

На правах рукописи



РУДНЕВ Игорь Владимирович

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

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пенза – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет»

- Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Жаданов Виктор Иванович
- Официальные оппоненты – **Инжутов Иван Семенович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВПО «Сибирский федеральный
университет», директор инженерно-
строительного института
- **Вдовин Вячеслав Михайлович**,
кандидат технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Пензенский государственный
университет архитектуры и строительства»,
профессор кафедры «Строительные
конструкции»
- Ведущая организация – **Филиал АО «НИЦ «Строительство» –
«Центральный научно-исследовательский
институт строительных конструкций
им. В. А. Кучеренко», г. Москва**

Защита состоится 28 января 2016 года в 13-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.184.01, созданного на базе Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Г. Титова, 28, корпус 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Пензенского государственного университета архитектуры и строительства и на сайте <http://dissovet.pguas.ru/index.php/contact-us/d-212-184-01/64-25-rudnev-igor-vladimirovich>.

Автореферат разослан 28 ноября 2015 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Бакушев
Сергей Васильевич

Актуальность темы исследования. Применение деревянных конструкций в покрытиях современных зданий общественного и производственного назначения (спортивные, выставочные и развлекательные залы, рынки, складские помещения), а также жилых зданий (мансардные этажи), основано на технологиях, совмещающих максимальное использование конструктивных элементов заводского изготовления с удобством их транспортировки и монтажа на строительной площадке. В этом случае вопросы изготовления эффективных соединений элементов деревянных конструкций приобретают первостепенное значение.

Для повышения жесткости и увеличения несущей способности соединений элементов деревянных конструкций в строительстве нашли применение конструктивные решения на клеенных в древесину стальных стержнях из арматуры периодического профиля. Особо широкое распространение получили различные типы соединений с наклонно клееными связями. Несмотря на надёжность таких соединений, они имеют в той или иной степени ряд недостатков с точки зрения металлоёмкости и технологичности изготовления. Устранение этих недостатков возможно за счет применения в узлах клеенных стальных пластин. Однако, известные нормативные методики расчета деревянных конструкций не дают ответа на вопрос об определении несущей способности и о правилах конструирования узловых соединений на клеенных стальных пластинах. Отсутствуют также какие-либо экспериментальные данные по этому вопросу. Вышеперечисленные факты предопределяют необходимость адекватной оценки напряженно-деформированного состояния узловых соединений с применением клеенных стальных пластин на базе дополнительных теоретических и экспериментальных исследований, что и определяет актуальность и новизну диссертации.

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. Леняшина, 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.

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»), МГСУ, СПбГАСУ, НГАСУ (Сибстрин), ВлГУ (г. Владимир), ИСИ 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.

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 большепролетные общественные и производственные здания различного назначения. Следует отметить, что в 1964 году в СоюздорНИИ совместно с ЦНИИСК была предпринята попытка клеить в древесину стальные пластины, но из-за плохой адгезии клея к поверхности стальной пластины эти попытки не принесли положительного результата. 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 геометрических и конструктивных параметров стальных клеенных пластин на работу узловых соединений элементов деревянных конструкций.

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, теории упругости 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 предложенных 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 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 результатов. Результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на 67, 69, 71 научно-технических конференциях НГАСУ (Сибстрин), г. Новосибирск, 2010, 2012, 2014 г.; Всероссийских научно-методических конференциях ОГУ, г. Оренбург, 2013, 2014, 2015 г.; Международной научно-практической конференции «Строительная наука 2014: теория, образование, практика, инновации», г. Архангельск, 2014 г.; Международной научно-практической конференции «Интеграции, партнерство и инновации в строительной науке и образовании», МГСУ, г. Москва, 2014 г.; Международной научно-технической конференции «Деревянные конструкции: разработка, исследование, применение», НИЦ «Строительство», г. Москва, 2015 г.; Международной научно-практической конференции «Деревянное домостроение Сибири 2030», г. Красноярск, 2015 г.; Международных научно-технических конференциях «Инновации в строительстве: теория и практика», г. Оренбург, 2013, 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 по запросу переданы для внедрения Министерству строительства, жилищно-коммунального и дорожного хозяйства Оренбургской области;
- рабочие чертежи разработанных узлов переданы по запросам в строительные организации и проектные институты: ЗАО «Оренбурггражданпроект», ООО НПП «Промтехнология» (г. Оренбург), ОАО «Красноярсгражданпроект»;
- материалы исследований включены в разделы специального курса «Индустриальные деревянные конструкции», которые читаются студентам профилей ПГС и ГСХ ОГУ (г. Оренбург) и ИСИ СФУ (г. Красноярск).

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

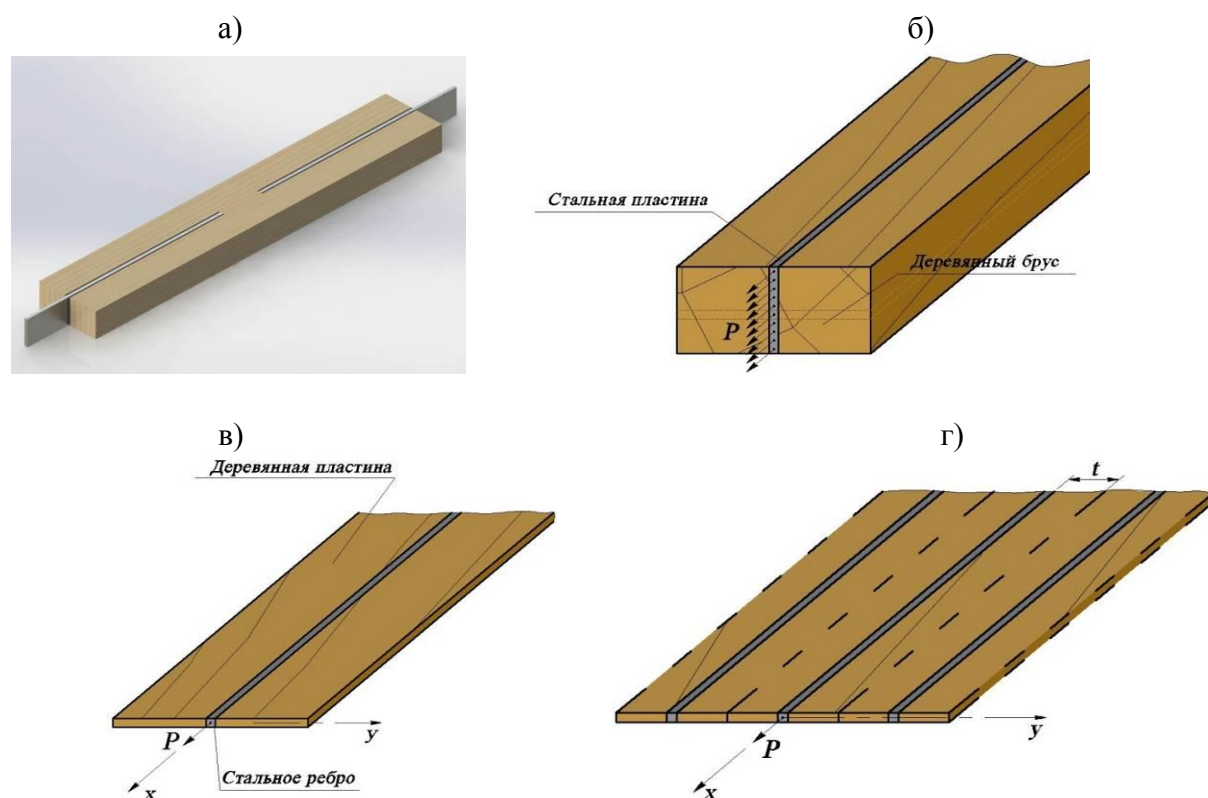
Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 166 наименований и приложения. Общий объем работы – 176 страниц, в том числе 108 рисунков, 5 таблиц, 5 страниц приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе дан обзор работ, соответствующих теме диссертации, проанализированы известные типы соединений на механических связях и клеенных элементах, разработанные отечественными и зарубежными учеными. Отмечено, что известные конструктивные решения узловых сопряжений элементов деревянных конструкций на клеенных связях не лишены ряда серьезных недостатков. На основе критического анализа широкого круга рассматриваемого класса соединений и проведенных пилотных экспериментов определены пути их совершенствования, конкретизирована цель и задачи исследований.

Теоретическому обоснованию возможности применения клеенных стальных пластин в соединениях элементов деревянных конструкций на основе определения и анализа напряженно-деформированного состояния аналитическими и численными методами посвящена вторая глава диссертации.

Точное аналитическое решение задачи по определению НДС соединения клеенной пластины при ее выдергивании из массива древесины (рис. 1а) в трехмерной постановке на сегодняшний день отсутствует. Для решения этой задачи из реальной трехмерной конструкции (рис. 1б) вырежем двумя параллельными горизонтальными плоскостями пласт соединения единичной толщины (рис. 1в), полагая, что в нем реализуется плоская деформация, и рассмотрим более простую периодическую задачу (рис. 1г), в которой интересующая нас область расположена



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

Рис. 1 Общий вид и расчетные схемы задач на выдергивание клеенной пластины из бруса

между штрихпунктирными 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.

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.

При решении рассмотрена полуполоса, у которой продольные стороны периодически подкреплены ребрами жесткости, работающими только на растяжение-сжатие и не воспринимающими изгибных нагрузок (рис. 1г).

Из условия равновесия элемента ребра на основании закона Гука получим следующее дифференциальное уравнение:

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

$$\text{Граничные условия при } x=0 \text{ определяются как: } V(x, \pm 1) = 0. \quad (2)$$

Для построения решения краевой задачи применен метод начальных функций, который позволяет получать выражения для функций Фадля-Папковича. Основные соотношения метода начальных функций имеют вид:

$$\begin{aligned} U(x, y) &= L_{UU}(y)U_0(x) + L_{UV}(y)V_0(x) + L_{UY}(y)Y_0(x) + L_{UX}(y)X_0(x), \\ V(x, y) &= L_{VU}(y)U_0(x) + L_{VV}(y)V_0(x) + L_{VY}(y)Y_0(x) + L_{VX}(y)X_0(x), \\ \sigma_x(x, y) &= A_U(y)U_0(x) + A_V(y)V_0(x) + A_Y(y)Y_0(x) + A_X(y)X_0(x), \\ Y(x, y) &= L_{YU}(y)U_0(x) + L_{YV}(y)V_0(x) + L_{YY}(y)Y_0(x) + L_{YX}(y)X_0(x), \\ X(x, y) &= L_{XU}(y)U_0(x) + L_{XV}(y)V_0(x) + L_{XY}(y)Y_0(x) + L_{XX}(y)X_0(x). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $L_{UU}(y)$ и т.д. – известные дифференциальные операторы метода начальных функций. В результате решения получены формулы для перемещений и напряжений:

$$\begin{aligned} U(x, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} a_k U(\lambda_k, y) e^{\lambda_k x} + \bar{a}_k U(\bar{\lambda}_k, y) e^{\bar{\lambda}_k x} \\ V(x, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} a_k V(\lambda_k, y) e^{\lambda_k x} + \bar{a}_k V(\bar{\lambda}_k, y) e^{\bar{\lambda}_k x} \\ \sigma_x(x, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} a_k \sigma_x(\lambda_k, y) e^{\lambda_k x} + \bar{a}_k \sigma_x(\bar{\lambda}_k, y) e^{\bar{\lambda}_k x} \\ \tau_{xy}(x, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} a_k \tau_{xy}(\lambda_k, y) e^{\lambda_k x} + \bar{a}_k \tau_{xy}(\bar{\lambda}_k, y) e^{\bar{\lambda}_k x}. \end{aligned} \quad (4)$$

В этих формулах функции Фадля-Папковича $U(\lambda_k, y)$, $V(\lambda_k, y)$ и др. имеют вид:

$$\begin{aligned}
 U(\lambda_k, y) &= \left(\frac{1+\nu}{4} \cos \lambda_k + \frac{\nu-3}{4\lambda_k} \sin \lambda_k \right) \cos \lambda_k y + \frac{1+\nu}{4} y \sin \lambda_k \sin \lambda_k y, \\
 V(\lambda_k, y) &= \frac{1+\nu}{4} (-\cos \lambda_k \sin \lambda_k y + y \sin \lambda_k \cos \lambda_k y), \\
 \sigma_x(\lambda_k, y) &= \left(\frac{1+\nu}{2} \lambda_k \cos \lambda_k - \frac{3+\nu}{2} \sin \lambda_k \right) \cos \lambda_k y + \frac{1+\nu}{2} \lambda_k y \sin \lambda_k \sin \lambda_k y, \\
 \sigma_y(\lambda_k, y) &= \left(\frac{1-\nu}{2} \sin \lambda_k - \frac{1+\nu}{2} \lambda_k \cos \lambda_k \right) \cos \lambda_k y - \frac{1+\nu}{2} \lambda_k y \sin \lambda_k \sin \lambda_k y, \\
 \tau_{xy}(\lambda_k, y) &= \left(\sin \lambda_k - \frac{1+\nu}{2} \lambda_k \cos \lambda_k \right) \sin \lambda_k y + \frac{1+\nu}{2} \lambda_k y \sin \lambda_k \cos \lambda_k y.
 \end{aligned} \tag{5}$$

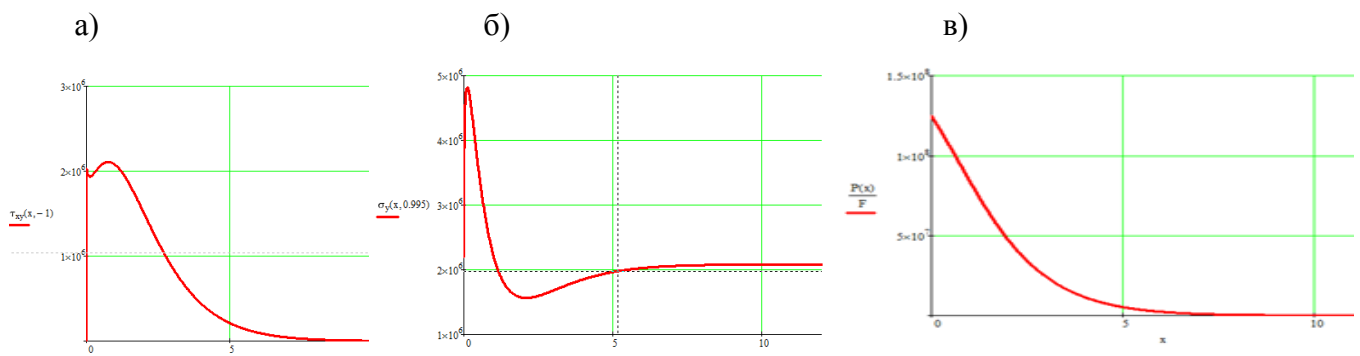
Удовлетворяя с помощью выражений (5) граничным условиям, заданным на торце полуполосы, приходим к задаче определения a_k , $\overline{a_k}$ из разложений по функциям Фадля-Папковича. Они находятся с помощью биортогональных (к функциям Фадля-Папковича) систем функций. После построения биортогональных систем функций, решая рассматриваемую краевую задачу для того случая, когда на торце полуполосы к концам ребер жесткости приложены сосредоточенные силы, найдем коэффициенты a_k , $\overline{a_k}$ и получим следующие формулы для определения напряжений и перемещений:

$$\begin{aligned}
 \sigma_x(x, y) &= \frac{sx(\lambda_1, y) \cdot e^{a_1 \cdot x}}{M_1} \cdot \sigma_1 \cdot (1 - a_1 \cdot x) - \sum_{k=2}^n \left(2 \cdot \operatorname{Re} \left(\frac{sx(\lambda_k, y)}{M_k} \cdot \sigma_k \cdot \frac{\operatorname{Im}(\overline{\lambda_k} \cdot e^{\lambda_k x})}{\operatorname{Im}(\lambda_k)} \right) \right) + C \\
 \sigma_y(x, y) &= \frac{-sx(\lambda_1, y) \cdot e^{a_1 \cdot x} \cdot [\sigma_1 \cdot (\lambda_1)^2 \cdot (1 + a_1 \cdot x)]}{M_1 \cdot (\lambda_1)^2} - \sum_{k=2}^n \left[2 \cdot \operatorname{Re} \left[\frac{sy(\lambda_k, y)}{M_k \cdot (\lambda_k)^2} \cdot (\overline{\lambda_k} \cdot \lambda_k) \cdot \sigma_k \cdot \frac{\operatorname{Im}(\lambda_k \cdot e^{\lambda_k x})}{\operatorname{Im}(\lambda_k)} \right] \right] + C \cdot \nu \\
 \tau_{xy}(x, y) &= \frac{-txy(\lambda_1, y) \cdot e^{a_1 \cdot x}}{M_1 \cdot \lambda_1} \cdot \sigma_1 \cdot (\lambda_1)^2 \cdot x - \sum_{k=2}^n \left[2 \cdot \operatorname{Re} \left[\frac{txy(\lambda_k, y)}{M_k \cdot \lambda_k} \cdot (\overline{\lambda_k} \cdot \lambda_k) \cdot \sigma_k \cdot \frac{\operatorname{Im}(e^{\lambda_k x})}{\operatorname{Im}(\lambda_k)} \right] \right] \\
 u(x, y) &= \frac{\xi(\lambda_1, y) \cdot e^{a_1 \cdot x}}{M_1 \cdot \lambda_1} \cdot \sigma_1 \cdot (a_1) \cdot (1 + a_1 \cdot x) + \sum_{k=2}^n \left(2 \cdot \operatorname{Re} \left(\frac{\xi(\lambda_k, y)}{M_k \cdot \lambda_k} \cdot \overline{\lambda_k} \cdot \sigma_k \cdot \frac{\operatorname{Im}(\overline{\lambda_k} \cdot e^{\lambda_k x})}{\operatorname{Im}(\lambda_k)} \right) \right) + \frac{1-\nu}{2} C \cdot x \\
 v(x, y) &= \frac{\chi(\lambda_1, y) \cdot e^{a_1 \cdot x}}{M_1} \cdot \sigma_1 \cdot (-1 + a_1 \cdot x) + \sum_{k=2}^n \left(2 \cdot \operatorname{Re} \left(\frac{\chi(\lambda_k, y)}{M_k} \cdot \sigma_k \cdot \frac{\operatorname{Im}(\overline{\lambda_k} \cdot e^{\lambda_k x})}{\operatorname{Im}(\lambda_k)} \right) \right).
 \end{aligned} \tag{6}$$

С помощью изложенной методики выполнен аналитический расчет соединения со следующими параметрами экспериментального образца: размеры сечения пластин – 4x40 мм, размеры сечения бруса – 80x40 мм, длина клеенной части пластин – 240 мм. На рисунке 2 приведены эпюры распределения основных компонентов НДС вдоль клеенной части пластины при действии выдергивающей силы в 20 кН – разрушающей нагрузки для экспериментального образца.

Точные аналитические решения дали возможность понять физическую природу разрушения предложенного типа соединения, а именно:

- касательные напряжения τ_{xy} в древесине достигают значения расчетного сопротивления древесины скалыванию вдоль волокон 2,1 МПа;
- в соединении возникают раскалывающие напряжения σ_y , действующие



а) напряжений τ_{xy} в бруске по контакту с пластиной, Па;
 б) напряжений σ_y в бруске по контакту с пластиной, Па; в) напряжений σ_x в пластине, Па

Рис. 2 Распределение компонентов НДС вдоль соединения на половину глубины вклейки пластины

перпендикулярно продольной оси образца, максимальные значения которых соизмеримы с пределом прочности клеевого соединения на отрыв;

- значения разрушающих напряжений максимальны в непосредственной близости от торца соединения по линии контакта «сталь-древесина».

Кроме этого, полученные зависимости позволили точно определить характер распределения напряжений и деформаций по сечению и вдоль соединения при выдергивании стальной пластины из бруса.

Параллельно были созданы конечно-элементные модели экспериментального образца в системе автоматизированного проектирования APM CivilEngineering и в ПК ANSYS. Узлы конечно-элементной сетки в зоне контакта компонентов соединения приняты абсолютно жесткими, что соответствует работе соединения в упругой области. В расчет введены фактические физико-механические характеристики материалов, примененных при проведении экспериментальных исследований. Результаты вычислений наиболее значимых для соединения параметров НДС приведены ниже в виде изокарт (рис. 3).

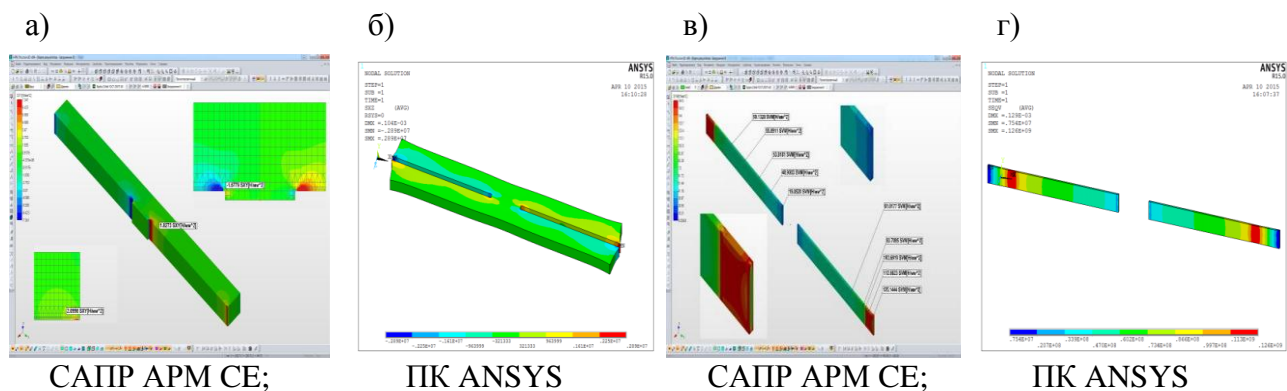


Рис. 3 Карты распределения касательных напряжений в бруске (а, б) и эквивалентных напряжений в пластине (в, г)

Значения компонентов НДС в деревянном бруске, клеевом слое и стальной пластине, подсчитанные в программных комплексах APM CivilEngineering и ANSYS, совпадают с точностью до 1,5 %, что свидетельствует, в том числе, о кор-

ректности построения конечно-элементных моделей. Характер распределения напряжений и деформаций в соединении, полученный численными методами, полностью соответствует НДС соединения, рассчитанного аналитически, что позволяет в дальнейшем опираться на расчеты, выполненных в программных комплексах на основе метода конечных элементов.

Расчеты, выполненные на параметрической модели соединения в ПК ANSYS, показали, что изменение геометрических и конструктивных параметров соединения, таких как: длина клейки, варианты механической обработки пластин, толщина клея, при постоянной толщине бруса и физико-механических характеристиках материалов позволяют снизить значения напряжений, вызывающих разрушение клеевого соединения пластины с древесиной и, как следствие, использовать предложенный тип соединения в узлах деревянных конструкций.

Для подтверждения полученных аналитическим и численными методами значений параметров напряженно-деформированного состояния клеевого соединения стальных пластин с древесиной были проведены эксперименты с применением методов натурной тензометрии, а также серии разрушающих испытаний образцов, методика и результаты которых приведены в главе 3.

Для сопоставления данных образец для исследования НДС клеевого соединения пластины с древесиной методом тензометрии изготовлен аналогично рассчитанным аналитическим и численными методами образцам. 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 45° к продольной оси шириной 10,0 мм глубиной 1,0 мм, нанесенными на вертикально-фрезерном станке с шагом 25,0 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

Рис. 4 Подготовка пластины перед вклеиванием в брус

Для определения напряжений на образцах монтировали прямоугольные трехэлементные тензорозетки (на древесине) и одиночные тензодатчики (на пластине) типа ПКС-12-200. Подготовленный образец закреплялся в захватах испытательной машины ИР-50-47 и подключался к тензосистеме ММТС 64.01 по схеме, приведенной на рис. 5. Общий вид экспериментальной установки показан на рис. 6.



Рис. 5 Схема подключения тензодатчиков

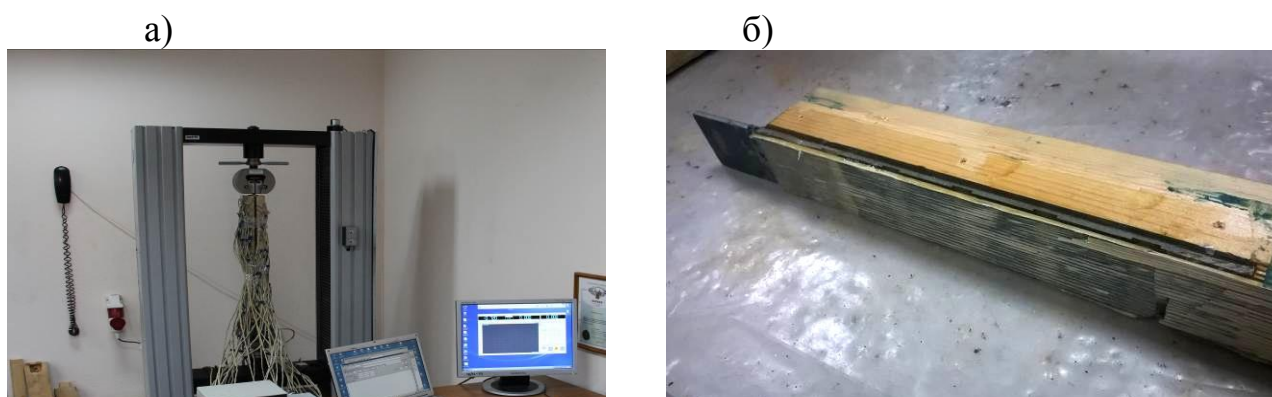


Рис. 6 Испытательная установка для изучения НДС соединения (а) и характер разрушения опытных образцов (б)

Оценивая экспериментально определенные компоненты НДС клеевого соединения стальных пластин с древесиной можно сделать вывод о хорошей качественной сходимости результатов с аналитическим и численными расчетами, полученными в главе 2. Расхождение теоретических (ПК ANSYS) и экспериментальных данных по касательным напряжениям в древесине в плоскости, перпендикулярной плоскости пластины, не превышали 8 %, по напряжениям, направленным перпендикулярно оси образца в его торце, – 9 %, по напряжениям в пластине, направленным вдоль оси образца, – 6 %. При этом количественные показатели деформативности соединения, полученные при численных исследованиях, на 20-25 % ниже экспериментальных величин. Этот факт объясняется тем, что в численной модели узлы по контактной поверхности «клей-древесина» приняты абсолютно жесткими, а на самом деле имеет место незначительное перемещение клеевой прослойки вдоль волокон древесины из-за наличия различной степени адгезии клея с ее годовыми слоями.

Установлено, что касательные напряжения в бруске максимальны у торца соединения, интенсивно падают практически до нулевого значения к середине длины вклейки пластины и аналогичным образом возрастают до максимального значения к концу вклеенной части пластины независимо от ее длины. При этом максимальные значения касательных напряжений снижаются с увеличением длины вклеенной части при неизменной толщине пластины и с увеличением толщины пластины при постоянной длине вклейки. Установлено, что сама пластина, в том числе, с уменьшенной

толщиной в зонах фрезерованных пазов, при рассмотренных вариантах геометрических параметров соединения, испытывает нормальные к сечению пластин напряжения существенно ниже, чем расчетное сопротивление стали.

В результате проведенных исследований выявлено, что раскалывающие напряжения в древесине, направленные перпендикулярно продольной оси соединения, максимальны у торца соединения по контакту «клей-древесина», уменьшаются с увеличением толщины пластины и длины вклейки и затухают в брусе до нулевого значения на расстоянии 30 мм от плоскости контакта «клей-древесина».

Результатом проведения экспериментов стали также выявленные закономерности, справедливые при ширине пластин в пределах от 40 до 100 мм:

1. Наиболее сильное влияние на напряженно-деформированное состояние клевого соединения оказывает длина вклейки пластины. Ее увеличение приводит к росту несущей способности соединения. Однако при увеличении длины вклейки более $8b_{нл}$ прирост прочности соединения резко замедляется и не превышает 10% от максимального значения, достигаемого при длине вклейки $8b_{нл}$. С учетом обеспечения качества вклейки пластины в древесину и надежности соединения длина вклейки $l_{вк}$ должна находиться в интервале $2b_{нл} \leq l_{вк} \leq 8b_{нл}$.

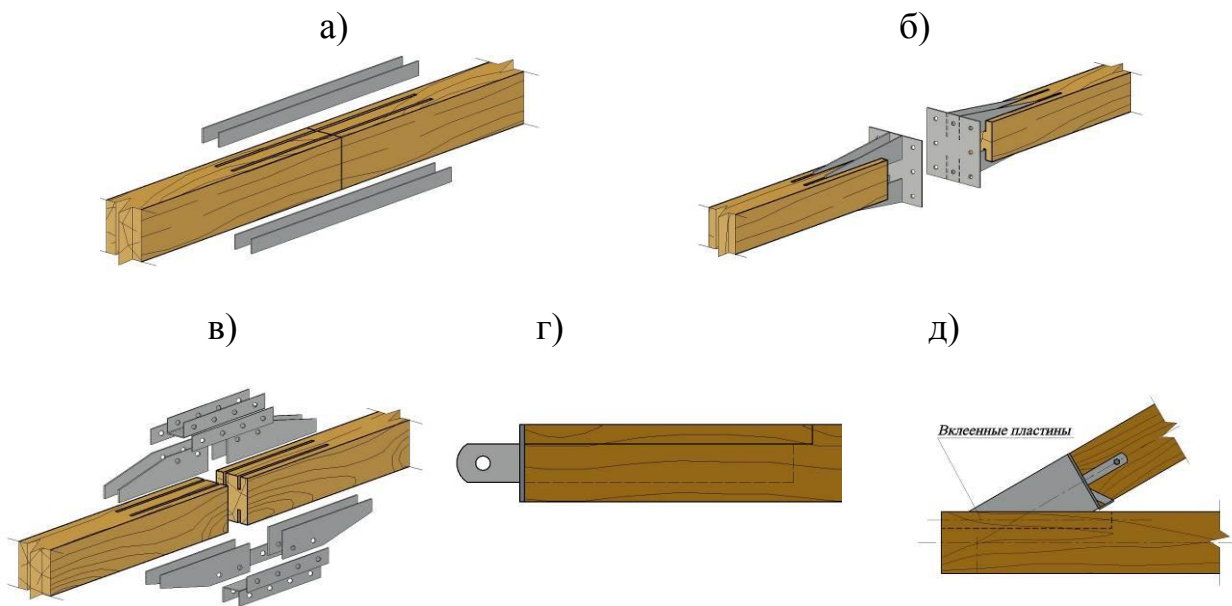
2. Распределения нормальных напряжений во вклеенных пластинах и касательных напряжений в древесине по линии контакта с клеевой композицией носят ярко выраженный неравномерный характер. Степень неравномерности увеличивается с увеличением длины вклейки. Данный факт необходимо учитывать в практических расчетах 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.

3. Прочность соединения линейно зависит от толщины пластины $t_{нл}$, что также необходимо учитывать в практических расчетах корректировочным коэффициентом k_t , учитывающим это влияние: $k_t = 0,85 + 30t_{нл}$, где $t_{нл}$ - в метрах.

В четвертой главе приведены результаты разработок и экспериментальных исследований узловых соединений на стальных вклеенных пластинах при действии кратковременных и длительных нагрузок.

Показано, что соединения на вклеенных стальных пластинах могут быть применены в узловых соединениях ферм, арок, блок-ферм, пространственных модулей, шатровых конструкций и др. Приведены конкретные примеры эффективного применения предложенного типа соединения как при проектировании новых зданий и сооружений различного назначения, так и при усилении и ремонте эксплуатируемых деревянных конструкций. На рис. 7 показаны разъемные и неразъемные варианты таких узловых соединений с использованием вклеенных в древесину пластин, работающих на выдергивание.

Целью экспериментальных исследований узловых соединений на стальных вклеенных пластин стало определение их фактической прочности и жесткости при действии кратковременных и длительных нагрузок. Эксперименты проведены на натуральных образцах растянутого стыка по рис.7а и опорного узла фермы по рис.7д. Перед проведением испытаний были выполнены численные расчеты



а) неразъемный стык; б), в) разъемный стык; г) элемент структурного покрытия;
 д) опорный узел фермы

Рис. 7 Варианты узловых соединений деревянных конструкций на стальных вклеенных пластинах

испытываемых соединений. Испытаниям подлежали по три опытных образца. При проведении испытаний при помощи тензометрирования и индикаторов часового типа контролировали нормальные и касательные напряжения в древесине и пластинах, а также общие деформации соединений.

Экспериментальные исследования растянутых стыков (рис. 8) проводили на специально подготовленной испытательной установке, состоящей из непосредственно образца со стыком на вклеенных пластинах, к боковым граням которого на расстоянии 600 мм от стыка приклеивали упоры из бруса размером 150x150x500мм. Общая площадь склеивания обеспечивала возможность воспри-

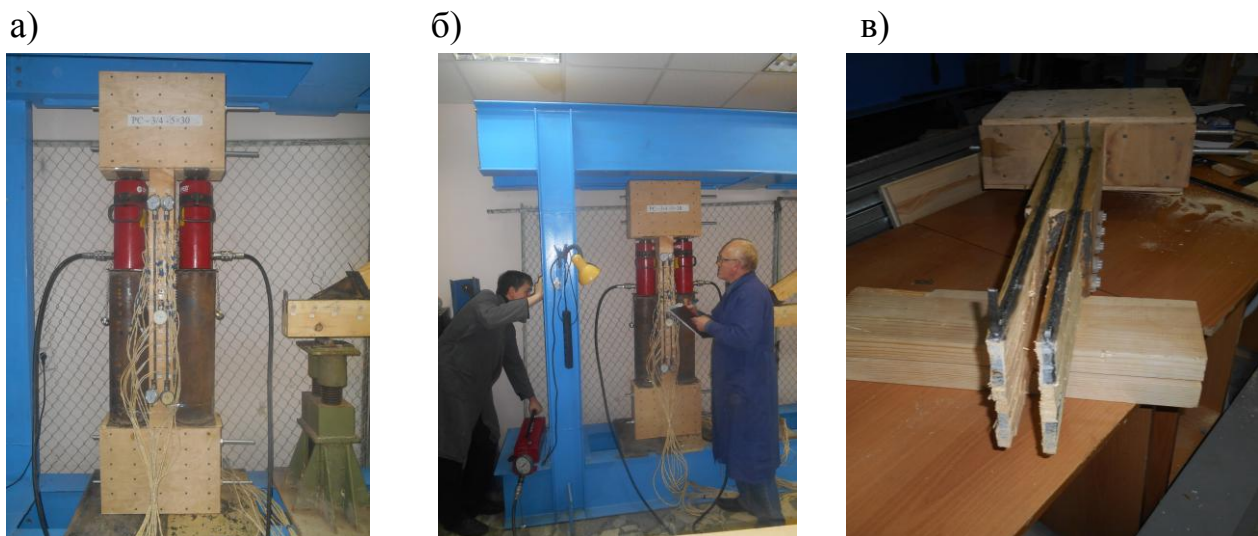


Рис. 8 Общий вид (а), процесс испытания (б) и характер разрушения (в) растянутого стыка

нимать сдвиговое усилие в 180 кН, что почти в два раза превышало расчетную несущую способность исследуемого соединения, равную 95,5 кН.

По результатам обработки экспериментальных данных получены значения деформаций соединения при различных значениях нагрузки, а также графики распределения касательных и нормальных к продольной оси образца напряжений в древесине в непосредственной близости от контактной поверхности с клеем по длине клеенной части пластин и нормальных к сечению пластин напряжений в пластине. Наиболее характерные зависимости показаны на рис. 9. Отметим, что разница в напряжениях и деформациях между экспериментальными и теоретическими величинами при расчетной нагрузке не превышала 9% и 7%, соответственно.

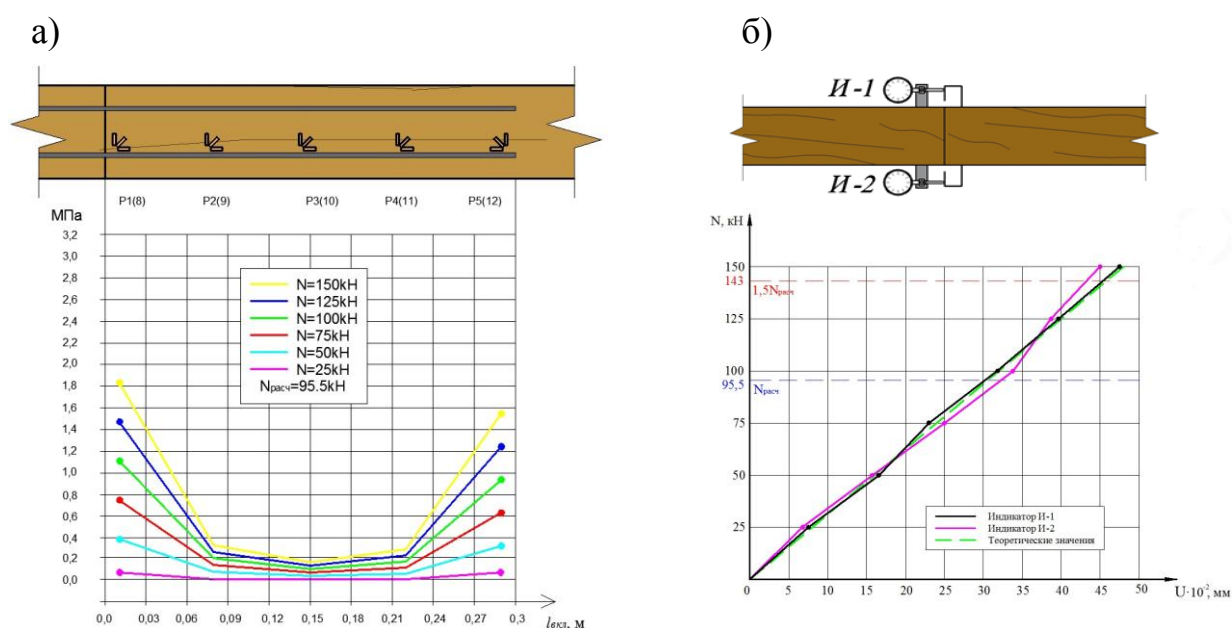


Рис. 9 Распределение касательных напряжений в древесине по длине клеенной части пластин по линии «клей-древесина» (а) и деформации соединения (б)

В ходе испытаний была определена также разрушающая нагрузка. Разрушение соединений происходило хрупко в результате скалывания по граничному слою клей-древесина. После скалывания на поверхности пластин имелся клеевой слой с остатками древесины (рис. 8в). Разрушению от скалывания предшествовало наличие потрескивания. Далее происходил резкий выкол деревянного бруса по поверхности контакта с клеем. Толщина выколовшегося слоя древесины колебалась от 1 мм до 4 мм. Три опытных образца разрушились при нагрузке 268 кН, 275 кН и 284 кН. Усредненный коэффициент безопасности составил 2,87, что подтверждает высокую эксплуатационную надежность испытанного стыка.

Длительным испытаниям был подвергнут неразъемный растянутый узел. 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. Длительные испытания проводили на рычажной установке (рис.10а). Полученный график нарастания деформаций пластины относительно массива древесины с течением времени показан на рис.10б.

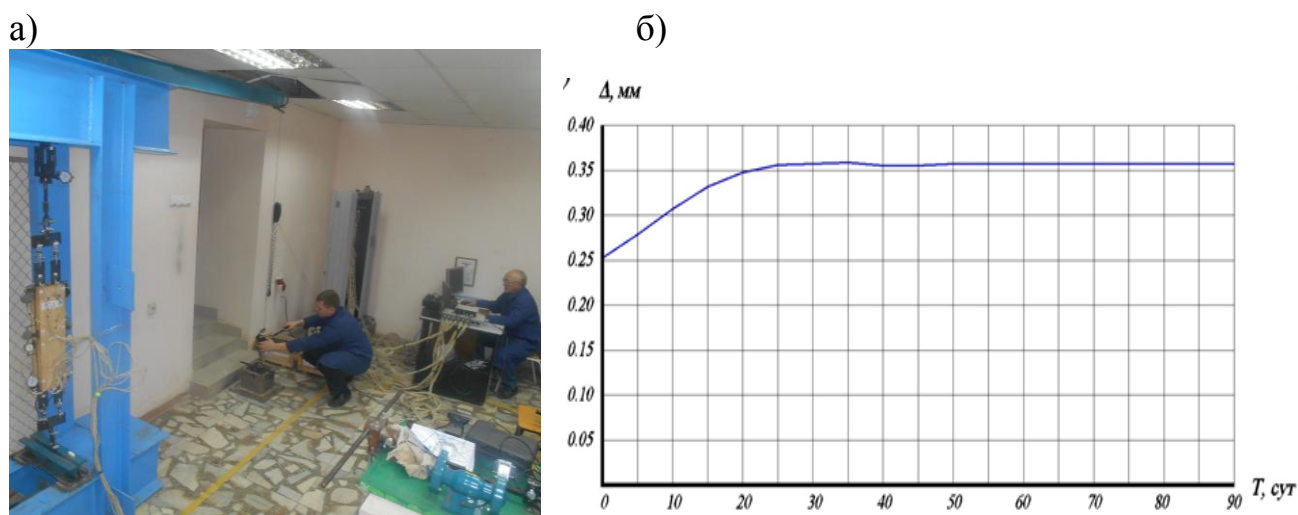
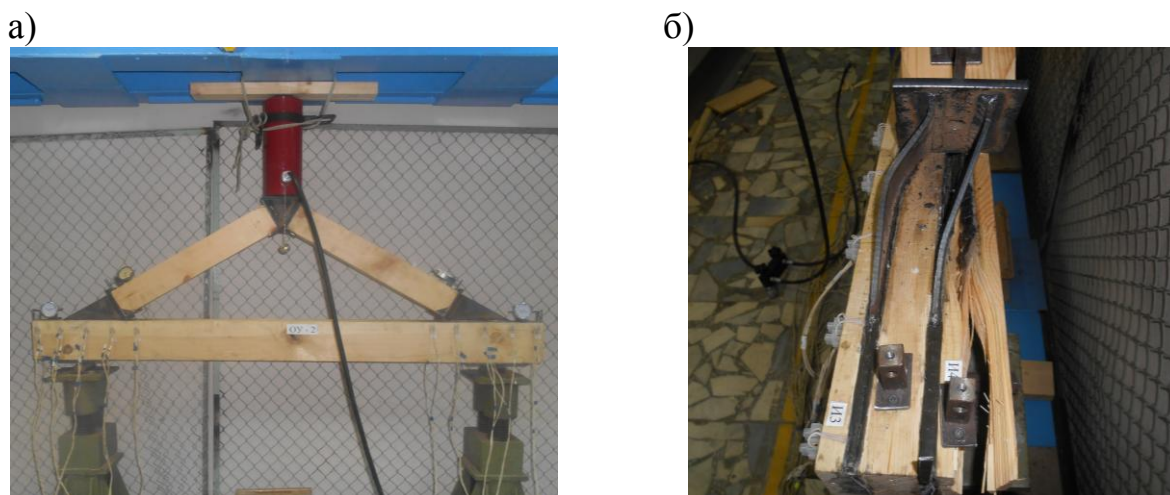


Рис. 10 Общий вид стенда для проведения длительных испытаний (а) и график деформаций соединения во времени (б)

Среднее значение деформации сдвига пластин относительно древесины было равно 0,36мм, таким образом, деформации возросли по сравнению с кратковременными в 1,44 раза. Характер изменения деформаций, полученных в ходе эксперимента (рис.10б), 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. 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 длительно действующих нагрузках. Отметим, что длительные испытания проведены при расчетном значении нагрузки, а не при нормативном. Этот факт также подтверждает эксплуатационную надежность соединения.

Испытания опорных узлов ферм проводили по аналогичной методике с применением средств натурной тензометрии для определения напряжений в древесине и пластинах. Общий вид испытательной установки и характер разрушения опытных образцов приведены на рис. 11. В результате испытаний выявлено, что максимальные значения нормальных напряжений в пластине находились не на конце пластины, как в растянутом стыке, а были смещены к центру, что объясняется приложением силы в середине длины пластины. Характер деформирования всех четырех вклеенных пластин был идентичен, причем прямопропорциональная зависимость между нагрузкой и сдвигом пластин относительно массива древесины наблюдалась до величины нагрузки, равной $1,5 P_{расч}$ (при этой нагрузке механические приборы были сняты с образца). Следует отметить, что экспериментальные данные соответствовали результатам численных расчетов, при этом разница между теоретическими и экспериментальными величинами не превышала 12%, что для условий натурального эксперимента является приемлемой величиной.



а) общий вид установки; б) характер разрушения опытного образца
Рис. 11 Испытания опорного узла фермы

Три опытных образца разрушились при нагрузке 168 кН, 175 кН и 194 кН. Разрушение во всех трех образцах произошло от потери устойчивости ребер жесткости, устроенных для обеспечения сопряжения в узле верхнего пояса с нижним (рис. 11б), с последующим частичным доломом клеевого соединения и древесины. Усредненный коэффициент безопасности составил 3,21, что подтверждает высокую эксплуатационную надежность запроектированного опорного узла.

В целом, проведенные испытания узлов подтвердили возможность распространения данных, полученных при испытании отдельных клеевых соединений стальной пластины с древесиной, на натурные конструкции. Разработанные конструктивные решения узлов соединения элементов деревянных конструкций на стальных вклеенных пластинах обладают необходимой степенью прочности и жесткости, в том числе при длительном действии нагрузок, и могут быть рекомендованы к применению в строительной практике.

В реальных узловых соединениях, по результатам расчетов, практически всегда применяют несколько параллельно работающих пластин. Численными методами учесть возможную степень неравномерного распределения усилий между ними практически невозможно. С целью определения фактической прочности и жесткости соединений в зависимости от числа примененных пластин проведены дополнительные экспериментальные исследования при действии кратковременных нагрузок. Результаты испытания образцов, в которых прикладываемая нагрузка передается на группу пластин, показали, что несущая способность соединения меньше, чем алгебраическая сумма отдельно взятых элементов. С увеличением количества пластин в узловом сопряжении расчетная несущая способность каждой отдельно взятой пластины снижается. Величина снижения составляет 0,95 при четырех параллельно работающих пластинах, 0,90 - при шести пластинах и 0,82 - при восьми пластинах, что необходимо учитывать в практических расчетах введением корректировочного коэффициента $k_{нл}$. Для образцов с двумя параллельно работающими пластинами неравномерности передачи нагрузки не выявлено.

В пятой главе изложены рекомендации по конструированию и расчету предложенного типа соединений, а также оценка технико-экономической эффективности применения в практике строительства соединений на клеенных пластинах. Приведен пошаговый алгоритм расчета соединений на стальных клеенных пластинах, включающий в себя статический расчет конструкции с определением расчетного усилия, действующего в проектируемом соединении, компоновку узла с расстановкой пластин, назначение ширины пластины по конструктивным требованиям, определение толщины пластины из условия ее прочности с учетом наличия ослаблений, назначение диаметра соединительных болтов и проверку пластин на смятие в местах их расположения (при наличии таковых в соединении), определение длины клейки пластины.

С учетом этого факта расчетную несущую способность T , МН, соединения на стальных клеенных пластинах следует определять по формуле:

$$T \leq R_{ск} \cdot n \cdot b \cdot l \cdot k_t \cdot k_l \cdot k_{nl} , \quad (7)$$

где $R_{ск}$ – расчетное сопротивление древесины скалыванию, МПа, определяемое по поз. 5г таблицы 3 СП 64.13330.2011 Деревянные конструкции;

n – количество пластин в соединении;

b – ширина клеиваемой пластины, м, в диапазоне от 0,04м до 0,1м;

l – длина клеенной части пластины, м, которую следует принимать по расчету, но не менее $2b$ и не более $8b$.

Даны рекомендации по изготовлению и конструированию предложенного типа соединений, базирующиеся на фактических картинах напряженно-деформированного состояния, установленных теоретически и экспериментально.

Проведенный сравнительный технико-экономический анализ показал экономическую целесообразность применения в соединениях деревянных конструкций клеенных стальных пластин, при этом, например, в расчете на каждый узел треугольной фермы на нагелях достигается снижение трудоемкости изготовления на 24-28 %, стоимости материалов на 39-57 %, стоимости «в деле» на 24-31 % в зависимости от типа проектируемого узла и действующих усилий. В ценах III квартала 2015 года сокращение стоимости «в деле» в сравнении с аналогом на каждую стропильную ферму пролетом 12,0 м составляет 10680 рублей или 296,6 руб/м², на стропильную ферму пролетом 18,0 м - 29600 рублей или 548,1 руб/м².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования

1. Разработан новый способ узлового соединения деревянных элементов при помощи клеенных стальных пластин, отличающийся от известных аналогов простотой изготовления, сниженной материалоемкостью, повышенной жесткостью и прочностью.

2. Аналитическими и численными методами доказана возможность применения клеенных стальных пластин в соединениях элементов деревянных конструкций. Впервые получено аналитическое решение задачи по определению напряжен-

но-деформированного состояния разработанного соединения при выдергивании клеенной 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, определенные в программных комплексах АРМ CivilEngineering и ANSYS, совпали с расхождением до 1,5 %, что доказало корректность построенных конечно-элементных моделей. Выявлено, что дополнительная обработка боковых поверхностей клеенных частей пластин путем фрезерования прямоугольных пазов существенно повышает адгезию соединения по контакту «клей-металл», при этом наиболее рациональными являются угол наклона паза в $45^\circ \pm 3^\circ$ к продольной оси пластины и его глубина $0,25t_{nl}$ при ширине паза 10мм и шаге пазов 25мм.

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 клеенки, ширины и толщины пластины, способа механической обработки ее поверхности, а также безопасные расстояния между осями пластин в направлении поперек волокон, исключающие раскалывание и скалывание деревянного элемента при выдергивании клеенной пластины. Выявлено, что наиболее сильное влияние на напряженно-деформированное состояние клеевого соединения оказывает длина клеенки пластины $l_{вк}$, при этом с учетом обеспечения качества клеенки пластины в массив древесины и надежности соединения она должна находиться в интервале $2b_{nl} \leq l_{вк} \leq 8b_{nl}$. При этом нормальные напряжения в клеенных пластинах и касательные напряжения в древесине по линии контакта с клеевой композицией имеют неравномерный характер распределения. Степень неравномерности увеличивается с увеличением длины клеенки. Данный факт предложено учитывать в практических расчетах при помощи аппроксимационной формулы: $k_l = 1,125 + 0,9l^2 - 1,36l$, где l - длина клеенной части пластины, k_l - коэффициент, вводимый к площади пластины при определении ее несущей способности и учитывающий степень неравномерного распределения напряжений. Аналогично получено значение коэффициента k_t , учитывающего зависимость прочности соединения от толщины пластины t_{nl} : $k_t = 0,85 + 30t_{nl}$.

4. В результате проведенных экспериментальных исследований разработанных 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 на примере треугольных ферм на нагелях 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.

Основные положения диссертации опубликованы:

– *в изданиях, рекомендуемых ВАК:*

1. Столповский, Г.А. Соединение элементов деревянных конструкций быстровозводимых зданий и сооружений винтовыми крестообразными нагелями / Г.А. Столповский, В.И. Жаданов, **И.В. Руднев** // Вестник Оренбургского государственного университета. – Оренбург. - 2011. - №5. - С. 150 – 154.

2. **Руднев, И.В.** Соединения элементов деревянных конструкций с применением клеенных стальных пластин / **И.В. Руднев**, В.И. Жаданов, С.В. Лисов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – Новосибирск. - 2014. - №4. - С. 5 – 12.

3. **Руднев, И.В.** Методика расчета соединений элементов деревянных конструкций на клеенных стальных пластинах / **И.В. Руднев**, В.И. Жаданов // Вест-

ник Оренбургского государственного университета. – Оренбург. - 2015. - №5. - С. 155 – 161.

4. **Руднев, И.В.** Выдергивание стальных пластин, клеенных в древесину. Аналитический расчет и эксперимент / **И.В. Руднев**, В.И. Жаданов // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. – Чебоксары. - 2015. - №2. - С. 9 – 18.

– в других изданиях:

5. Горелов, С.Н. Расчет пространственных стержневых конструкций в системах автоматизированного проектирования / С.Н. Горелов, **И.В. Руднев**, А.Ю. Казак // Компьютерная интеграция производства и ИПИ технологии: сб. материалов 4-й всерос. науч.-практ. конф., 3-8 февраля 2009г. – Оренбург. - 2009. - С. 333 – 336.

6. Столповский, Г.А. О соединениях деревянных элементов на стальных крестообразных нагелях / Г.А. Столповский, **И.В. Руднев**, В.Н. Шведов // Сборник трудов 3-й всероссийской научно-технической конференции, посвященной 80-летию НГАСУ (Сибстрин). – Новосибирск. - 2010. - С. 87 – 89.

7. **Руднев, И.В.** Применение САД/САЕ систем в расчетах на прочность соединений элементов строительных конструкций / **И.В. Руднев**, Г.А. Столповский // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: сб. материалов Всероссийской научно-методической конференции ОГУ. – Оренбург. - 2014. - С. 357 – 361.

8. **Руднев, И.В.** К вопросу применения клеенных металлических пластин в соединениях деревянных конструкций / **И.В. Руднев**, В.И. Жаданов, П.А. Дмитриев // 22-23 мая 2014г. – Архангельск. - 2014. - С 378 – 383.

9. Жаданов, В.И. Применение клеенных стальных пластин в узлах деревянных конструкций / В.И. Жаданов, **И.В. Руднев**, Г.А. Столповский // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании : сборник материалов Международной научной конференции МГСУ. – Москва. - 2015. - С. 154 – 158.

10. Столповский, Г.А. Моделирование соединений деревянных элементов на витых нагелях в системах автоматизированного проектирования / Г.А. Столповский, **И.В. Руднев**, И.И. Яричевский // Современные строительные конструкции из металла и древесины. – Одесса. - 2014. - №4. - С. 248 – 254.

11. Столповский, Г.А. Применение Российских САПР в расчетах соединений элементов деревянных конструкций / Г.А. Столповский, **И.В. Руднев**, Л.А. Муртазина // 22-23 мая 2014г. – Архангельск. - 2014. - С 339 – 344.

12. Столповский, Г.А. Исследование стальных стержней для соединения строительных конструкций / Г.А. Столповский, **И.В. Руднев** // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: сб. материалов Всероссийской научно-методической конференции ОГУ. – Оренбург. - 2014. - С 451 – 456.