесины при длительном действии нагрузок, которые могут быть записаны затухающей экспонентной зависимостью.

В целом характеристики деформативности соединения не превысили предельно допустимых значений и хорошо сопоставимы с проведенными работами в области сопряжений элементов деревянных конструкций на клеенных арматурных стержнях круглого поперечного сечения и клеенных металлических шайбах, которые можно рассматривать как аналог предлагаемому типу узлов на клеенных пластинах / 11, 13, 20, 78, 112, 117 /. За время наблюдений каких-либо признаков разрушений соединений по древесине, по металлу или по клеевой прослойке не обнаружено. Данные факты подтверждают надежность разработанного типа соединения при воздействии длительно действующих нагрузок.



а - по показаниям индикаторов И-1 и И-2; б - то же, индикаторов И-3 и И-4;  
в - усредненные значения деформаций

Рисунок 4.22 – Графики нарастания деформаций пластины относительно массива древесины с течением времени

#### 4.3.4 Результаты испытаний опорного узла

Характер разрушения опорного узла и вид клеевого соединения стальных пластин с древесиной после разрушения совпадает с характером и видом разрушения растянутого стыка, приведенного в разделе 4.3.2. На рисунке 4.23 приведены экспериментально полученные значения деформации пластины в процессе нагружения.

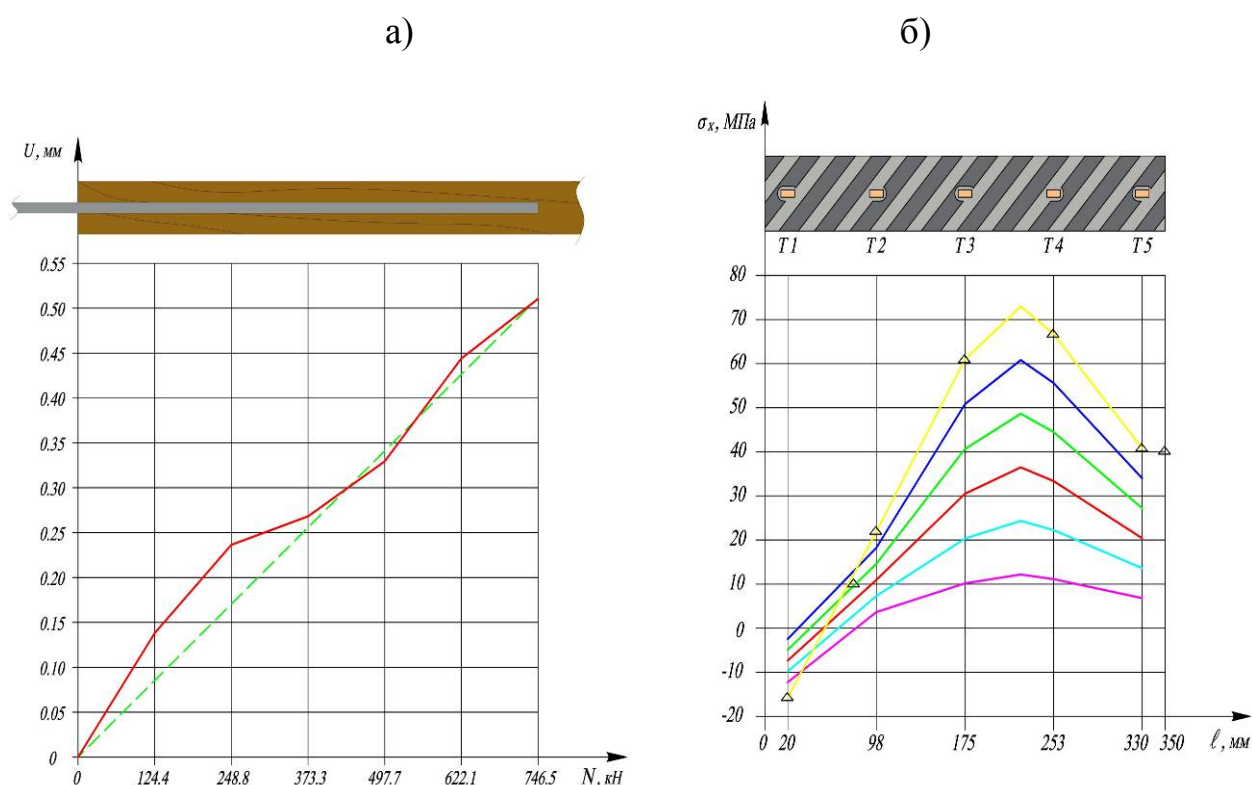


Рисунок 4.23 Деформация в пластине (а) и распределение нормальных напряжений по длине клеенной части

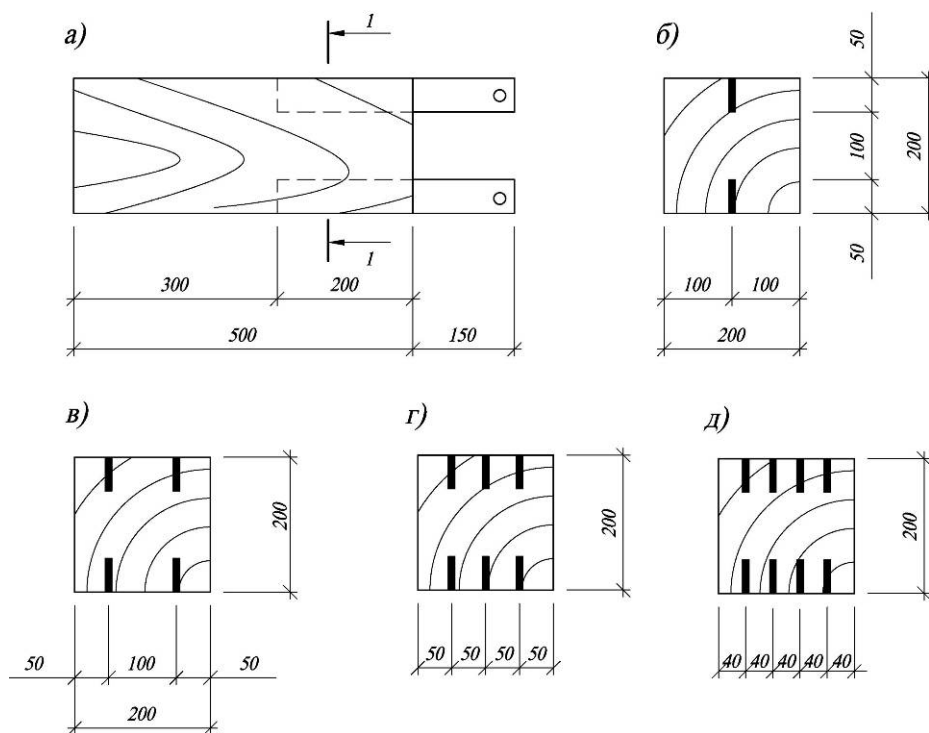
Следует отметить снижение уровня деформаций в пластине в направлении действия составляющей силы, выдергивающей пластину по сравнению с растянутым стыком при сохранении уровня нормальных напряжений из-за незначительных изгибных деформаций в вертикальной плоскости, возникающих в пластине в связи с изменением характера приложения нагрузки.

#### **4.4 Экспериментальная оценка особенностей работы соединений при передаче нагрузки на группу пластин**

Проведенные опытно-конструкторские разработки показали, что при разработке узловых сопряжений реальных деревянных конструкций проектировщик, как правило, сталкивается с необходимостью использовать группу стальных пластин, работающих параллельно при восприятии расчетных усилий. Несущая способность и деформативность таких узлов зависит, в первую очередь, от степени равномерности передачи нагрузки на все пластины, которая может быть нарушена из-за поворота расчетных сечений, неточности монтажа, разнородность массива древесины из-за наличия пороков роста и т.п. Практическое применение исследуемых соединений невозможно без тщательного изучения данного вопроса. В связи необходимо было определить степень влияния неравномерной загрузки на несущую способность и деформативность группы пластин, число которых в проектируемых узлах может быть от 2 до 8.

Опытные деревянные образцы изготавливали из древесины сосны с влажностью  $9,0 \pm 1\%$  из той же партии, которая была использована для изготовления экспериментальных образцов для исследования клеевого соединения стальных пластин с древесиной (глава 3). При разработке методики испытаний, выборе схемы загрузки и назначении размеров образцов была поставлена цель добиться максимального приближения их работы к работе узлов в составе реальных конструкций. Кроме этого, размеры образцов были назначены из условия минимальных расстояний между стержнями, установленными ранее при проведении численных и экспериментальных исследований.

Всего было испытано 48 образцов, в которые клеивали пластины поперечным сечением 5x50 мм на длину 200 мм. Для каждой серии (по 2, 4, 6, и 8 пластин) изготавливали по 12 образцов. Схема опытных образцов с расстановкой пластин приведена на рисунке 4.24. Вариант образца для испытания с четырьмя пластинами показан на рисунке 4.25. В целях упрощения проведения испытаний размеры деревянных брусков, независимо от количества пластин,



а - общий вид образца; б, в, г, д – поперечные разрезы образцов на двух, четырех, шести и восьми пластинах соответственно

Рисунок 4.24 – Схема расстановки пластин в опытных образцах для определения фактической несущей способности

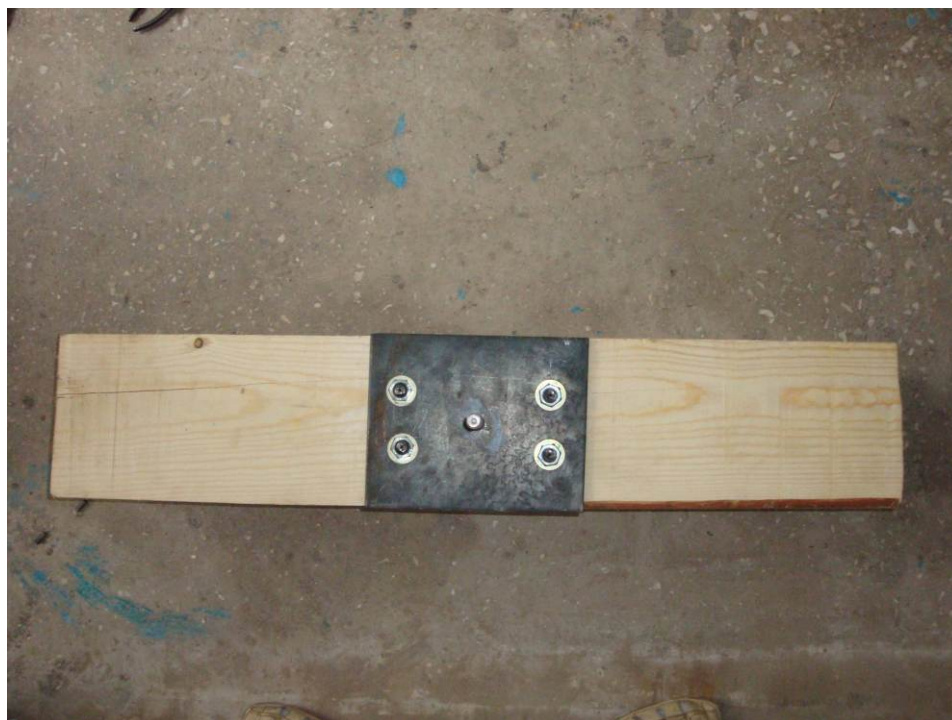


Рисунок 4.25 – Общий вид образца для испытания на четырех вклеенных пластинах



тин в соединении, были приняты постоянными и равными  $200 \times 200 \times 500$  мм, что позволило выполнить требования по расстановке пластин для всех схем размещения. При вклейке пластин в образцы строго следили за обеспечением плотности их сопряжения с соединительными болтами. Это требование также отражено в рекомендациях по изготовлению соединений (смотри главу 5).

Испытания проводили при помощи гидравлического пресса УММ-50 с сервогидроприводом с постоянной скоростью нагружения  $0,05$  мм/мин. В ходе испытания вели замер вертикальных перемещений вклеенных пластин относительно деревянного бруса с помощью индикаторов часового типа ИЧ-10 с ценой деления шкалы  $0,01$  мм. Принципиальная схема испытания показана на рисунке 4.26, а ее общий вид на рисунке 4.27. На приведенных ниже графиках приведены данные, полученные как средне арифметические величины по результатам десяти испытаний. Максимальный и минимальный результаты при испытании серии из 12 образцов при обработке данных не учитывались.

Испытания образцов с количеством пластин две, четыре, шесть и восемь (рисунок 4.28) показали, что несущая способность соединения меньше, чем алгебраическая сумма отдельно взятых пластин. При передаче сосредоточенной нагрузки на опытные образцы неравномерность загрузки пластин составляла  $5\%$  для образцов с четырьмя пластинами и  $18\%$  с количеством пластин 8. Для образцов с двумя параллельно работающими пластинами неравномерности передачи нагрузки не выявлено. Отмеченный факт необходимо учитывать при проектировании реальных сопряжений деревянных конструкций.

При проведении экспериментов установлено, что с увеличением количества пластин в соединении степень неравномерности распределения между отдельными пластинами увеличивается, что приводит к снижению несущей способности соединения в целом (рисунок 4.29).

Для уменьшения неравномерности загрузки отдельных пластин необходимо строго контролировать плотность контакта между вклеенными пластинами и соединительными элементами узла в виде болтов, шпилек, фланцев и т.п. Также из соображений неравномерности распределения усилий между отдель-

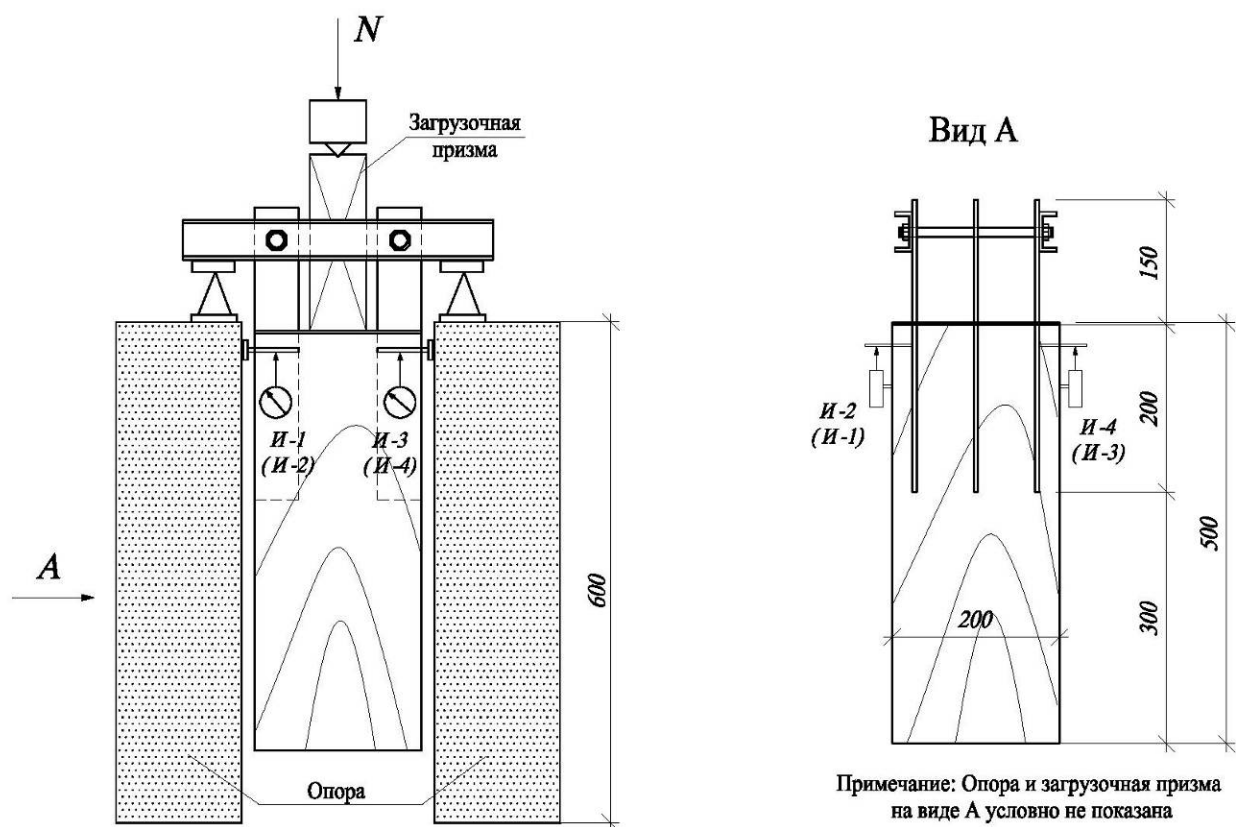
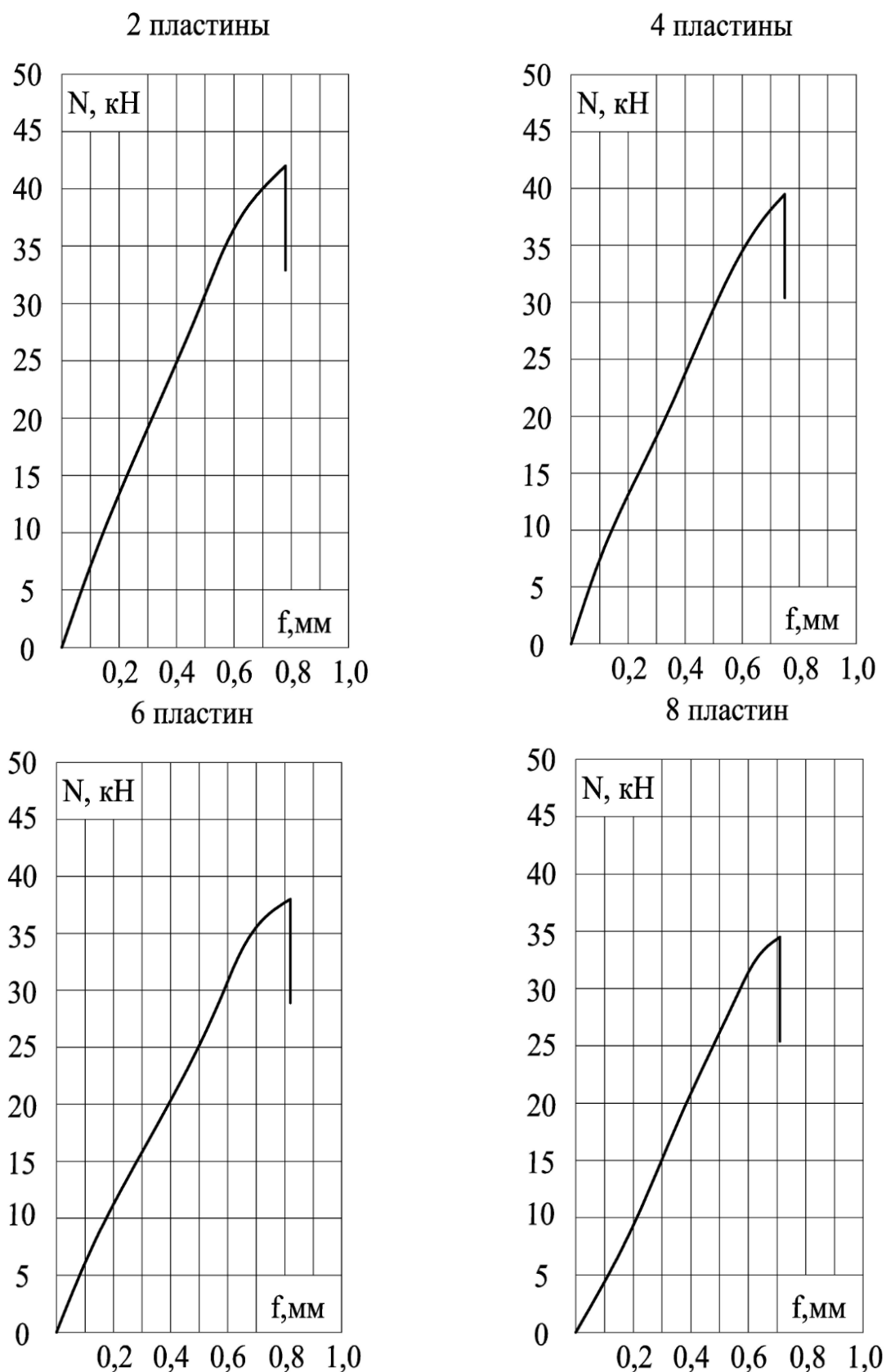


Рисунок 4.26 - Принципиальная схема испытания образцов с варьируемым количеством вклеенных пластин



Рисунок 4.27– Общий вид испытания образца с четырьмя параллельно работающими пластинами





а – две пластины по схеме 4.20, б – четыре пластины по схеме 4.20, в; в – четыре пластины по схеме 4.20, г; г – восемь пластины по схеме 4.20, д

Рисунок 4.28 – Наиболее характерные графики деформирования образцов с двумя, четырьмя и шестью стержнями при нагрузке, отнесенной к одиночному стержню

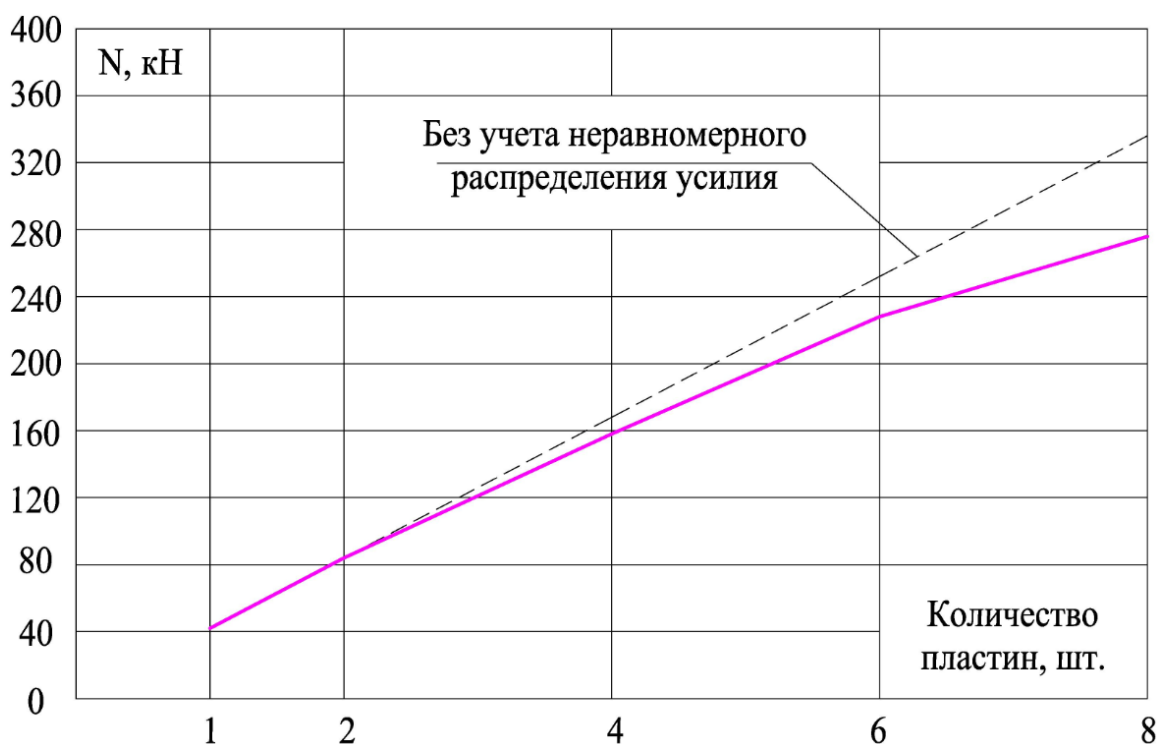


Рисунок 4.29 – График зависимости несущей способности соединения от количества пластин

ными пластинами, учитывая реальные поперечные сечения деревянных элементов, автор отмечает нецелесообразность проектирования соединений с количеством параллельно работающих пластин более восьми.

Значения деформаций соединений при расчетной нагрузке в среднем составили 0,25 - 0,3 мм, что в 3,3 - 4,0 раза меньше предельно допустимой нормируемой кратковременной деформации соединений на стальных механических связях, принятой равной 1,0 мм / 103 /. Также отметим, что практически до разрушения деформации соединения нарастали строго пропорционально значению нагрузки, что подтверждает работу образцов в упругой стадии и говорит о надежности предлагаемого вида соединения.

В целом, проведенные испытания натуральных образцов подтвердили их достаточную прочность и жесткость. Также подтверждена возможность распространения данных, полученных при испытании отдельных пластин, на натурные конструкции. Фактические значения деформаций позволяют отнести узлы на клеенных стальных пластинах к соединениям с повышенной жесткостью.

#### 4.5 Сравнение теоретических и экспериментальных данных

Для оценки адекватности численных расчетов разработанных и испытанных узловых сопряжений деревянных элементов, а также для подтверждения возможности применения численных методов в расчетах реальных деревянных конструкций проведено сравнение полученных теоретических и экспериментальных данных для растянутого стыка и для опорного узла фермы при расчетных нагрузках.

Как видно из представленных в разделах 4.2, 4.3.2 и 4.3.5 настоящей главы графиков и карт, расхождения в теоретических и экспериментальных величинах общих деформаций растянутого стыка не превысили 7,0 % (0,71 мм и 0,75 мм соответственно). На такой же практически процент отличались между собой теоретические и экспериментальные деформации отдельных пластин. Экспериментальные значения касательных напряжений в древесине и клеевой прослойки, вычисленные по показаниям тензорозеток в пяти точках по длине вклеенной части, были на 12-14 % меньше соответствующих расчетных величин. Это можно объяснить длиной тензодатчиков (12 мм) и влиянием на их показания годовых слоев древесины. По этой же причине практически такие расхождения были выявлены при определении раскалывающих напряжений в древесине тензодатчиками и в численных расчетах.

Расхождения в теоретических и экспериментальных величинах деформаций пластин относительно массива древесины в опорном узле фермы составили 9,4% (0,32 мм и 0,29 мм соответственно). Уменьшение экспериментальных значений объясняется передачей нагрузки на пластину не локально в торце, а в ее середине на части длины, что приводит к более равномерному распределению нормальных напряжений по длине пластины, что не учитывалось при определении расчетной нагрузки.

Проведенное сравнение в целом подтвердило как адекватность принятых расчетных моделей в численных расчетах, так и объективность результатов экспериментальных исследований, выполненных на натуральных узлах.

#### 4.6 Выводы по четвертой главе

1. В результате опытно-конструкторских разработок предложены новые конструктивные решения узлов соединения элементов деревянных конструкций на стальных клеенных пластинах.

2. Проведенные численные исследования особенностей напряженно-деформированного состояния предложенных типов узловых соединений подтвердили обоснованность использования в их расчетах основных положений, полученных в результате экспериментально-теоретических исследований отдельных пластин.

3. С увеличением количества пластин в узловом сопряжении расчетная несущая способность каждой отдельно взятой пластины снижается. Величина снижения составляет от 0,95 при четырех параллельно работающих пластинах до 0,82 при восьми пластинах, что необходимо учитывать в практических расчетах введением корректировочного коэффициента  $k_n$ .

4. Установлена удовлетворительная сходимость результатов численных и экспериментальных исследований, что подтверждает возможность использования для предлагаемых типов узлов стандартных программных комплексов типа «APM CivilEngineering» и «ANSYS». Также выявлена хорошая сходимость данных эксперимента и значения корректировочных расчетных коэффициентов, позволяющих разработать практическую методику расчета узловых соединений элементов деревянных конструкций на стальных клеенных пластинах для ее внедрения в проектную практику.

5. Разработанные конструктивные решения узлов соединения элементов деревянных конструкций на стальных клеенных пластинах обладают необходимой степенью прочности и жесткости, в том числе при длительном действии нагрузок, и могут быть рекомендованы к применению в строительной практике.

## **5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ, РАСЧЕТУ И ИЗГОТОВЛЕНИЮ СОЕДИНЕНИЙ НА СТАЛЬНЫХ ВКЛЕЕННЫХ ПЛАСТИНАХ И ИХ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ**

Основной задачей экспериментально-теоретических исследований явилось изучение напряженно-деформированного состояния соединений элементов деревянных конструкций на стальных клеенных пластинах, выявление наиболее напряженных зон соединения, определяющих несущую способность конструкции в целом. Проведенные исследования позволили дать оценку возможности применения клеевого соединения стальных пластин с древесиной, выявить оптимальные параметры механической обработки поверхности для обеспечения адгезии по контакту клея с пластиной. Кроме этого в процессе испытания образцов и узлов отработаны технологические операции по подготовке стальных пластин, деревянных элементов и непосредственно процесса вклейки пластин в древесину, обеспечивающие необходимую несущую способность стыка. Полученный материал позволил разработать практические рекомендации по конструированию, расчету и изготовлению соединений деревянных конструкций с применением стальных клеенных пластин, приведенные в настоящей главе. На примерах реального проектирования проведена оценка технико-экономической эффективности применения в практике строительства предложенного типа соединения.

### **5.1 Общие положения**

При конструировании и расчете узловых соединений деревянных конструкций на стальных клеенных пластинах следует руководствоваться требованиями, действующими при проектировании деревянных и стальных конструкций / 103, 174, 175 /. Защиту деревянных элементов узлов от биоповреждения, увлажнения и возгорания, стальных деталей от коррозии необходимо выполнять в соответствии с требованиями СП 28.13330.2012 «Защита строи-

тельных конструкций от коррозии». Также следует учитывать требования «Руководства по обеспечению долговечности деревянных клееных конструкций при воздействии на них микроклимата зданий различного назначения и атмосферных факторов» / 93 / для обеспечения долговечности деревянных конструкций в целом.

Соединяемые деревянные элементы могут быть изготовлены как из брусьев или бревен цельного сечения, так и из клееных заготовок, качество которых соответствует ГОСТ 8486 «Пиломатериалы хвойных пород. Технические условия», ГОСТ 9463 «Лесоматериалы хвойных пород. Технические условия», ГОСТ 20850 «Конструкции деревянные клеенные. Общие технические условия, ГОСТ 24454 «Пиломатериалы хвойных пород. Размеры», а также дополнительным требованиям по приложению Б / 103 /. Влажность древесины на момент изготовления соединений должна находиться в пределах 8 - 14 %.

В качестве материала клеиваемых пластин рекомендуется применять сталь Ст3 обыкновенного качества группы поставки «А» с различной степенью раскисления и пределом текучести не менее 220 МПа. Пластины изготавливать из полосового горячекатаного проката по ГОСТ 103-2006 «Прокат сортовой стальной горячекатаный полосовой». При применении пластин с размерами, не предусмотренными указанным стандартом, допускается их изготовление из листового проката по ГОСТ 14637 «Прокат тонколистовой из углеродистой стали обыкновенного качества. Технические условия» путем гильотинной рубки с дополнительной обработкой кромок при необходимости. Применение марки стали с более высоким пределом текучести нецелесообразно, так как в этом случае не полностью используются прочностные свойства стали. Для клеивания пластин рекомендуется применять клеи на базе эпоксидной смолы ЭД20 с наполнителем – молотым песком (маршалитом) или цементом.

Вклеенные пластины из стали могут быть использованы в тех же конструкциях, в которых применяются нагельные соединения, соединения на МЗП и гвоздях, а также при усилении конструкций, в том числе с заменой от-

дельных деревянных элементов. Конструктивно стыки двух или нескольких деревянных элементов с клееными стальными пластинами могут быть разъемными или неразъемными. В разъемных стыках в качестве соединительных элементов выступают как клеенные пластины, так и другие типы соединений в различных сочетаниях. Разъемность стыка, как правило, обеспечивается болтовым соединением, с болтами, работающим на срез со смятием или растяжением. Для устройства болтового соединения к клеиваемым пластинам приваривают дополнительные стальные элементы (пластины, уголки, швеллера и т.п.). Несущую способность такого стыка необходимо оценивать по прочности и жесткости каждого из соединительных элементов. В неразъемных стыках основной соединительной деталью является клеенная в соединяемые деревянные элементы стальная пластина, а несущую способность соединения оценивают по несущей способности самой пластины и клеевого соединения пластины с древесиной.

Рассматриваемый тип соединений элементов деревянных конструкций на стальных клеенных пластинах может применяться в конструкциях из цельной и клееной древесины, эксплуатируемых в условиях, соответствующих классам 1 и 2 согласно классификации, приведенной в таблице 1 / 103 /. При дополнительном проведении исследований на температурно-влажностные воздействия область применения предложенного типа соединений может быть расширена.

## **5.2 Конструирование и расчет**

### **5.2.1 Указания по конструированию**

Узловые соединения деревянных элементов на стальных клеенных пластинах могут быть выполнены в неразъемном или разъемном вариантах в зависимости от требований изготовления, транспортировки и монтажа. Примеры таких соединений приведены на рисунках 5.1, 5.2 и 5.3. При неразъемном варианте узел выполняют непосредственно на пластинах, клеенных в массив

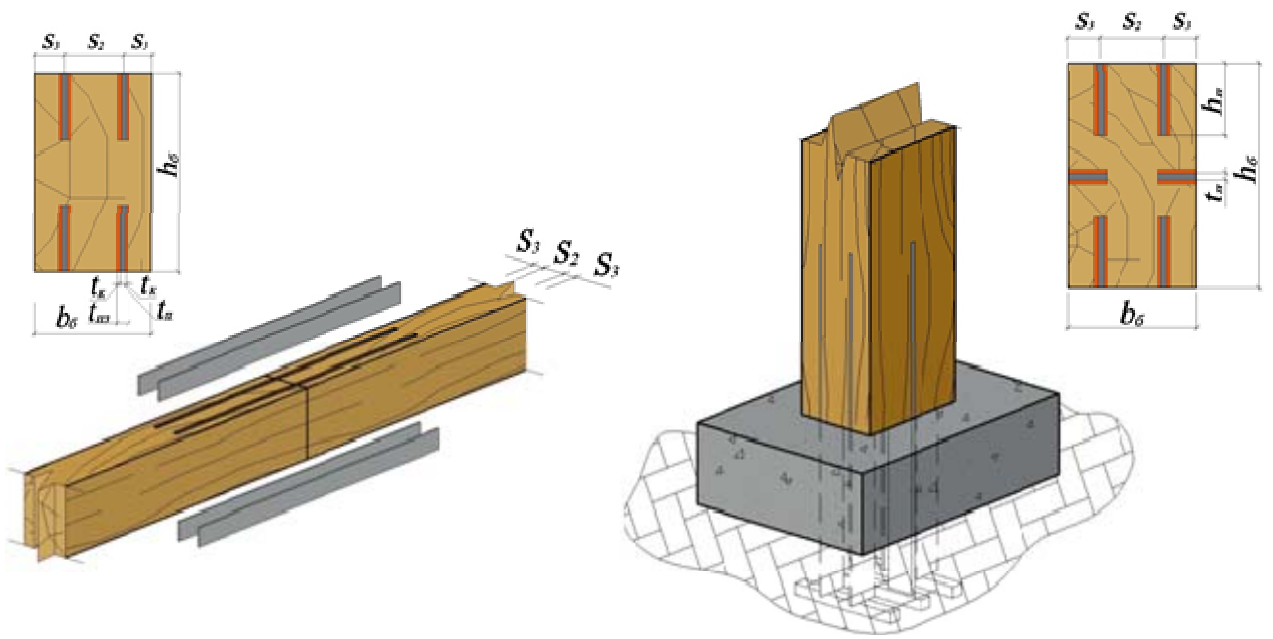


Рисунок 5.1 – Варианты конструктивного решения неразъемных узлов с применением стальных клеенных пластин

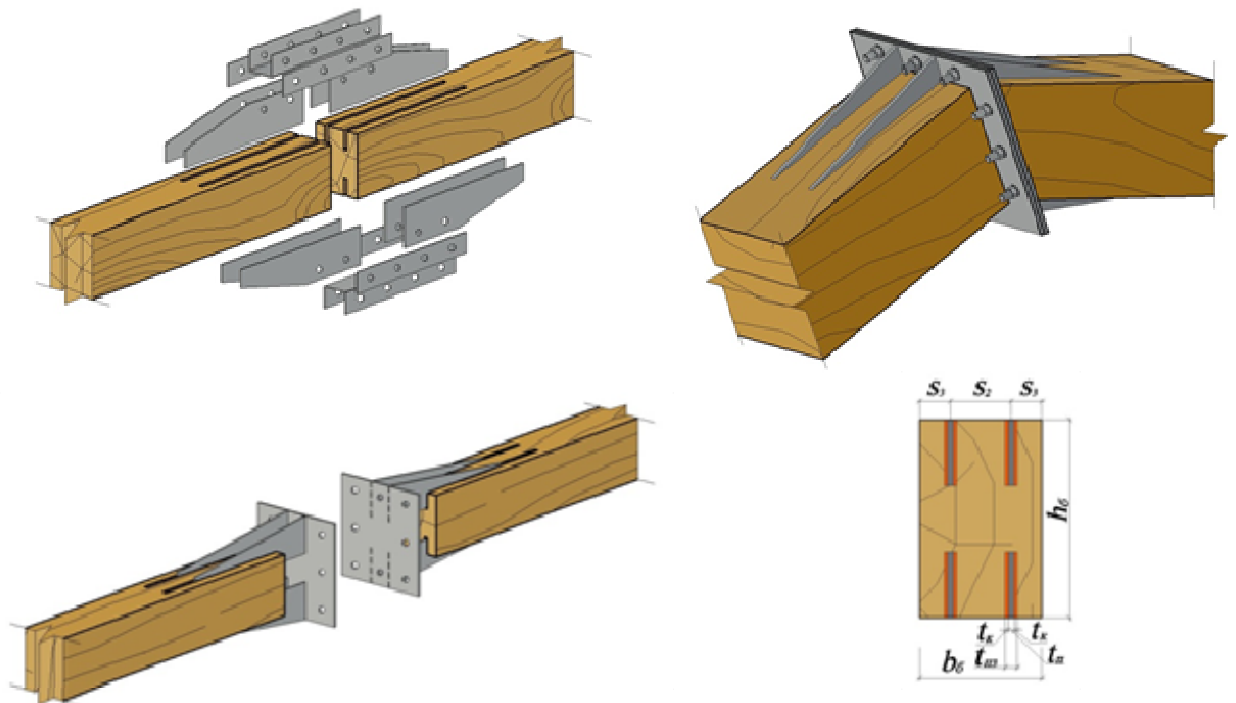
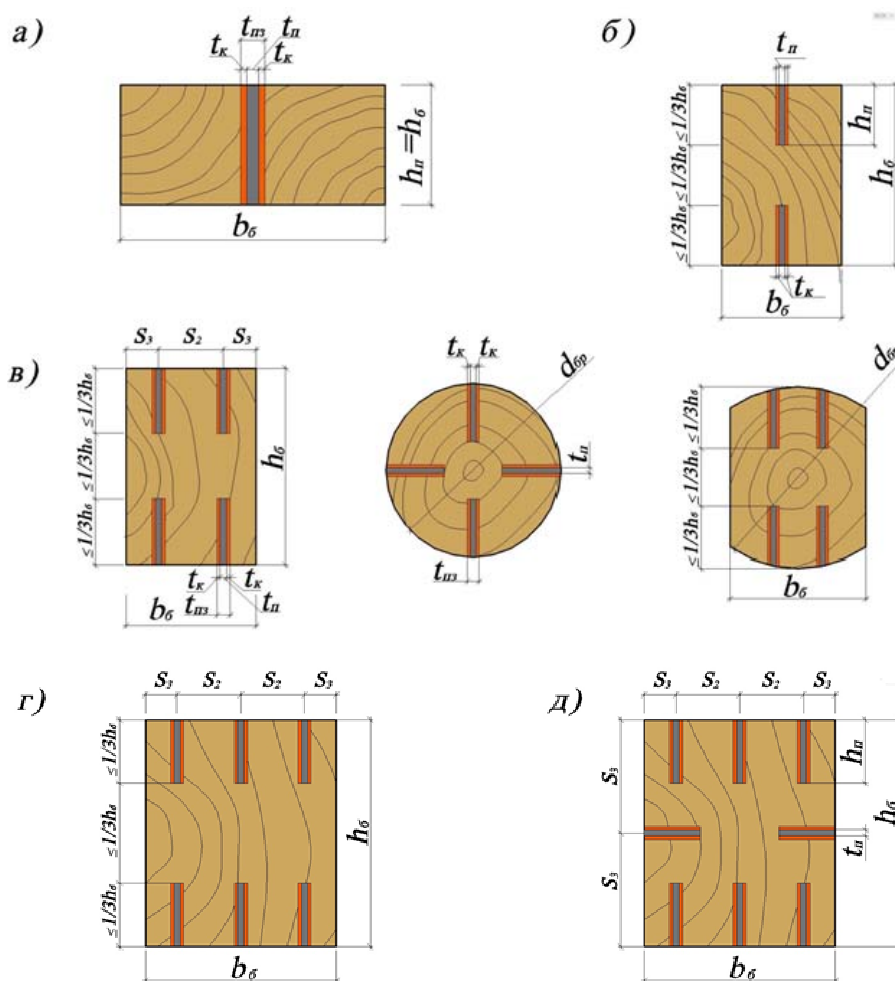


Рисунок 5.2 – Варианты конструктивного решения разъемных узлов с применением стальных клеенных пластин





а - с одной пластиной; б - с двумя пластинами; в - с четырьмя пластинами;  
г - с шестью пластинами; д - с восьмью пластинами

Рисунок 5.3 – Варианты компоновки поперечного сечения соединяемых деревянных элементов в узлах с применением стальных клеенных пластин

соединяемых деревянных элементов, при разъемном стыке применяют дополнительные соединительные пластины, болты, фланцы и т.п.

При конструировании рассматриваемого класса соединений необходимо руководствоваться следующими указаниями.

1. Ширина клеиваемой пластины  $b$  должна приниматься не менее 40мм и не более 100мм. Минимальная ширина определена из условия конструирования соединения и обеспечения требуемой прочности пластин при их ослаблении отверстиями под соединительные болты, максимальная - из условия минимизации влияния температурно-влажностных факторов на надежность работы узла, в котором присутствуют материалы с различными коэффициентами температурно-влажностного расширения. Кроме этого из условия ком-

поновки симметричного соединения ширина пластины  $b$  не должна превышать  $1/3$  размера поперечного сечения деревянного элемента, параллельному глубине выбираемого паза.

2. Толщину пластины  $t_{nl}$  назначают в диапазоне от 4мм до 10мм. Этот параметр ограничивается, с одной стороны, необходимостью выполнять механическую обработку поверхностей пластин на глубину до 1 мм, с другой стороны – возможностями гильотинной рубки металла.

3. Длина клеиваемой части пластины  $l$  назначается по расчету, но не менее  $2b$  и не более  $8b$ , что обусловлено реальными значениями расчетных усилий в элементах конструкций, обеспечением качества клейки пластины в массив древесины и с неравномерным распределением нормальных и касательных напряжений по длине клеенной части (при увеличении длины клейки более  $8b$  несущая способность соединения практически не изменяется). Кроме этого минимальная длина клейки продиктована требованиями надежности. Последнее имеет целью ограничить степень влияния сортообразующих пороков (сучков, косослоя и т.п.) на прочность соединений.

4. Ширина паза для вклеивания пластин должна быть на 4 мм больше толщины самой пластины  $t_{nl}$ . Толщина клеевой прослойки в 2 мм позволяет избежать возможного непрочекля, обеспечивает как оптимальное сочетание прочности соединения и расхода клеевой композиции, так и выполнение ей функции демпфера при изменении температурно-влажностных условий эксплуатации. Длину паза принимают равной длине клеиваемой части пластины.

5. Расстояние между осями пластин по ширине бруса (поперек волокон) (рисунок 5.3) должно приниматься:

$$\begin{cases} S_2 \geq 5t_{nl} \\ S_2 \geq 30\text{мм} \end{cases} \quad \begin{cases} S_3 \geq 4t_{nl} \\ S_3 \geq 20\text{мм} \end{cases}$$

При таких расстояниях практически исключается взаимное влияние пластин на напряжения, действующие в массиве древесины.

6. В одном узловом соединении необходимо применять пластины одинакового поперечного сечения. Эта рекомендация имеет целью исключить перераспределение нагрузки между параллельно работающими пластинами вследствие различий их жесткостных характеристик.

7. При компоновке узлового соединения необходимо обеспечивать симметричное распределение пластин по сечению, за счет чего достигается равномерная передача растягивающих усилий в стыке, при этом количество пластин в одном узле принимают не менее двух и не более восьми. Ограничение числа пластин введено с целью предотвращения возможной существенной неравномерности их загрузки как параллельно работающих связей.

### 5.2.2 Указания по расчету

Расчет растянутых стыков на клеенных стальных пластинах (рисунки 5.1, 5.2, 5.3) ведется из условия равнопрочности всех элементов соединения в следующей последовательности.

На первом этапе выполняется общий расчет конструкции с подбором сечения стыкуемых деревянных элементов, из которого определяют продольные усилия в стыке. По найденным усилиям определяются минимальная площадь сечения клеиваемых пластин в соответствии с требованиями СП 16.13330.2011 / 174 /:

$$\frac{N}{A_n R_y \gamma_c \gamma_m n k_{nl}} \leq 1 \quad (5.1)$$

где  $A_n$  - площадь клеиваемой пластины;

$R_y$  - расчетное сопротивление стали полосы;

$R_{yn}$  - предел текучести стали по сертификату поставки;

$\gamma_m$  - коэффициент надежности по материалу;

$\gamma_c$  - коэффициент условий работы;

$n$  - количество пластин в соединении;

$k_{nl}$  - коэффициент, учитывающий возможную неравномерность распределения нагрузки между параллельно работающими пластинами.

На втором этапе komponуется расстановка клеиваемых пластин в сечении бруса с соблюдением симметричного распределения пластин по сечению. В случае применения разъемного стыка деревянных конструкций с ослаблениями под болты за пределами клеенной части пластины, работающими на срез и смятие, размеры сечений болтов и пластин уточняются в соответствии с требованиями / 174 /. При применении в разъемном стыке на клеенных пластинах предварительно приваренных к ним элементов для передачи усилия на болты, работающие на растяжение, выполняют расчет соответствующих сварных и болтовых соединений и, в случае необходимости корректируют размеры сечения клеиваемых пластин.

На третьем этапе определяют длину клеенной части пластин из условия обеспечения несущей способности клеевого соединения  $T$  :

$$T \geq N \quad (5.2);$$

Несущую способность клеевого соединения необходимо определять по формуле:

$$T \leq R_{ск} \cdot n \cdot b \cdot l \cdot k_t \cdot k_l \cdot k_{nl} \quad (5.3);$$

где  $R_{ск}$  - расчетное сопротивление древесины скалыванию, МПа, определяемое по поз. 5г таблицы 3 СП 64.13330.2011 / 103 /;

$n$  - количество пластин в соединении,  $2 \leq n \leq 8$ ;

$b$  - ширина клеиваемой пластины, м,  $0,04\text{м} \leq b \leq 0,10\text{м}$ ;

$l$  - длина клеиваемой части пластины, м,  $2b \leq l \leq 8b$ ;

$k_t$  - коэффициент снижения несущей способности клеевого соединения в зависимости от толщины пластины, определяемый по формуле:

$$k_t = 0,85 + 30t_{nl} \quad (5.4)$$

где  $t_{nl}$  - толщина пластины в метрах;

$k_l$  - коэффициент снижения несущей способности клеевого соединения в зависимости от длины клеенной части пластины, определяемый по формуле:

$$k_l = 1,125 + 0,9l^2 - 1,36l \quad (5.5)$$

$k_n$  - коэффициент, учитывающий возможную неравномерность распределения нагрузки между параллельно работающими пластинами, равный 1,0 для двух параллельно работающих пластин; 0,95 - для четырех пластин; 0,90 - для шести пластин и 0,82 - для восьми пластин.

В качестве примера приведем расчет неразъемного стыка нижнего пояса фермы (рисунок 5.4, в), растянутого расчетным усилием в 127 кН. Пояс выполнен из бруса сосны сечением 130x180 мм.

Требуемая общая площадь сечения нетто одной пластины при конструировании соединения на 4-х пластинах, клеиваемых симметрично в верхний и нижний пояс бруса определяем в соответствии с формулой (5.1):

$$\frac{12700}{4 \cdot A_n \cdot 2400 \cdot 1,05 \cdot 0,9 \cdot 0,95} \leq 1$$

Требуемая площадь нетто сечения каждой из клеиваемых пластин должна составлять не менее  $A_n \geq 133 \text{ мм}^2$ . С учетом вышеприведенных рекомендаций принимаем ширину пластины  $b_n = 50 \text{ мм}$ , толщину пластины назначаем  $t_n = 5 \text{ мм}$ . Механическую обработку поверхности пластин назначаем в соответствии с параметрами, приведенными в главе 2. С учетом механической обработки пластин с обеих сторон пазами глубиной 1,0 мм площадь сечения пластины нетто  $A_n$  (факт) = 150 мм<sup>2</sup>, что больше требуемой величины 133 мм<sup>2</sup>.

Компоновка поперечного сечения деревянного нижнего пояса с клееными пластинами приведена на рисунке 5.4, в. Принимаем в первом приближении длину клейки 350 мм. Тогда по формулам (5.4) и (5.5) определяем коэффициенты  $k_t$  и  $k_l$ , которые будут равны 1,0 и 0,76 соответственно. Проверяем несущую способность соединения по формуле 5.3. Подставляя числовые значения членов формулы, получаем несущую способность  $T$ , равную 212 кН, что превышает расчетное усилие  $N=127 \text{ кН}$  и позволяет уменьшить длину клейки пластины до 200 мм.

### 5.3 Указания по изготовлению соединений

Изготовление соединения на клеенных стальных пластинах, работающих на растяжение, следует выполнять на заключительной стадии изготовления деревянных элементов, после их острожки, торцовки и защитной обработки. Предварительно производится подготовка пластин путем развития их поверхностей на фрезерном или насекальном станке, механической очистки от ржавчины и обезжиривания. Предварительное объединение клеиваемых пластин с другими крепежными деталями следует выполнять на сварочных автоматах, в специальных кондукторах, предотвращающих отклонение от проектной геометрической формы и термический увод.

Вклеивание пластин выполняют в следующей последовательности.

1. На фрезерном станке пазовой фрезой в подготовленном бруске выбирается необходимое количество пазов для вклейки пластин, которые после изготовления необходимо очистить от стружки и пыли.

2. Пластины устанавливают в пазы и расклинивают по концам и в средней части по длине стальными калиброванными вставками толщиной 2,5 мм.

3. Устраивают дополнительные торцевые пластины, например, из фанеры для предотвращения вытекания клея из пазов.

4. Заполнение пазов с установленной пластиной клеевой композицией производится при помощи шприца с диаметром выходного отверстия в 2 мм.

5. При изготовлении соединений с несквозными пазами как со стороны верхней, так и со стороны нижней граней бруса, для возможности кантовки после заливки клея устраивают продольные заглушки.

6. Нагрузка от собственного веса и транспортировка конструкций допускается не ранее чем через 24 часа, а пригруз конструкций – не ранее чем через 72 часа с момента вклеивания пластин.

8. В процессе изготовления соединения осуществляют контроль качества применяемых материалов, пооперационный и выходной контроль в соответствии с «Руководством по изготовлению и контролю качества деревянных клееных конструкций» / 179 /.

#### **5.4 Оценка технико-экономической эффективности применения соединений на клеенных пластинах.**

Оценка экономической эффективности предложенных типов соединений элементов деревянных конструкций осуществлена на примерах технико-экономического сравнения узлов деревянных ферм покрытия, в которых в качестве соединительных элементов применены клеенные стальные пластины. Оценка эффективности проведена в соответствии с СН 509-78 «Инструкция по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений». В качестве объектов сравнения использованы известные варианты конструктивных решений таких узлов, выполненные на стандартных (рисунки 5.4, б и 5.5, а) и предлагаемых (рисунки 5.4, в, г и 5.5, б) типах связей. Упомянутые узлы рассчитаны на одинаковые нагрузки, при этом расчет деревянных и стальных элементов произведен в соответствии с требованиями действующих норм / 103, 174 /. Несущая способность клеенных стальных пластин определена в соответствии с вышеизложенными рекомендациями. В расчете экономической эффективности учитывались только те составные элементы узлов, параметры которых изменялись от применения того или иного типа связи, при этом несущая способность узлов принималась равная для сравниваемых вариантов.

Для анализа технико-экономической оценки разработанного способа соединения были рассмотрены пять типов узлов треугольных цельнодеревянных ферм покрытия пролетом 12,0 м и 18,0 м (рисунок 5.4, а) с учетом следующих исходных данных: шаг ферм – 3,0 м, ограждающие конструкции – прогоны и стальной профилированный настил, расчетная снеговая нагрузка – 2,4 кН/м<sup>2</sup>, нормативная снеговая нагрузка – 1,68 кН/м<sup>2</sup>. С учетом действующих нагрузок, конструкции подвесного утепленного потолка и полезной нагрузки расчетные значения усилий в растянутом стыке составили  $N_{p12} = 110$  кН и  $N_{p18} = 213$  кН, расчетные усилия в верхнем поясе в опорном узле  $N_{вп12} = 127$  кН и  $N_{вп18} = 246$  кН для пролетов ферм 12,0 м и 18,0 м, соответственно.

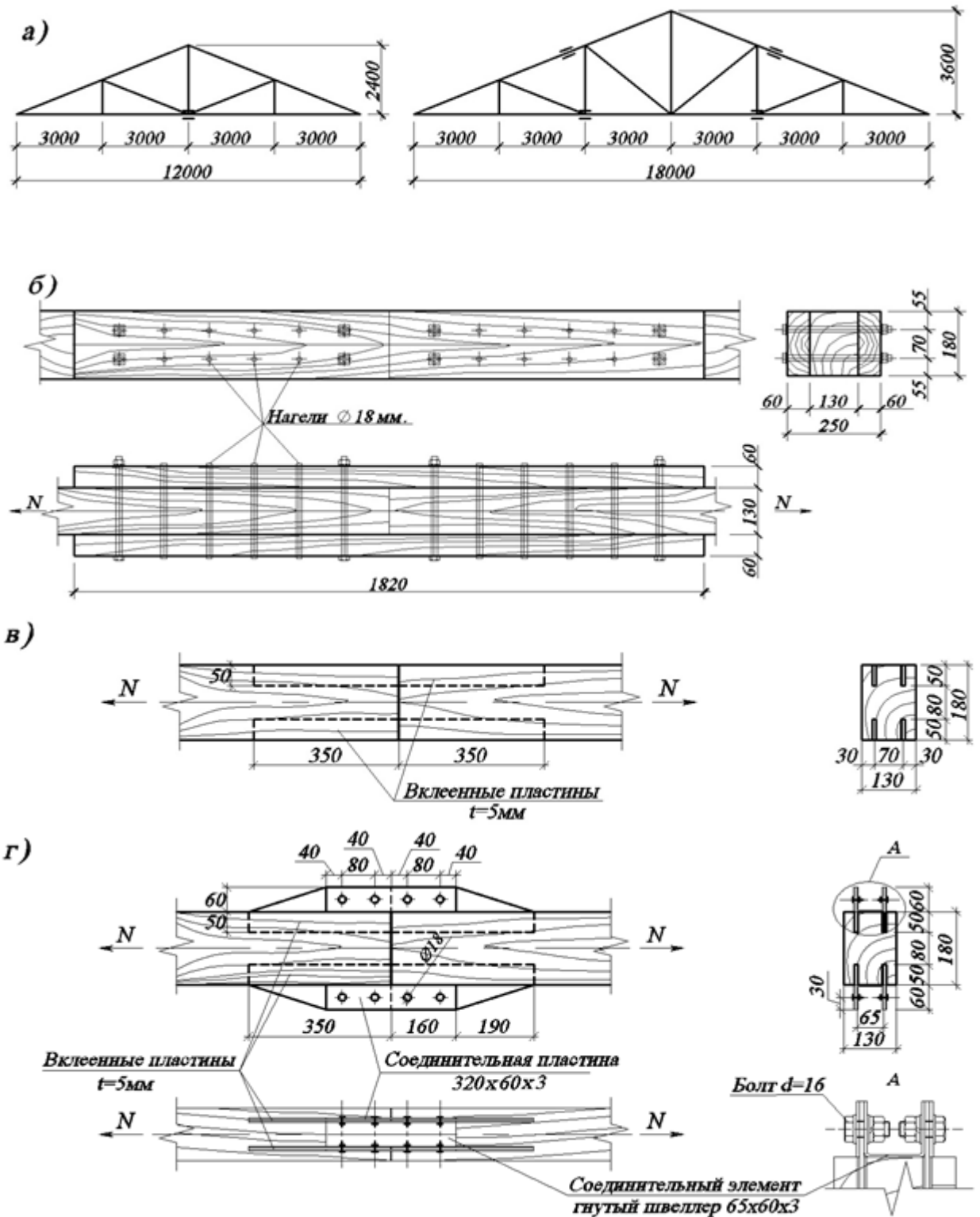
При проведении технико-экономических расчетов были рассмотрены следующие конструктивные решения узлов:

- растянутый стык нижнего пояса на нагелях (вариант 1, аналог);
- неразъемный стык нижнего пояса на клеенных стальных пластинах (вариант 2, предлагаемый);
- разъемный стык нижнего пояса на стальных клеенных пластинах (вариант 3, предлагаемый);
- опорный узел на нагелях и натяжных хомутах (вариант 4, аналог);
- опорный узел на клеенных стальных пластинах (вариант 5, предлагаемый).

Размеры поперечных сечений соединительных элементов приняты с учетом типового сортамента по соответствующим ГОСТам или стандартам предприятий. В результате выполненных расчетов были определены следующие показатели расхода основных материалов (таблица 5.1). При определении расхода материалов на изготовление узлов неизменяемые параметры (расход древесины на верхний и нижний пояса) не учитывались.

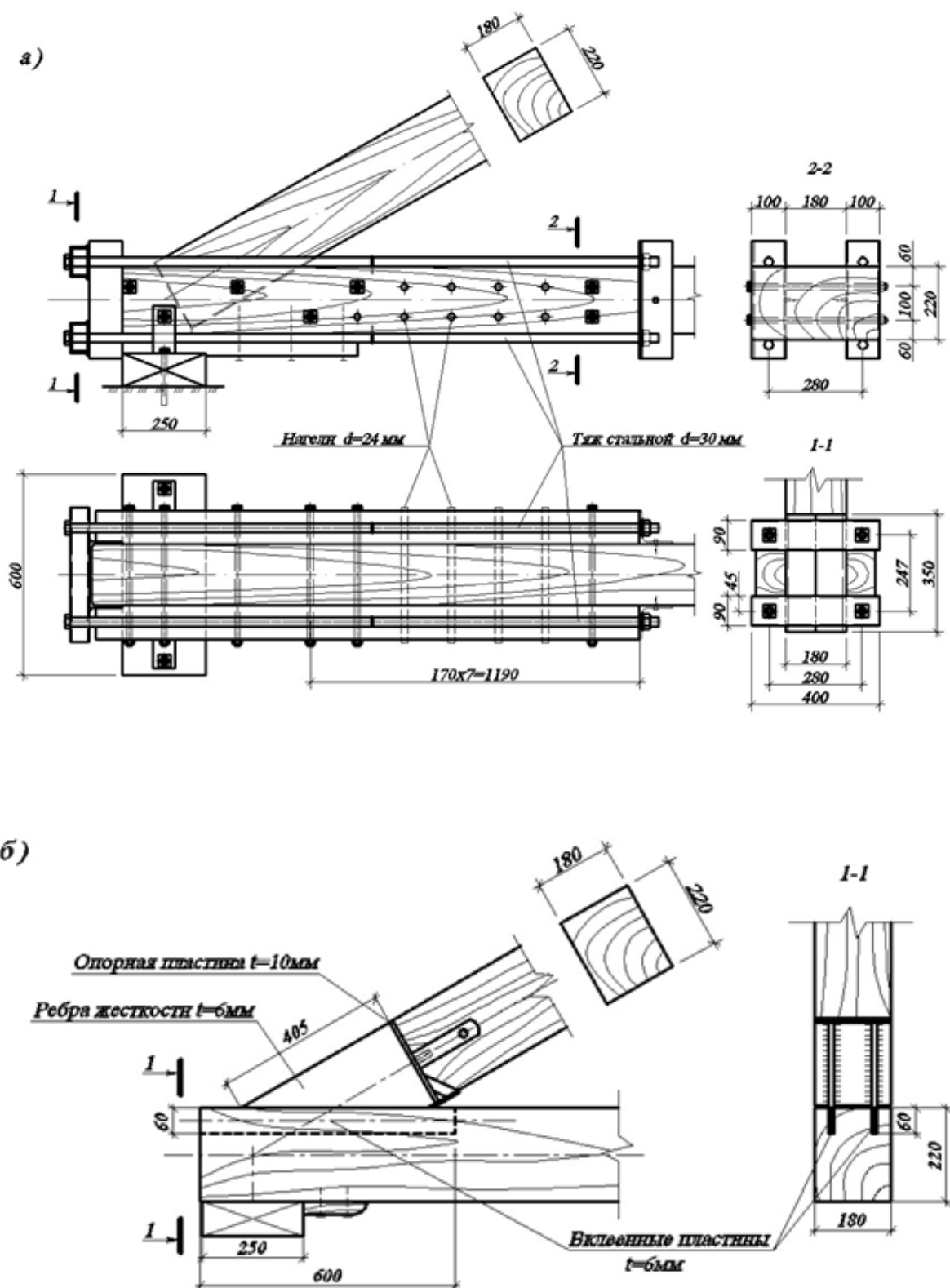
При определении стоимости узловых сопряжений расход основных строительных материалов принят с учетом нормируемых потерь на обработку и отходы. Также учтен и расход вспомогательных материалов (клеевые составы, электроды и т.п.). Стоимость материалов определена по прейскурантам на июль 2015 года для условий строительства на территории Оренбургской области. Стоимость и трудоемкость изготовления рассчитывали по чертежам сравниваемых вариантов узлов по единым нормам и расценкам / 172 / с учетом территориального индекса перевода в текущие цены. Величина накладных расходов определена с учетом рекомендаций МДС 81-33.2004. Заработная плата рабочих принята по тарифным ставкам оплаты труда (база 2001 г.). Для перевода заработной платы из уровня 2001 года в уровень текущих цен применен индекс пересчета: 11,89 для основной заработной платы и 6,21 для эксплуатации машин и механизмов. Сметная прибыль согласно МДС 81-25.2001 принята в размере 65% от средств на оплату труда. Результаты расчетов приведены в таблице 5.2.





а - геометрические схемы ферм; б - стык нижнего пояса на стальных нагелях и деревянных накладках; в - то же, на вклеенных стальных пластинах, неразъемный; г - то же, на стальных вклеенных пластинах, разъемный

Рисунок 5.4 – Геометрические схемы расчетных ферм и варианты конструктивных решений узла растянутого стыка нижнего пояса (на примере фермы пролетом 12,0 м)



а - на стальных нагелях и натяжных хомутах; б - на клеенных стальных пластинах

Рисунок 5.5 – Варианты конструктивных решений опорного узла  
 (на примере фермы пролетом 18,0 м)

Таблица 5.1 – Расход основных материалов на сравниваемые узлы

№ варианта	Тип узла	Расход материалов			Вес, кг
		Древесина, м <sup>3</sup>	Сталь, кг	Клей, кг	
1	Растянутый узел нижнего пояса на нагелях	<u>0,039</u> 0,098	<u>13,3</u> 29,1	-	<u>32,8</u> 78,1
2	Неразъемный узел нижнего пояса на клеенных пластинах	-	<u>5,5</u> 10,4	<u>0,84</u> 1,26	<u>6,4</u> 11,7
3	Разъемный узел нижнего пояса на клеенных пластинах	-	<u>11,8</u> 22,2	<u>0,84</u> 1,26	<u>12,7</u> 23,5
4	Опорный узел на нагелях и натяжных хомутах	<u>0,069</u> 0,121	<u>57,8</u> 86,7	-	<u>92,3</u> 147,2
5	Опорный узел на клеенных пластинах	-	<u>17,6</u> 25,6	<u>0,71</u> 1,07	<u>18,4</u> 26,7

Таблица 5.2 – Основные технико-экономические показатели сравниваемых стыков

№ варианта	Тип конструкции	Трудоемк. изгот. чел-час	Стоимость		
			изготовления, руб.	материалов, руб.	узла, руб.
1	Растянутый узел нижнего пояса на нагелях	<u>2,12</u> 2,54	<u>848</u> 1016	<u>844</u> 1948	<u>1692</u> 2964
2	Неразъемный узел нижнего пояса на клеенных пластинах	<u>2,29</u> 2,64	<u>880</u> 1056	<u>514</u> 857	<u>1394</u> 1913
3	Разъемный узел нижнего пояса на клеенных пластинах	<u>2,63</u> 3,12	<u>1052</u> 1248	<u>766</u> 1329	<u>1818</u> 2577
4	Опорный узел на нагелях и натяжных хомутах	<u>7,72</u> 9,94	<u>3088</u> 3576	<u>2864</u> 4436	<u>5952</u> 8012
5	Опорный узел на клеенных пластинах	<u>5,14</u> 5,96	<u>2056</u> 2384	<u>953</u> 1399	<u>3009</u> 3783

Примечание. В таблицах 5.1 и 5.2 в числителе приведены технические и стоимостные показатели для фермы пролетом 12,0 м, в знаменателе - для фермы пролетом 18,0 м.

В результате проведенной технико-экономической оценки вариантов узлов, предложенные конструктивные решения по материалоемкости и общей стоимости оказались более рациональными (рисунок 5.8–5.12).

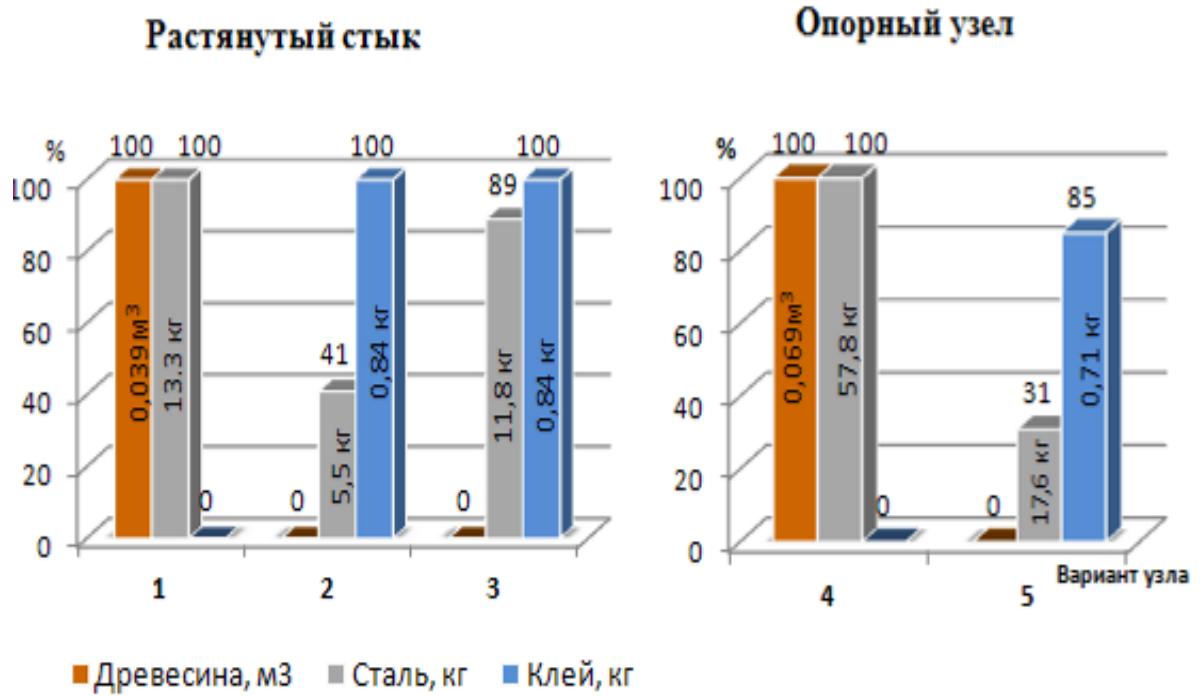


Рисунок 5.6 – Гистограмма распределения расхода основных материалов сравниваемых узлов по вариантам для фермы пролетом 12,0 м

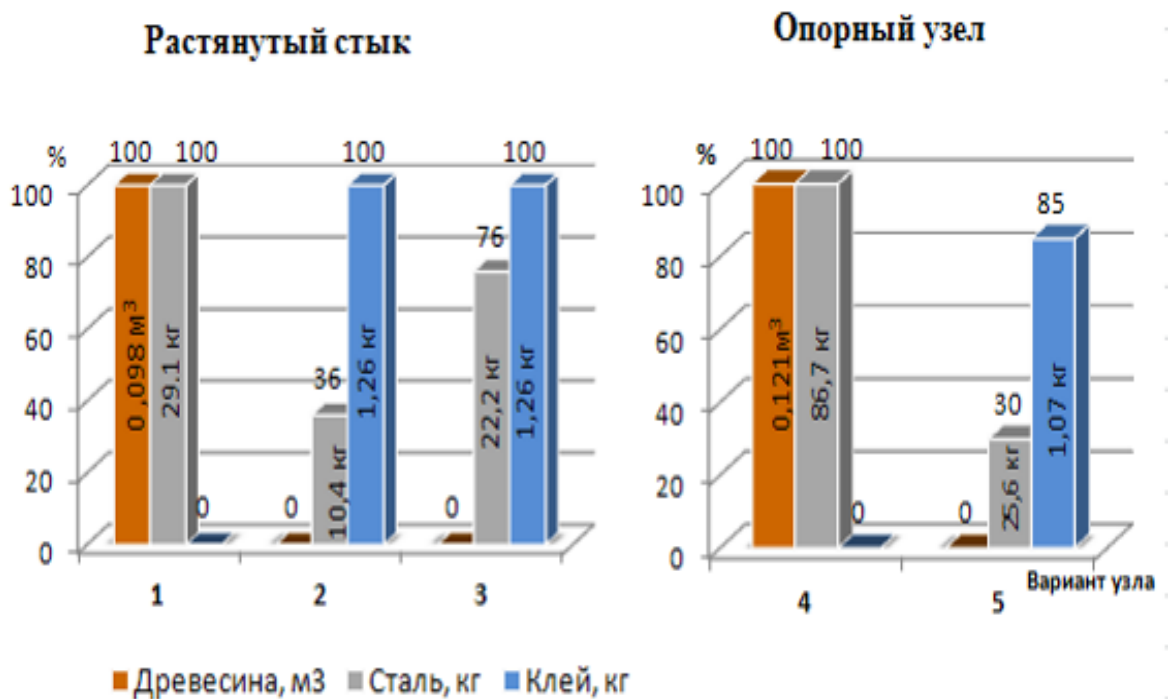


Рисунок 5.7 – Гистограмма распределения расхода основных материалов сравниваемых узлов по вариантам для фермы пролетом 18,0 м

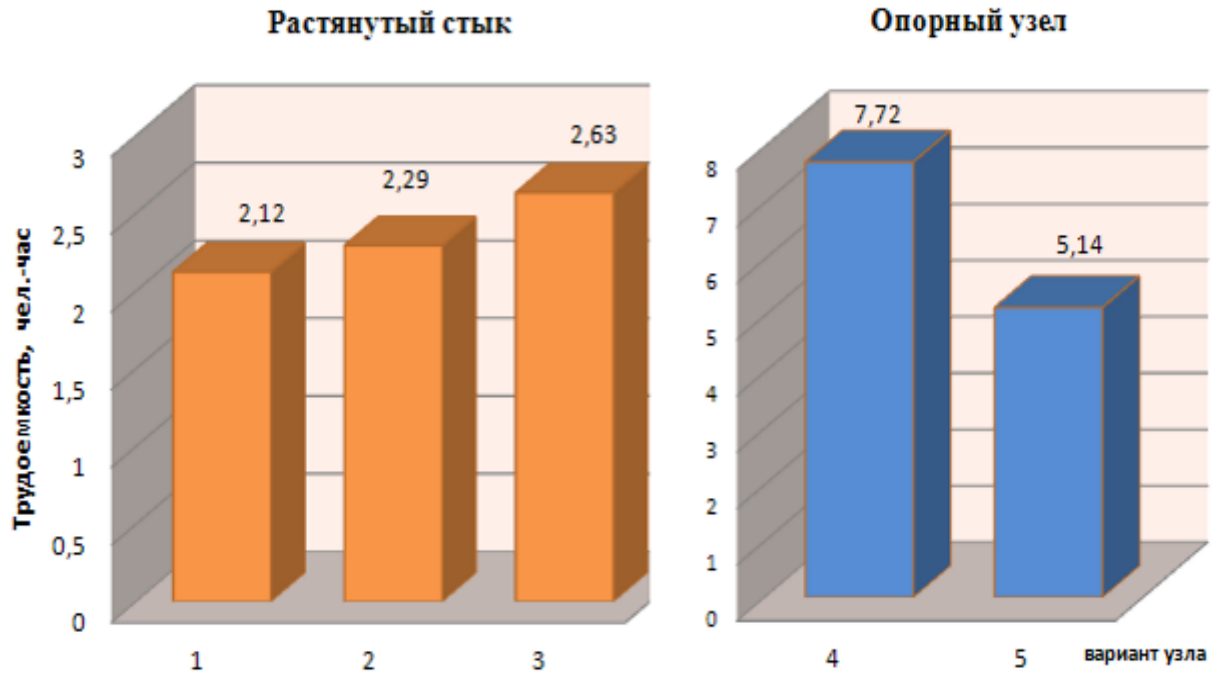


Рисунок 5.8 – Гистограмма распределения трудоемкости изготовления (чел.-час) для фермы пролетом 12,0 м

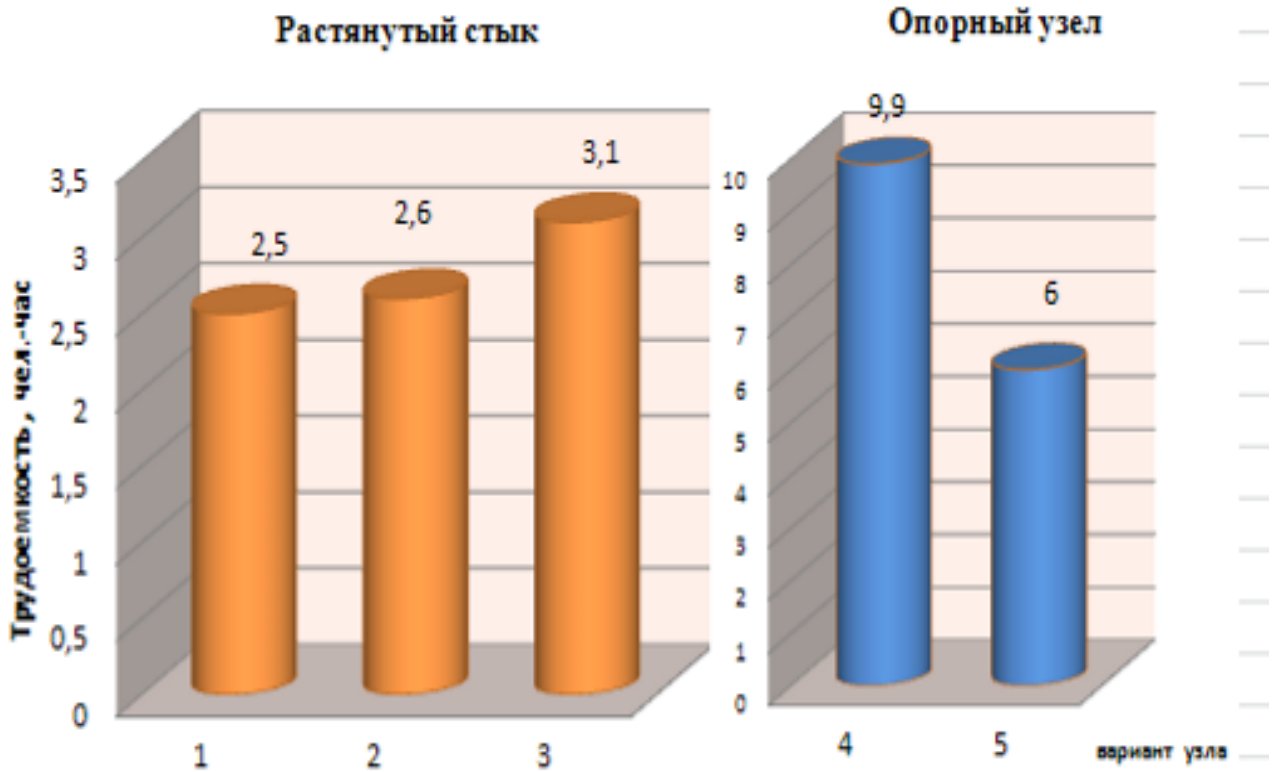


Рисунок 5.9 – Гистограмма распределения трудоемкости изготовления (чел.-час) для фермы пролетом 18,0 м



Рисунок 5.10 – Гистограмма распределения стоимости изготовления (руб.) для фермы пролетом 12,0 м

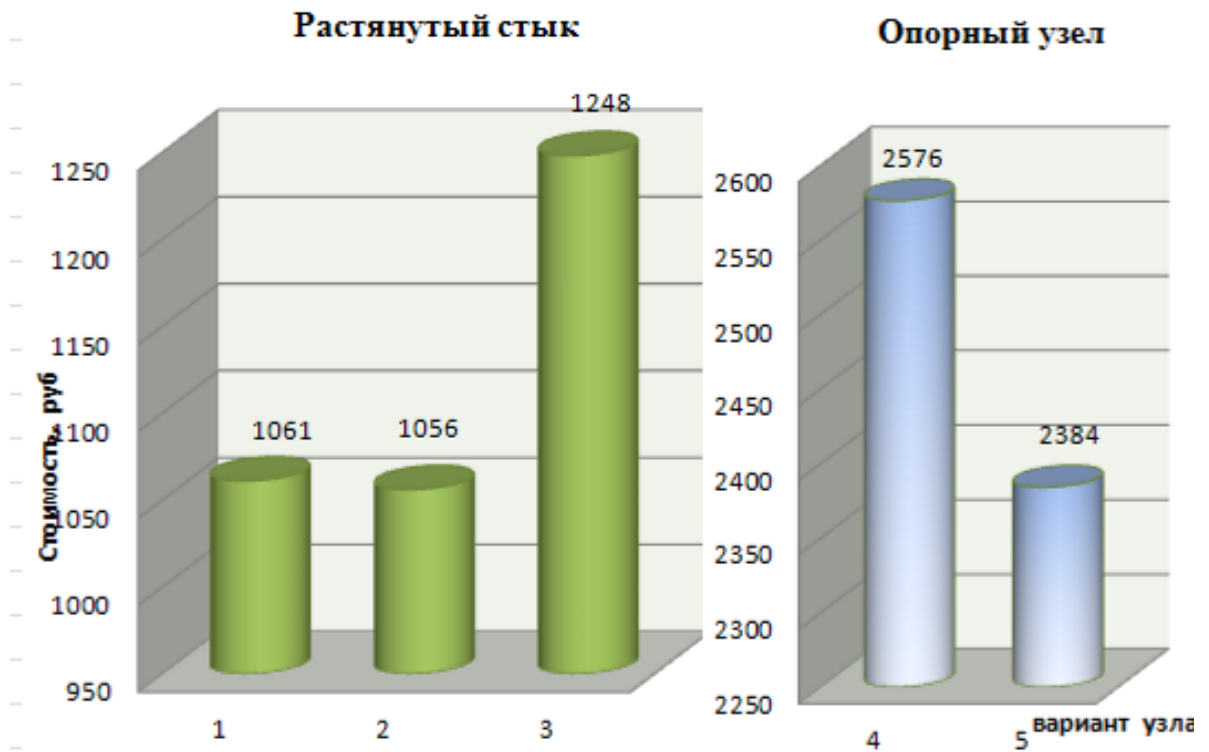


Рисунок 5.11 - Гистограмма распределения стоимости изготовления (руб.) для фермы пролетом 18,0 м

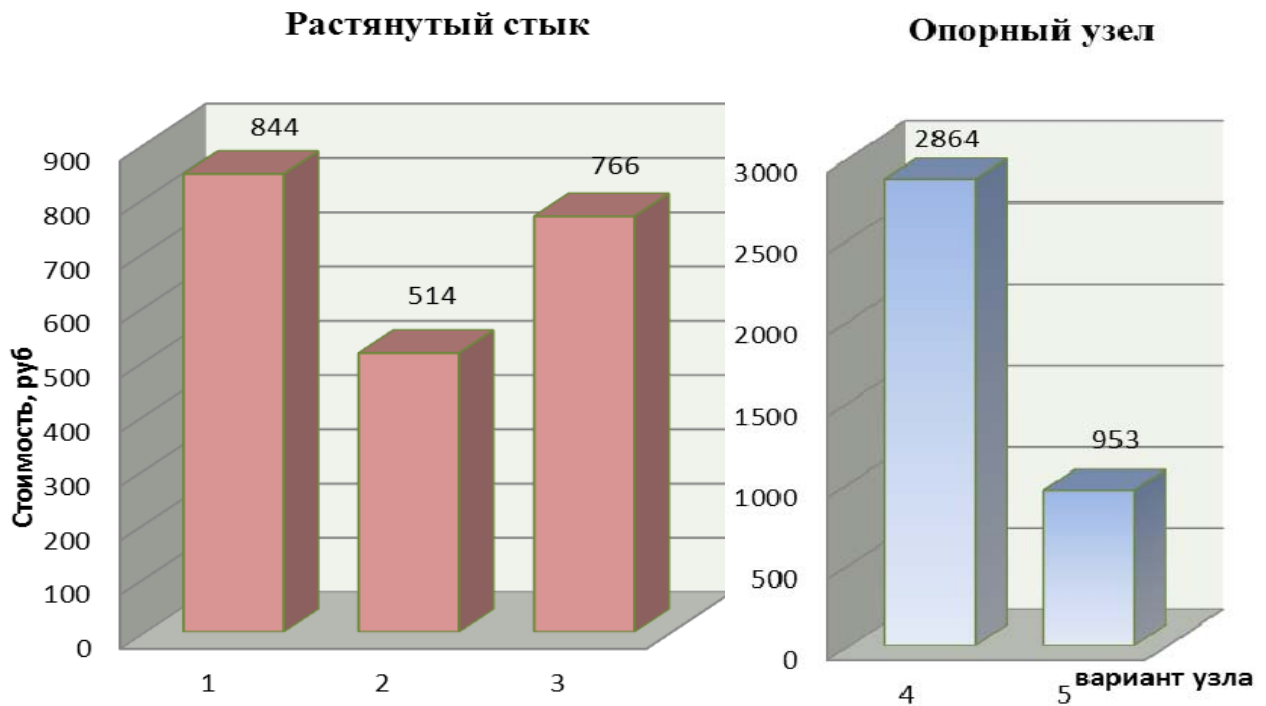


Рисунок 5.12 - Гистограмма распределения стоимости материалов (руб.) для фермы пролетом 12,0 м

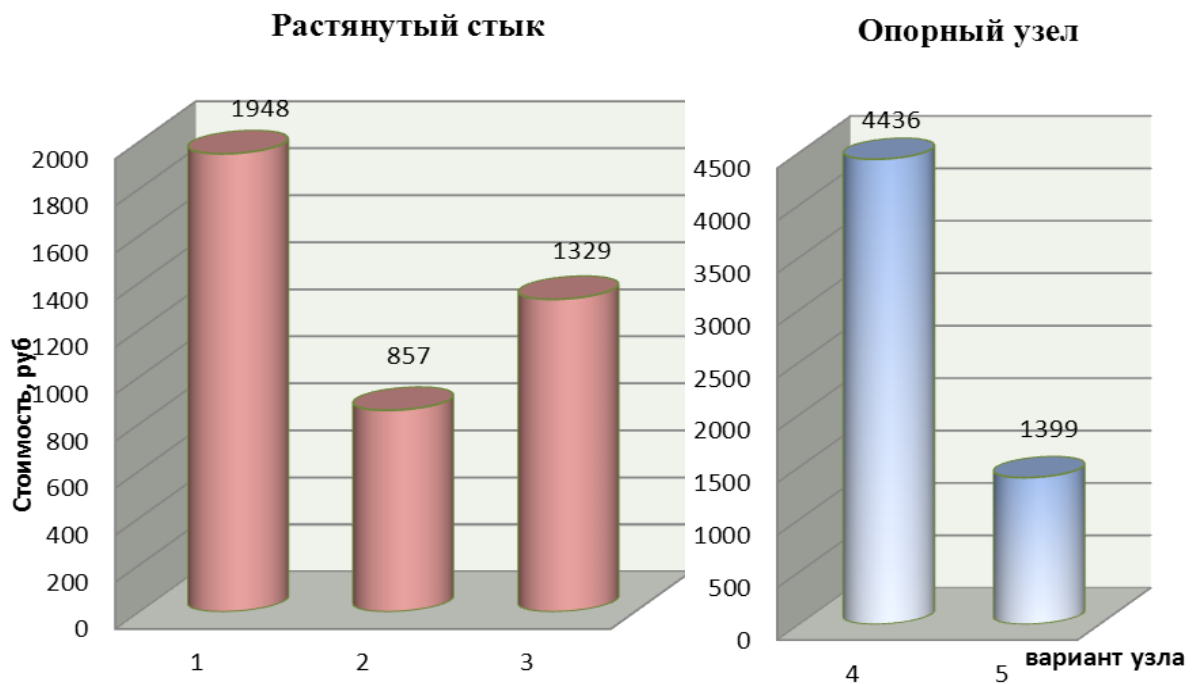


Рисунок 5.13 - Гистограмма распределения стоимости материалов (руб.) для фермы пролетом 18,0 м

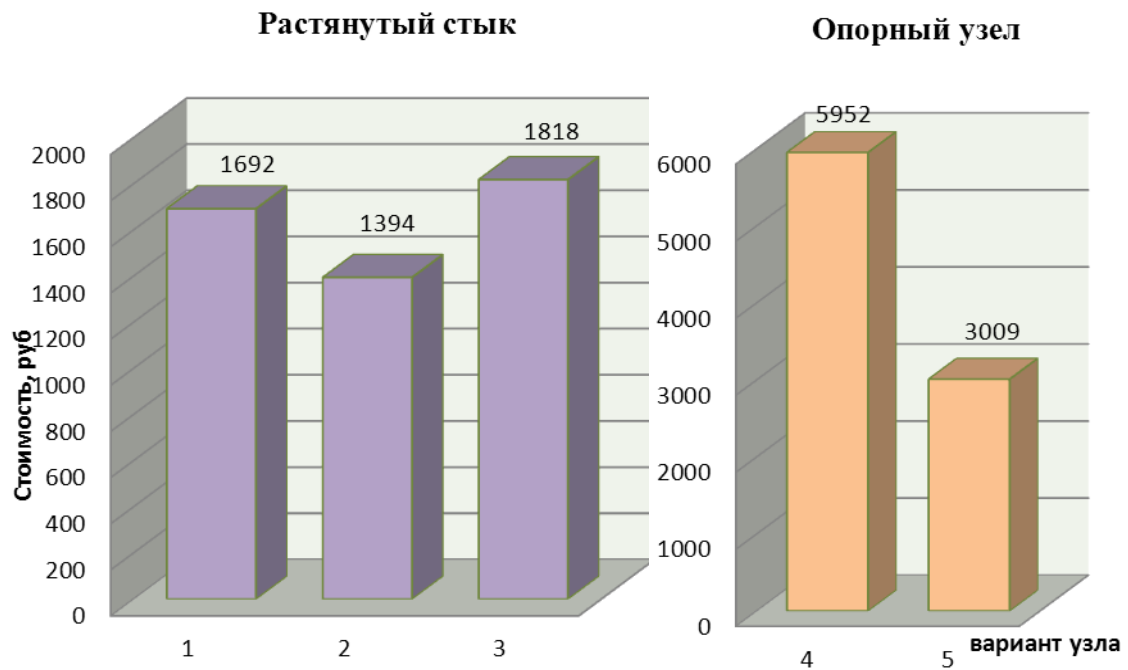


Рисунок 5.14 - Гистограмма распределения стоимости узлов (руб.) для фермы пролетом 12,0 м

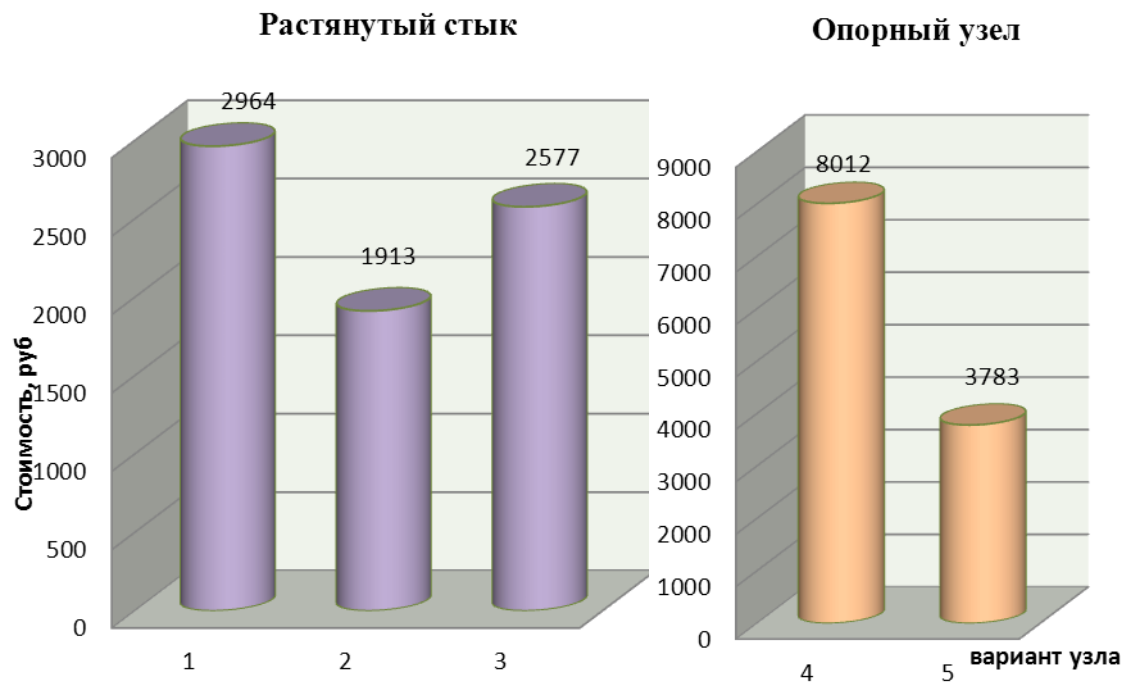


Рисунок 5.15 - Гистограмма распределения стоимости узлов (руб.) для фермы пролетом 18,0 м



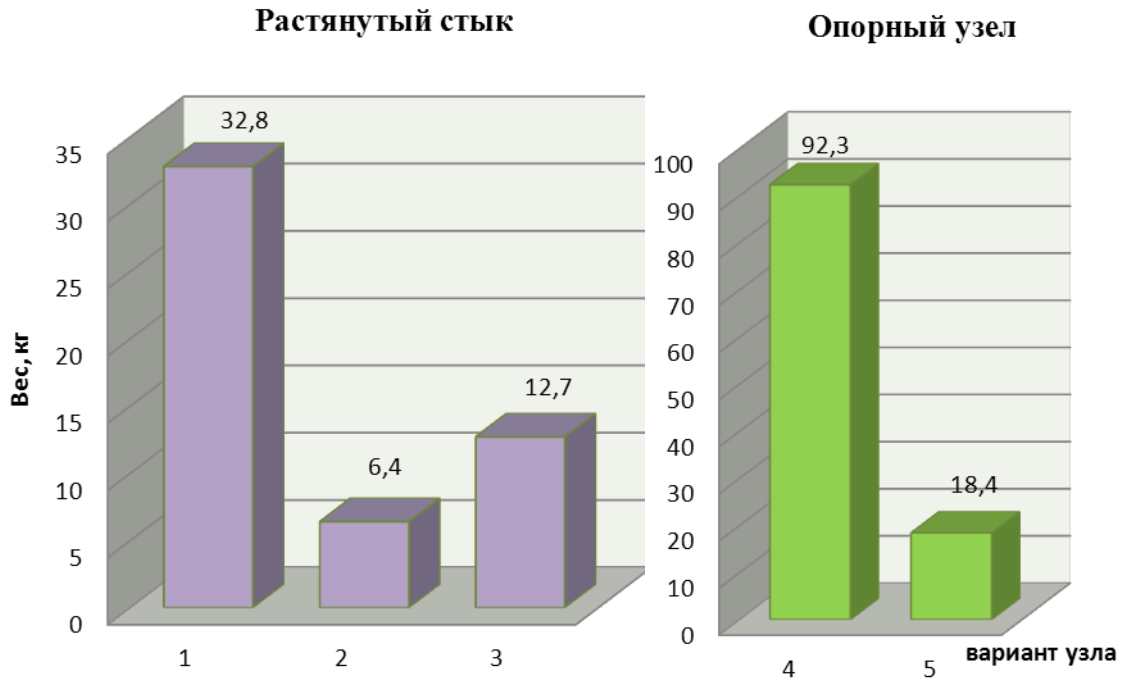


Рисунок 5.14 - Гистограмма распределения веса узлов (кг.) для фермы пролетом 12,0 м

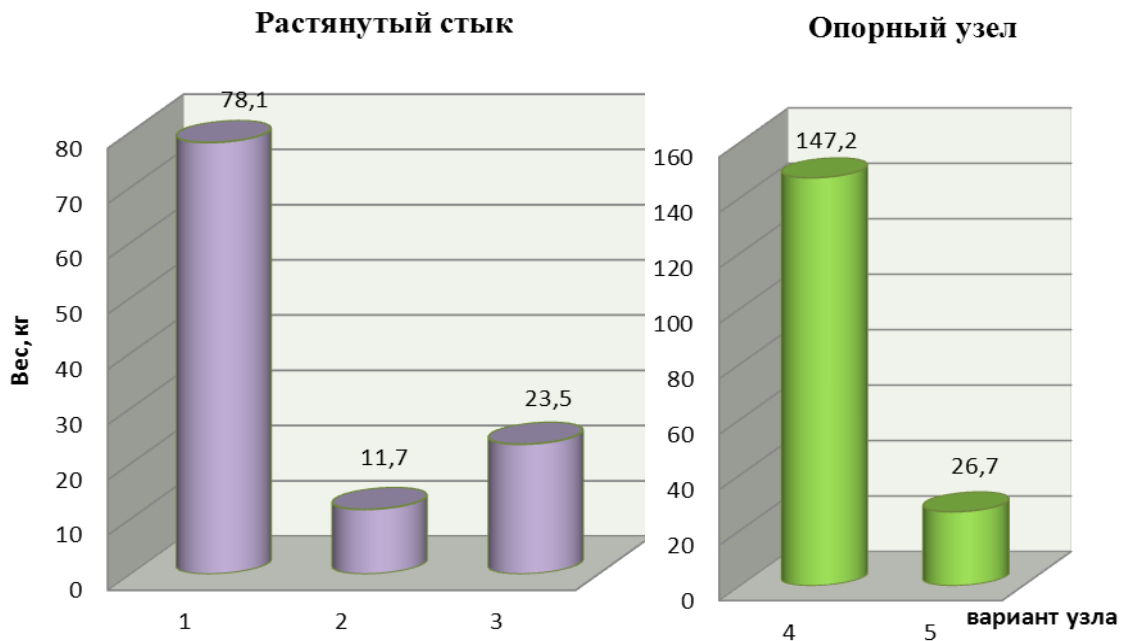


Рисунок 5.15 - Гистограмма распределения веса узлов (кг.) для фермы пролетом 18,0 м

Отметим, что наименьшую трудоемкость изготовления имеют растянутые стыки на стальных нагелях и деревянных накладках, что объясняется многолетней практикой применения этого типа соединения, наличием специальных кондукторов для высверливания отверстий в заранее собранных пакетах. В случае отладки промышленной технологии изготовления предлагаемых типов соединения на поточных линиях трудоемкость их изготовления может быть снижена, особенно в случае применения автоматизированных линий по фрезерованию пазов и нанесению клеевой композиции. С другой стороны, трудоемкость изготовления опорных узлов на клеенных стальных пластинах на 33 - 40% ниже в сравнении с узлами на стальных нагелях и натяжных хомутах за счет простоты конструкции узла и существенного уменьшения количества сборных узловых элементов. Этот факт свидетельствует о высоком потенциале предложенного способа соединения элементов деревянных конструкций.

Общий расход основных материалов на треугольные фермы покрытия, определенный по рабочим чертежам с учетом конструкций узлов ферм-аналогов / 126 / составил:

- для фермы пролетом 12,0 м с узлами на врубках, нагелях и натяжных хомутах (аналог) - древесина 1,05 м<sup>3</sup>, сталь - 210 кг;
- для фермы пролетом 12,0 м с узлами на клеенных пластинах и неразъемным стыком нижнего пояса - древесина 0,62 м<sup>3</sup>, сталь - 154 кг;
- для фермы пролетом 18,0 м с узлами на врубках, нагелях и натяжных хомутах (аналог) - древесина 2,39 м<sup>3</sup>, сталь - 520 кг;
- для фермы пролетом 18,0 м с узлами на клеенных пластинах и с разъемным стыком нижнего пояса - древесина 1,15 м<sup>3</sup>, сталь - 318 кг.

Приведенные данные доказывают технико-экономическую целесообразность применения при проектировании цельнодеревянных ферм покрытия узловых соединений на клеенных стальных пластинах. В сравнении с традиционными аналогами достигается сокращение древесины на 40-52 %, в том числе за счет исключения ослаблений верхнего и нижнего поясов врубками,

стали на 27-49 % при незначительном дополнительном расходе клеевой композиции в виде эпоксидной смолы ЭД-20. Не вызывает сомнения тот факт, что при применении соединений на клеенных стальных пластинах в других типах деревянных конструкций будет также получен соответствующий технико-экономический эффект.

### **5.5 Выводы по пятой главе**

1. С использованием результатов экспериментально-теоретических исследований разработаны рекомендации по конструированию, расчету и изготовлению узловых соединений элементов деревянных конструкций разъемного и неразъемного типа на клеенных в древесину стальных пластинах.

2. Предложенная инженерная методика расчета позволяет инженеру-проектировщику обоснованно назначать размеры поперечных сечений расчетных соединительных элементов, анализировать полученные результаты, например, при численных расчетах или вариантном проектировании.

3. Проведенный сравнительный технико-экономический анализ подтвердил целесообразность применения в соединениях деревянных конструкций клеенных стальных пластин, при этом достигается снижение трудоемкости изготовления на 24-28 %, стоимости материалов на 39-57 %, общего веса конструкций на 36-48 % в зависимости от типа проектируемых конструкций и действующих усилий в сравнении с известными аналогами.

В ценах III квартала 2015 года сокращение стоимости в сравнении с аналогом на каждую стропильную ферму пролетом 12,0 м составляет 10680 рублей или 296,6 руб/м<sup>2</sup>, на стропильную ферму пролетом 18,0 м - 29600 рублей или 548,1 руб/м<sup>2</sup>.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Итоги выполненного исследования

1. Разработан новый способ узлового соединения деревянных элементов при помощи вклеенных стальных пластин, отличающийся от известных аналогов простотой изготовления, сниженной материалоемкостью, повышенной жесткостью и прочностью. По результатам разработок подано две заявки на изобретения в Роспатент РФ.

2. Аналитическими и численными методами доказана возможность применения вклеенных стальных пластин в соединениях элементов деревянных конструкций. Впервые получено аналитическое решение задачи по определению напряженно-деформированного состояния разработанного соединения при выдергивании вклеенной пластины из массива древесины. Получен идентичный характер распределения напряжений и деформаций в соединении при расчете аналитическим и численными методами, что позволяет рекомендовать выполнять практические расчеты предложенного класса соединений в программных комплексах на основе метода конечных элементов. Значения основных компонентов НДС в деревянном бруске, клеевом слое и стальной пластине, подсчитанные в программных комплексах APMCivilEngineering и ANSYS, совпали с точностью до 1,5 %, что доказало корректность построенных конечно-элементных моделей.

3. Анализ напряженно-деформированного состояния клеевого соединения стальных пластин с древесиной, выполненный на базе проведенных численных исследований и экспериментов с применением факторного анализа и ступенчатого регрессивного метода, позволил установить степень влияния на прочность соединения длины клейки, ширины и толщины пластины, способа механической обработки ее поверхности, а также безопасные расстояния между осями пластин в направлении поперек волокон, исключая раскалывание и скалывание деревянного элемента при выдергивании вклеенной пластины.

4. В результате проведенных экспериментальных исследований разрабо-

танных вариантов соединений деревянных элементов с применением стальных клеенных пластин выявлены:

– удовлетворительная сходимость результатов экспериментальных, аналитических и численных исследований, что подтверждает адекватность разработанных конечно-элементных моделей соединений;

– необходимость учета соответствующими коэффициентами неравномерного распределения напряжений по длине клеенной пластины и усилия между параллельно работающими пластинами.

5. На основе результатов экспериментально-теоретических исследований при действии кратковременных и длительных нагрузок усовершенствована методика расчета и разработаны рекомендации по конструированию и расчету соединений на стальных клеенных пластинах. Достоверность основных положений методики и рекомендаций базируется на достаточном объеме экспериментальных данных, полученных с использованием современных измерительных приборов, испытательных машин и оснастки; на рациональной методике планирования экспериментов, позволившей получить более полные по количественным и качественным параметрам результаты исследований.

6. Проведенный сравнительный технико-экономический анализ подтвердил целесообразность применения в соединениях деревянных конструкций клеенных стальных пластин, при этом достигается снижение трудоемкости изготовления на 24-28%, стоимости материалов на 39-57%, общего веса конструкций на 36-48% в зависимости от типа проектируемых конструкций и действующих усилий в сравнении с известными аналогами.

### **Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы**

Полученные теоретические и экспериментальные результаты позволяют сформулировать перспективы дальнейшей разработки темы диссертации:

- установление фактического влияния температурно-влажностных факторов на прочность и жесткость узловых соединений деревянных элементов на клеенных стальных пластинах;

- совершенствование технологии заводского изготовления предложенного типа стыков;
- исследование особенностей напряженно-деформированного состояния узлов на клеенных стальных пластинах при их работе на изгиб, сжатие с изгибом и растяжение с изгибом;
- разработка унифицированной номенклатуры узловых соединений на основе клеенных стальных пластин для различных типов деревянных конструкций, в том числе пространственных.

## Список литературы

1. Абрамян Б.Л. Об одной контактной задаче для полуплоскости // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1972. – №5. – С. 4-10.
2. Адамович А.Г. Температурно-временная зависимость прочности эпоксидной смолы // Механика полимеров. – 1978. – Л 5. – С. 920-322.
3. Адгезия, клей, цемент, припой / Под ред. Н. Дебройна, Р. Гувикка. – М.: Мир, 1954. – 584 с.
4. Александров А.Д., Зиновьев Б.М. Один метод расчета армированных тел // Механика деформируемого твердого тела и расчет сооружений: Сб. науч. тр. / Новосиб. ин-т инженеров ж-д транспорта. – 1972. – Вып. 157. – С. 79-104.
5. Александров А.Я., Зиновьев Б.М. Приближенный метод решения плоских и пространственных задач теории упругости для тел с армирующими элементами и разрезами // Механика деформируемых тел и конструкций. – М., – 1975. – С. 15-25.
6. Артюхин Ю.П. Напряжения в клеевых соединениях // Исследование по теории пластин и оболочек. – Казань, 1973. – С. 3-27.
7. Ашкенази Е.К., Боксберг И.П., Рубенштейн Г.М., Туроверов К.К. Анизотропия механических свойств древесины и фанеры. – М.-Л.: Гослесбумиздат, 1958. – 138 с.
8. Бойтемиров Ф.А., Зубарев Г.Н., Головина В.М. Испытание деревянной арки с соединениями на клеенных стержнях // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1983. – №126.
9. Бондин В.Ф., Евдокимов Б.И. Расчет прочности на выдергивание стальных стержней, клеенных в древесину // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. – 1974. – №7. – С. 32-37.
10. Бондин В.Ф., Ардеев В.Н. Определение усилий и деформаций в деревянных балках, армированных на части длины // Облегченные конструкции покрытий зданий: Сб. науч. тр. / Ростовский инж.-строит. ин-т. – 1981. – С. 173-178.

11. Бондин В.Ф., Вылегжанин Ю.Б. О прочности на сдвиг клеевых соединений стальных стержней с древесиной // Изв. вузов Стр-во и архитектура. – 1976. – №11. – С. 20-25.
12. Бондин В.Ф., Вылегжанин Ю.Б. О расчете клеевых соединений стальных стержней с древесиной в сборных узлах и укрупнительных стыках клеенных деревянных конструкций // Строительные конструкции и архитектура: Тр. / Краснояр. политехн. ин-т. – 1975. – Вып.3. – С. 36-38.
13. Вдовин, В.М. Вклеенные металлические шайбы в соединениях деревянных конструкций: моногр. / В.М. Вдовин, М.В. Арискин, Д.Д. Дудорова. – Пенза: ПГУАС, 2012. – 184 с.
14. Вдовин, В.М. Экспериментальные исследования жёстких узлов балочных структур из клеёных деревянных элементов / В.М. Вдовин, Д.Д. Ишмаева // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – №2. – С. 130-137.
15. Власов, В. В. Метод начальных функций в задачах теории упругости и строительной механики // В. В. Власов. – М.: Стройиздат, 1975. – С. 223.
16. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. – М.: Финансы и статистика. – 1981. – 263 с.
17. Ву Ба Кiem. Исследование прочностных и деформационных свойств эпоксидных клеев и клеевых соединений на их основе: Автореф. дис...канд. техн. наук. – М., 1989. – 15 с.
18. Вуба К.Т. Температурные напряжения в клеевых соединениях разнородных материалов // Изв.вузов. Стр-во и архитектура. – 1973. – №10. – С. 27-30.
19. Вылегжанин Ю.Б. Исследование работы соединений на клеенных в древесину стальных стержнях: Автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 1980. – 18с.
20. Вылегжанин Ю.Б. О деформативности деревянных армированных балок под длительно действующей нагрузкой // Армирование деревянных конструкций. – Уфа, 1976. – С. 34-35.



21. М.М. Гаппоев, И.М. Гуськов, Л.К. Ермоленко, В.И. Линьков, Е.Т. Серова, Б.А. Степанов, Э.В. Филимонов. Конструкции из дерева и пластмасс. Учебник. – М: Издательство АСВ, 2004. – 440 с.
22. Горбунов А.И, Неразрушающие методы контроля клеевых соединений строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1975. – 172 с.
23. Громацкий В.А., Зотова И.М., Турковский С.Б. Составные клееные деревянные элементы с наклонно вклеенными металлическими связями. – Экспресс-информация, Строительство и архитектура, Серия II, Строительные конструкции, – М., 1983. – вып.10.
24. Губенко А.Б. Клееные деревянные конструкции в строительстве. – М.: Госстройиздат, 1957.
25. Дмитриев П.А., Бондин В.Ф. Основные положения по проектированию несущих и ограждающих конструкций деревянных каркасных зданий / Новосиб. инж.-строит. ин-т им. В.В. Куйбышева. – Новосибирск, 1980. – 80 с.
26. Дмитриев П.А. Исследование клефанерных рам со сборными узлами / Дмитриев П.А., Бондин В.Ф., Добрынин Ю.А., Сипаренко В.Г. // Изв.вузов. Стр-во и архитектура. – 1975. – №3. – С. 23-25.
27. Добрынин Ю.А., Полуэктов В.А. Исследование клефанерных рам с армированными узлами // Строительные конструкции и архитектура: Тр. / Краснояр. политехн. ин-т. – 1974. – Вып.2. – С. 3-11.
28. Жилкин В.А., Борыняк Л.А. Экспериментальное определение функций перемещений точек деревянной поверхности при выдергивании из нее стального стержня // Изв.вузов. Стр-во и архитектура, – 1979. – №5. – С. 135-136.
29. Замрий А.А. Проектирование и расчет методом конечных элементов в среде APM Structure3D. – М.: Издательство АПМ, 2010. – 376 с.
30. Зенкевич О. Метод конечных элементов. – М.: Мир, 1975. – 541 с.
31. Золотов М.С. Исследование напряженно-деформированного состояния анкерного соединения на эпоксидном клее: Автореф. дис... канд.техн.наук. – Харьков, 1971. – 20 с.

32. Зубарев Г.Н., Бойтемироров Ф.А., Головина В.М. Испытание деревянной арки с соединениями на клеенных стержнях. – Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1983. – №12.
33. Зубарев Г.Н., Логинова М.П., Головина В.М. Испытание и расчет соединений деревянных конструкций: Сб. науч. тр. / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – М., 1981. – С. 83-92.
34. Иванов В.Ф., Мальцев Л. Н. Исследование работы нагельных соединений в пределах упругости // Труды Ленинградского института инженеров коммунального строительства, – Л.-М., 1939. – вып.6. – С. 73-112.
35. Иванов Ю.М. Длительная несущая способность деревянных конструкций // Изв.вузов. Стр-во и архитектура. – 1972. – №11. – С. 6-12.
36. Иванов Ю.М., Линьков И.М., Соротокин В. М. Исследование влияния армирования на прочность и жесткость деревянных изгибаемых элементов // Разработка и исследование клеенных деревянных и фанерных армированных конструкций: Тр. / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. – М., 1972. – Вып.24. – С.13-30.
37. Инструкция по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений: СН 503-78: Утв. Гос. ком. СССР до делам строительства 13.12.78. Ввод в действие 01.01.79. – Изд. офиц. – М.: Стройиздат, 1979. – 65 с.
38. Калугин А.В. Клееные деревянные конструкции в современном строительстве // Промышленное и гражданское строительство. Труды Пермского государственного технического института. – М., 2011. – №7(ч.2). – С.32-37.
39. Карлсен Г.Г., Большаков В.В. И др. Деревянные конструкции. / Под ред. Г.Г. Карлсена, 3-е изд, перераб. и допол. – М., Госстройиздат, 1961. – 644 с.

40. Касабьян Л.В., Шенгелия А.К. Конструкция клеештыревого соединения сжато-изгибаемых деревянных элементов на муфтах // Стр-во и архитектура. Сер.8. Строит. конструкции: Экспресс-информ. (Отеч. и зарубеж. опыт) /ЦИНИС Госстроя СССР. – 1979. – Вып.9. – С. 19-22.
41. Квасников Е.Н. Вопросы длительного сопротивления древесины. – Л.: Стройиздат, 1972. – 95 с.
42. Коваленко М. Д., Меньшова И. В. Аналитические решения двумерных краевых задач теории упругости в конечных областях с угловыми точками границы // Чебоксары: изд-во Чуваш. гос. пед. ун-та, 2014. – 123 с.
43. Коваленко М.Д. О преобразовании Бореля в классе  $W$ -квазицелых функций // Фундаментальная и прикладная математика. 2001. – т.7. №3. – С. 761-774.
44. Коваленко М.Д., Шибырин С.В. Полуполоса под действием сосредоточенной силы. Точное решение // Доклады РАН, – т. 356, №6. – С. 763-765.
45. Ковальчук Л.М. Склеивание древесных материалов с пластмассами и металлами. – М.: Лесная промышленность, 1968. – 239 с.
46. Ковальчук Л.М. Технология склеивания. – М.: Лесная промышленность, 1973. – 208 с.
47. Колпаков С.В., Грохотов В.Н. Определение оптимального процента армирования и границ экономической эффективности применения армированных деревянных конструкций // Изв.вузов. Стр-во и архитектура. – 1978. – №2. – С. 25-29.
48. Коробейник Ю.Ф. Представляющие системы // УМН. 1981. – т.36. вып.1. – С. 73-126.
49. Коченов В.М. Несущая способность элементов соединений деревянных конструкций. – М.: Госстройиздат, 1953. – 320 с.
50. Конструкции из дерева и пластмасс / ГГ. Карлсен, Ю.В. Слицкоухов; под общ.ред. Г.Г. Карлсена, Ю.В. Слицкоухова. – М.: Стройиздат, 1986. – 543 с.

51. Лабудин, Б.В. Влияние статико-геометрических параметров на материалоемкость пространственных деревянных конструкций / Б.В. Лабудин, А.В. Вешняков // Проблемы развития строительного комплекса в условиях становления рыночных отношений: тр. междунауч.-техн. конф. 26-27 июня 1997 г. – Архангельск, 1997. – С. 32-34.
52. Леонтьев Н.Л. Статистическая обработка результатов наблюдений. – М.-Л.: Гослесбумиздат, 1952. – 104 с.
53. Леонтьев А.Ф. Ряды экспонент. – М.: Наука. – 1976. – 536 с.
54. Леонтьев Н.Л. Техника статистических вычислений. – М.: Лесная промышленность, 1966. – 250 с.
55. Леняшин А.В. Расчет нагельных сопряжений // Сборник статей и аннотаций по деревянным конструкциям. – М.-Л.: Госстройиздат, 1934. – С. 52-61.
56. Ли В.Д. Влияние температурно-влажностных условий среды на работу деревянных армированных балок: Автореф. дис... канд. техн. наук, – Новосибирск, 1981. – 18 с.
57. Линьков И.М., Соротокин В.М. Сцепление арматуры с древесиной при склеивании эпоксидно-цементным клеем // Изв.ву-зов. Стр-во и архитектура. – 1969. – №10. – С. 30-34.
58. Лихтарников Я.М., Летников Н.С., Левченко В.Н, Техно-экономические основы проектирования строительных конструкций.- Киев-Донецк: Вища школа. – 1980. – С. 197-199.
59. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул: Учеб. пособие. – М.: Высшая школа, 1982. – 224 с.
60. Малмейстер А.К., Тамуж В.П., Тетерс Г.А. Сопротивление полимерных и композитных материалов.– Рига, Зинатне, 1980. – 571 с.
61. Махматкулов Т. Опорные узлы клеенных деревянных колонн, жестко соединенных с фундаментами: Автореферат диссертации канд.техн.наук. – Новосибирск, 1985. – С. 21.

62. Морозов, Е.М. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения / Е.М. Морозов, А.Ю. Муйземнек, А.С. Шадский. – М.: ЛЕНАНД, 2010. – 456 с.
63. Найчук А.Я., Чернолоз В.С., Иванюк А.Н. Численные исследования прочности деревянных балок со сквозными трещинами усиленных наклонно вклеенными стержнями // Сборник научных трудов. Ресурсосберегающие материалы, конструкции, здания и сооружения. Украина, Ровно, НУВХП, 2008. – Вып.16, часть 2. – С. 278-281.
64. Накашидзе Б.В. Влияние некоторых факторов на предел прочности армированного материала // Исследование мостовых конструкций: Сб.научн.тр. / Хабаровский политехнический институт, 1972. – С. 136-142.
65. Накашидзе Б.В. Распределение продольных напряжений в уровне контактного слоя арматуры и древесины // Исследование мостовых конструкций: Сб.научн.тр. / Хабаровский политехнический , 1972. – С. 40-43.
66. Николаи Б.Л. Теория расчета нагельных соединений в деревянных конструкциях. – Харьков, Гостехиздат, 1935. – 62 с.
67. Норкин С.П. Исследование работы клеевого соединения полиэфирных стеклопластиков // Исследование по конструкциям из древесины и пластмасс: Сборник научных трудов. / Московский инженерно-строительный институт. – 1968. – №60. – С. 73-83.
68. Овчинникова И.Г. Исследование клеенных деревянных ферм на вклеенных стержнях// Строительная механика и расчет сооружений. – 1981. – №4. – С. 70-83.
69. Овчинникова И.Г. Клееные деревянные конструкции с соединениями на вклеенных стальных стержнях // Эффективное использование древесины и древесных материалов в современном строительстве: тезисы докладов Всесоюзного совещания. – М.: 1980. – С. 189-192.

70. Овчинникова И.Г. Оценка напряженно-деформированного состояния клеенных в древесину стержней при выдергивании // Несущие деревянные конструкции: Сборник научных трудов / – М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 1981. – С. 25-28.
71. Овчинникова И.Г., Акатова Е.Н. Клееные деревянные фермы с соединением элементов на клеенных стержнях // Строительные конструкции: РЖ/1979. сер. 8. – №6. – С. 28-32.
72. Орлович Р.Б., Гиль З., Дмитриев П.А. Тенденции в развитии соединений деревянных конструкций в строительстве за рубежом // Известия ВУЗов. Строительство. 2004. – № 11. – С. 4-9.
73. Орлович Р.Б. Решение плоской контактной задачи для анизотропных тел методом конечных элементов // Конструкции из клеенной древесины и пластмасс. – Л. 1983. – С. 91-96.
74. Оспанова Ж.Н. Несущая способность и деформативность соединений элементов деревянных конструкций на клеенных стальных стержнях с учетом действия основных эксплуатационных факторов. Дисс. на соискание уч. ст. канд. техн. наук. – Москва, 1984.
75. Отрешко А. И. Деревянные конструкции. Справочник проектировщика.: Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, 1957. – 263 с.
76. Папкович П.Ф. Об одной форме решения плоской задачи теории упругости для прямоугольной полосы // Доклады АН СССР. 1940. – Т. 27. №4.
77. Патент 144669 Российская Федерация, МПК E04B 1/38. Жёсткий узел сопряжения элементов балочных конструкций на клеенных шайбах и стальных накладках / Вдовин, В.М., Ишмаева, Д.Д.; патентообладатель ФГБОУ ВПО ПГУАС – №2014103649/03; заявл. 03.02.2014; опубл. 27.08.2014. – Бюл.№24. – 2 с.
78. Пинайкин И.П. Работа стальных стержней, клеенных поперек волокон древесины, в узлах деревянных конструкций: автореф. дис. канд. тех. наук. – Новосибирск, 1988. – 15 с.

79. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления для вузов. – М.: Физматгиз, 1963. – 432 с.
80. Пособие по расчетным характеристикам клеевых соединений строительных конструкций / Под ред. Иванова Ю.М. – М.: Стройиздат, 1972. – С 57.
81. Поспелов Н.Д., Тумас Е.В. О новых клеештыревых стыках несущих элементов деревянных пролетных строений мостов. – Балашиха. Московской области.: СоюздорНИИ, 1970. – С. 43.
82. Пригоровский Н.И. Измерение напряжений и деформаций. – М.: – 1961. – 534 с.
83. Пуртов В.В. Легкие деревянные стропильные фермы с соединениями на стальных пластинах и дюбелях. Дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. – Новосибирск, НИСИ, 1988. – 279 с.
84. Рабинович А.Л. Введение в механику армированных полимеров. – М.: Наука. 1970. – С. 255.
85. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука. 1966. – С 752.
86. Рекомендации по защите деревянных конструкций, эксплуатируемых в складах минеральных удобрений. – М.: Стройиздат, 1981. – С. 42.
87. Рекомендации по испытанию соединений деревянных конструкций ЦНИИСК им. Кучеренко. – М.: Стройиздат, 1981. – С. 41.
88. Рекомендации по контролю качества клеевых соединений деревянных клеенных конструкций. – М.: Стройиздат, 1981. – С. 63.
89. Ржаницын А.Р. Теория ползучести. – М.: Стройиздат, 1968. – С. 416.
90. Ржаницын А.Р. Теория составных стержней строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1948. – 192 с.
91. Рожко П.П., Чеботарь. Исследование работы клеештыревых соединений // Исследование мостовых конструкций: Сборник научных трудов // Хабаровский политехнический институт, 1972. – С. 153-156.

92. Роличюс И.В., Кассиров В.П., Турковский С.Б. Исследование соединений растянутых элементов на наклонно-вклеенных и клееввинченных стержнях // Исследование зависимости прочности деревянных конструкций от технологии их изготовления. – М.: ЦНИИСК им. Кучеренко, 1982. – С. 171-176.
93. Руководство по обеспечению долговечности деревянных клеёных конструкций при воздействии на них микроклимата зданий различного назначения и атмосферных факторов. – М.: Стройиздат, 1981. – С. 96.
94. Руководство по проектированию клеёных деревянных конструкций. – М.: Стройиздат, 1977. – С. 189.
95. Рыбин Ю.И. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов. – СПб.: Наука, 2004. – 644 с.
96. Сарычев В.С. Эффективность применения железобетонных, металлических и деревянных конструкций. – М.: Стройиздат, 1977. – С. 223.
97. Снижение материалоемкости деревянных конструкций / Под редакцией Линькова Н.М. – М.: Стройиздат, 1974. – С. 98.
98. Соболев Ю.С. Древесина как конструкционный материал. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 246 с.
99. Современные проблемы совершенствования и развития металлических, деревянных, пластмассовых конструкций в строительстве и на транспорте. / Материалы III Международной научно-технической конференции. – Самара, 2005. – 270 с.
100. Современные строительные конструкции из металла, дерева и пластмасс. / Материалы 12 Международного симпозиума. – Одесса, 2007. – 288 с.
101. Соединение деревянных конструкций системы ЦНИИСК // Жилищное строительство, 2008. – №2. – С. 42-43.



102. Соротокин В.М., Шолохова А.Б., Фрейдин А.С. О прочности и деформативности клеевого соединения арматуры с древесиной // Разработка и исследование клеенных деревянных и фанерных армированных конструкций: Тр./ ЦНИИСК им. Кучеренко. – М. 1972. – Вып.24. – С. 40-46.
103. СП 64.13330.2011. Деревянные конструкции. Актуализированная версия СНиП II-25-80. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко – институт ОАО «НИЦ «Строительство». – М.: 2011. – 87 с.
104. Справочник по клеям и клеящим мастикам в строительстве / Фиговский О.Л., Козлов В.В., Шолохова А.Б. и др. – М.: Стройиздат, 1984. – С. 240.
105. Справочное руководство по древесине. Лаборатория лесных продуктов США. Пер. с англ. – М.: Лесная промышленность, 1979. – 544 с.
106. Степнов М.Н., Шаврин А.В. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. – М.: Машиностроение, 2005. – 399 с.
107. Стоянов В.В. Современные строительные конструкции из металла, дерева и пластмасс. – Одесса, ООО «Внешреклам-сервис», 2007. – 74 с.
108. Суменко М.А. Податливость наклонно клеенных связей составных деревянных балок / Строительный эксперт. №19/2004.
109. Сухарев И.П. Экспериментальные методы исследования деформаций и прочности. – М.: Машиностроение, 1987. – 212 с.
110. Турковский С.Б., Ломакин А.Д., Погорельцев А.А. Зависимость состояния клеенных деревянных конструкций от влажности окружающего воздуха // Промышленное и гражданское строительство. Труды института. – М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. 2012. – №3. – С. 30-32.

111. Турковский С.Б., Погорельцев А.А. Создание деревянных конструкций системы ЦНИИСК на основе наклонно вклеенных стержней // Промышленное и гражданское строительство. Труды института. – М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 2007. – №3. – С. 6-8.
112. Турковский С.Б., Погорельцев А.А., Преображенская И.П. Клееные деревянные конструкции с узлами на вклеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК). – М.: РИФ «Стройматериалы», 2013. – 308 с.
113. Турковский С.Б., Саяпин В.В. Исследование монтажных узловых соединений клеёных деревянных конструкций // Несущие деревянные конструкции: Сборник научных трудов / ЦНИИСК им. Кучеренко, – М., 1981. – С. 92-105.
114. Фрейдин А.С. Прочность и долговечность клеевых соединений. – М.: Химия, 1981. – С. 272.
115. Фрейдин А.С., Буба К.Т. Прогнозирование свойств клеевых соединений древесины. – М.: Лесная промышленность, 1980. – С. 224.
116. Фрейдин А.С., Осипова Ж.Н., Поветкин С.В. Выносливость соединений элементов деревянных конструкций на вклеенных арматурных стержнях // Строительство и архитектура. Сер. 8. Строительные конструкции: Экспресс-информ.: отечеств. произв. опыт. ВНИИС. – М.: 1985. Вып. 12. С. 5-11.
117. Халтурин Ю.В. Соединения элементов деревянных конструкций с передачей усилий стальным стержням, вклеенным поперек волокон: автореф. дис. канд. тех. наук. – Новосибирск, 1986. – 23 с.
118. Хрулев В.М. Прочность клеевых соединений. – М.: Стройиздат, 1973. – С. 81.
119. Хрулев В.М. Синтетические клеи и мастики. – М.: Высшая школа, 1970. – С. 368.
120. Цвигман Г.А. Расчет гвоздевых сопряжений // Сборник статей и аннотаций по деревянным конструкциям. – 1934. – С. 61-88.

121. Цепяев В.А., Колобов М.В. Коэффициент надежности соединений деревянных конструкций на металлических зубчатых пластинах // – Жилищное строительство, 2008. – №5. – С. 26-27.
122. Чепасов В.И. Базовые параметры в многопараметрических исследованиях // – Оренбург: 2013. – 226 с.
123. Четвериков С.С. Металлорежущие инструменты. – М.: Высшая школа, 1965. – С. 732.
124. Шевченко А.Е. Вклеенные нагели в соединениях элементов деревянных конструкций: Автореферат диссертации канд. техн. наук. – Киев, 1985. – С. 21.
125. Шенгелия А.К. Исследование клеештыревых соединений деревянных элементов // Несущие деревянные конструкции. – М.: 1981. – С. 60-70.
126. Шишкин В.Е. Примеры расчета конструкций из дерева и пластмасс: учебное пособие. – М.: Стройиздат, 1974. – 224 с.
127. Шмидт А.Б., Дмитриев П.А. Атлас строительных конструкций из клееной древесины и водостойкой фанеры: учеб. пособие. – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 291 с.
128. Чихаев Н.А. Деревянные конструкции. – М., 1947. – 54 с.
129. Щуко В.Ю., Щуко С.А. Оценка работы армированных деревянных балок во времени// Изв.вузов. Строительство и архитектура, 1969. – № 7. – С. 28-31.
130. Эффективные строительные конструкции: теория и практика // Материалы V Международной научно-технической конференции. – Пенза: 2006. – 245 с.
131. Ярцев В.П., Киселева О.А. Проектирование и испытание деревянных конструкций: Учебное пособие. – Тамбов: Изд-во Тамб. Гос. техн. ун-та, 2005. – 128 с.
132. Forest Products Journal. – 1977. – Vol. 28. №3. – S. 15-18.
133. Gustafsson P.J., Serrano E. Predicting the pull-out strength of glued-in rods. Proceedings of World Conference on Timber Engineering, Whistler Resort, Canada, July-August 2000.

134. Helifix. Stress Free Structural Solutions. London, 2001.
135. Helifix. Systemy naprawy i wzmocnienia konstrukcji murowych. Budosprzet. Bytom, 2001.
136. Katalog Simpson Strong-Tie. C-DK-2010/11. 180 s.
137. V.V. Meleshko. Selected topics in the history of two-dimensional biharmonic problem// Appl. Mech. Rev. 1. 2003. pp. 33-85.
138. Moers F. Anschluss mit eingeleimten gewindestaben // Bauen mit Holz, 1981. – Heft 4. – S. 228-231.
139. Mohler K., Hemmer K. Eingeleimte gewindestangen // Bauen mit Holz, 1981. – №5. – S. 296-298.
140. Mohler K., Hemmer K. Versuche mit eingeleimten gewindestagen / Forschungsbericht des Zehrstuhls für Ingenieurholzbau und Baukonstruktion. Universität Karlsruhe (TH), 1981.
141. Neue Holz- Verbindung. Bauen mit Holz, 4/2006.
142. Pfluger A. Über eine Interpretation gewisser Konvergenz – und Fortsetzungseigenschaften Dirichletscher Reihen // Comm. Math. Helv. 1935/36. – V. 8. № 89. – S. 89-129
143. Robert Majewski. Brutt technologies. Nowoczesna metoda naprawy Wzmacniania i stabilizacji uszkodzonych konstrukcji murowych niemieckiej firmy brutt saver. Czestochowa, Poland, 2007.
144. SPAX International GmbH & Co.Kg. Germany. Altenloh, Brinck & Co Sp. [Electronic resource]. - Access mode: <http://www.spax.com>.
145. Wood construction connectors. 2009-2010. [Electronic resource]. - Access mode: <http://www.who-sells-it.com>.
146. Zofia Gil. Analiza mozliwosci zastosowania pretow spiralnych do napraw konstrukcji drewnianyc. Rozprawa doktorska. Szczecin, 2007.
147. Zofia Gil. Zbrojenie elementów drewnianych za pomocą prętów spiralnych. VII Konferencja Naukowa: Drewno i materiały drewnopochodne w konstrukcjach budowlanych. Szczecin, 2006.

148. Arnovlevic. Das Verteilungsgesetz der Haftspannung Bei axial beanspruchten Ver Bundstäben Z.F. Arch. und Jng. – Wesen. Hannover. 55. (1909) – P. 413-418.
149. Bond D. Reinforced plywood beams. «Civ. Eng. and PWR» - 1965. – № 711. – P. 217.
150. Coland M., Reissner E. The stress in cemented jounts. Tr. ASME. v. 11. 1944. №1. – P. A-17.
151. Goodier J.H., Hsu C.S. Transmission of tension from a bar to plate. Trans. ASME Ser. E.J. Appl.Mech. – 1954. – vol.21. №2, – P. 147-150.
152. Lantos G. Test results on Midl Steel Reinforced Glulam Tumber Beams Reprint in Timber Technology – 1966. – v.11. №9. – P. 11.
153. Moers F. Anschlub mit eingeleimten Gewindestäben. Bausen mit Hols. – 1981. – №4. – P. 228-231.
154. Muki R., Sternberg E. Elastolatic load-transfer to half-space from a partially embedded axially loaded rod. Jnt. J. Solids Structures. – 1970. – vol. 6. – P. 69-90.
155. Reissner E. Note on the problem of the distribution of stress in a thin stiffened elastic sheet. Proc. Nat. Acad. Sci. (USA). – 1940. – vol. 26. №4. – P. 300-305.
156. Volkersen O. Die Nietkraftezteilungin zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenguschnitten. Luftfahztforchung. – 2955. – v. 15. – P. 41.
157. Volkersen O. Die Schubkraftverteilung in Leim Niet – und Bolzenverblindungen. Energetic und Technic. – 5 (1953). – Heft 3.5.7. – S. 68.
158. Программный комплекс CAD/CAE система APM WinMachine. Лицензионное соглашение № 24201 от 05.07.2011. ID 1782231818. 1 электрон. опт. диск (DVD – ROM).

**Публикации автора, на которые имеются ссылки в тексте диссертации**

159. Столповский Г.А., Жаданов В.И., Руднев И.В. Соединение элементов деревянных конструкций быстровозводимых зданий и сооружений винтовыми крестообразными нагелями // Вестник Оренбургского государственного университета. – Оренбург: 2011. – №5. – С. 150-154.
160. Руднев И.В., Жаданов В.И., Лисов С.В. Соединения элементов деревянных конструкций с применением клеенных стальных пластин // Известия высших учебных заведений. Строительство. Новосибирск: 2014. №4. С. 5 – 8.
161. Руднев И.В., Жаданов В.И. Методика расчета соединений элементов деревянных конструкций на клеенных стальных пластинах. // Вестник Оренбургского государственного университета. – Оренбург: 2014. – №5. – С. 5 – 14.
162. Руднев И.В., Жаданов В.И. Выдергивание стальных пластин, клеенных в древесину. Аналитический расчет и эксперимент // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – Чебоксары: 2015. – №2. – С. 9 – 14.
163. Руднев И.В., Жаданов В.И., Столповский Г.А. Применение клеенных стальных пластин в узлах деревянных конструкций // В сб.: Интеграции, партнерство и инновации в строительной науке и образовании. – М.: МГСУ, 2014. – С. 111-116.
164. Руднев, И.В., Столповский Г.А. Применение CAD/CAE систем в расчетах на прочность соединений элементов строительных конструкций [Электронный ресурс] // «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры»: материалы всерос. науч.-метод. конф., 3-8 февраля 2014 г. / Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2014. – С. 441-446 – ISBN 978-5-4417-0309-3.

165. Столповский Г.А., Руднев И.В., Муртазина Л.А. Применение Российских САПР в расчетах соединений элементов деревянных конструкций // 22-23 мая 2014г. – Архангельск: Изд-во ООО "Типография "ТОЧКА", 2014. – С. 378-383.
166. Столповский Г.А., Руднев И.В., Яричевский И.И. Моделирование соединений деревянных элементов на витых нагелях в системах автоматизированного проектирования / // Современные строительные конструкции из металла и древесины. – Одесса: ООО «Внешрекламсервис», 2014. – №4. – С. 248-254.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ**

### **Справки о внедрении результатов работы**





**МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА,  
ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО И  
ДОРОЖНОГО ХОЗЯЙСТВА  
ОРЕНБУРГСКОЙ ОБЛАСТИ**

Дом Советов, г.Оренбург, 460015  
 телефоны:..... (3532) 78-60-14, 77-69-43  
 телефакс:..... (3532) 77-29-99  
 телетайп:..... 144249 LIDER RU  
 e-mail:office06@gov.orb.ru; svv@mail.orb.ru  
[www.minstroyoren.ru](http://www.minstroyoren.ru)

Исполняющему обязанности  
 ректора ФГБОУ ВПО  
 «Оренбургский государственный  
 университет»

Ж.А. Ермаковой

19.10.2015 № 36/0208-1401

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Уважаемая Жанна Анатольевна!

В целях развития инновационных направлений в строительстве на территории Оренбургской области предусматривается расширение объемов ввода в эксплуатацию малоэтажных объектов гражданского и промышленного назначения. По имеющейся информации, на кафедре строительных конструкций Вашего университета ведется разработка новых конструкций на основе древесины и типов сопряжений их элементов.

Представляют особый интерес узловые соединения на клеенных стальных пластинах, разработку которых ведет инженер кафедры строительных конструкций Руднев Игорь Владимирович под руководством заведующего кафедрой, д.т.н., профессора Жаданова Виктора Ивановича.

Для рассмотрения вопроса внедрения разработанных узловых соединений в малоэтажном строительстве на территории региона (жилые дома, сельскохозяйственные здания и сооружения, объекты благоустройства российско-казахстанской границы) прошу Вас представить в минстрой области техническую документацию разработанных узловых соединений на клеенных стальных пластинах.

Исполняющий обязанности министра

О.П. Мищерякова



**КРАСНОЯРСК  
ГРАЖДАНПРОЕКТ**  
www.krasgp.ru

Акционерное общество «Территориальный градостроительный институт  
«Красноярскгражданпроект» (сокращенное наименование: АО «Гражданпроект»)  
660025, Российская Федерация, Красноярск, пр. Красноярский рабочий, 126  
тел.: +7 (391) 213-28-33, факс: +7 (391) 213-24-82, эл. почта: kgp@krasgp.ru

ОГРН 1052461048431, ИНН 246119562, КПП 246103001, расчет 40702810000400000164, Красноярский филиал ПАО АКБ «Связь-Банк» г. Красноярск, БИК 040407650, к/с 501018100000000000650

15.10.2015 № 3555-10/15

На \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### СПРАВКА

Настоящей справкой подтверждается, что при проектировании нашего объекта «Цех по производству деревянных конструкций» в п. Курагино Красноярского края, были использованы методика расчета и конструирования узловых соединений деревянных элементов на клеенных стальных пластинах, представленные инженером кафедры строительных конструкций Оренбургского государственного университета Рудневым И.В.

Узловые соединения деревянных элементов на клеенных пластинах, применяемые взамен традиционных соединительных элементов в виде стальных цилиндрических нагелей и деревянных накладок, позволили снизить общую стоимость проектируемых узлов здания на 42...57 % за счет уменьшения материалоемкости в 2,7...2,9 раза.

Строительство объекта планируется в третьем квартале 2016 года.

Первый заместитель директора

О.Н. Животов



Акционерное общество  
научно-производственное  
объединение проектный институт  
«Оренбурггражданпроект»  
(АО НПО ПИ «ОГП»)  
Россия, 460036, г. Оренбург,  
ул. Карагинская, д. 58/1  
Тел. (3532) 91-12-14,  
ОГРН 1155658017976  
ИНН 5612160930 КПП 561201001

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор АО НПО ПИ «ОГП»

Афуков А.В.



28 сентября 2015г.

### АКТ

об использовании результатов  
кандидатской диссертационной работы  
Руднева Игоря Владимировича

Комиссия в составе:

председателя Афукова А.В. – директор,  
члены комиссии:

Смирнов М.С. – главный инженер проекта (ГИП),

Ващенко Г.Г. – главный конструктор,

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Руднева И.В. «Узловые соединения деревянных элементов на клеенных стальных пластинах» использованы в проектах «Завод казенный ректификационный. Корпус производственный», «Флигель», «Реконструкция здания Администрации в селе Черный отрог» при разработке узлов деревянных конструкций в следующем виде:

- расчета усиливаемого растянутого стыка нижнего пояса фермы выполненного по предоставленной методике;
- конструктивного решения узла сопряжения затяжек со стропильными ногами и самих затяжек;
- разработанных практических рекомендации по конструированию и расчету новых узлов деревянных конструкций на клеенных стальных пластинах.

Результаты работы Руднева И.В. позволили снизить количество примененного прокатного металла, древесины на 37% и 25% соответственно, а также исключить применение дорогостоящих метизных изделий.

Председатель комиссии

Афуков А.В.

Члены комиссии:

Главный инженер проекта

Смирнов М.С.

Главный конструктор

Ващенко Г.Г.





Общество с ограниченной ответственностью  
Научно-производственное предприятие  
**«ПРОМТЕХНОЛОГИЯ»**

460018, г. Оренбург, ул. Терешковой, 22, офис 313  
Телефон: +7(3532) 91-33-38, 27-91-72, 92-37-71, +7(9123) 56-37-80; e-mail: [npp-promtech@mail.ru](mailto:npp-promtech@mail.ru)

Исх. № 033-10/15-НПП от «15» октября 2015 г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ООО НП  
«ПРОМТЕХНОЛОГИЯ»

А.А. Горюшкин

15 октября 2015 г.



АКТ

об использовании результатов диссертационной работы  
Руднева Игоря Владимировича

Комиссия в составе: председателя Горюшкина А.А. – директор, члены комиссии: Бахчиева Е.В. – главный инженер, Снопина Е.В. – архитектор, составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Руднева И.В. «Узловые соединения деревянных элементов на клеенных стальных пластинах» использованы в проектах «Пристрой к жилому многоквартирному дому в п. Весенний Оренбургского района» и «Реконструкция административного здания в х. Чулошников Оренбургского района» при разработке узловых сопряжений деревянных несущих и ограждающих конструкций в следующем виде:

1. Методика расчета соединений деревянных элементов на стальных клеенных пластинах при проектировании стропильной системы и фермы покрытия.
2. Экспериментальные данные по испытанию опорного узла фермы.
3. Рекомендации по конструированию и расчету узловых сопряжений на клеенных пластинах.

Использование указанных результатов позволяет: сократить расход металла при изготовлении конструкций на 42%, древесины – 30%; уменьшить трудоемкость изготовления узловых сопряжений в сравнении с типовыми решениями.

Председатель комиссии

А.А. Горюшкин

Члены комиссии:

Главный инженер

Е.В. Бахчиев

Архитектор

Е.В. Снопина



Система менеджмента качества ООО НП «ПРОМТЕХНОЛОГИЯ» (сертификат соответствия № А.СРТ.СС.140513.01-3859.04 от 13.05.2014 г.) при выполнении работ по инженерным изысканиям, подготовке проектной документации, строительству, реконструкции, капитальному ремонту, объектам капитального строительства, которые оказывают влияние на безопасность объектов капитального строительства, соответствует требованиям ГОСТ Р ИСО 9001-2011