На правах рукописи

ИШМАЕВА Дарья Дмитриевна

ЖЁСТКИЕ УЗЛОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ НА ВКЛЕЕННЫХ СТАЛЬНЫХ ШАЙБАХ В БАЛОЧНЫХ СТРУКТУРАХ ИЗ КЛЕЁНЫХ ДЕРЕВЯННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Пенза - 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Пензенский университет архитектуры и строительства»

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
Вдовин Вячеслав Михайлович

Официальные оппоненты: **Жаданов Виктор Иванович**
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет»
заведующий кафедрой «Строительные конструкции»

Лабудин Борис Васильевич
доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»
профессор кафедры
«Инженерные конструкции и архитектура»

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования **«**Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет**»**

Защита состоится 18 декабря 2014 г. в 13^{00} 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, д.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.

Автореферат разослан 17 октября 2014 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета — Бакушев Сергей Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Существующая база строительства и производства строительных конструкций в нашей стране до сих пор ориентирована преимущественно на применение железобетонных, каменных и стальных конструкций, в то же время огромные запасы лесных ресурсов используются недостаточно. Вместе с тем, накопленный зарубежный и отечественный опыт применения клеёных деревянных конструкций показал, что по сравнению с традиционными решениями они имеют значительные преимущества: материалоёмкость уменьшается в 3 раза, вес зданий в 2÷3 раза, трудоёмкость монтажа до 2,5 раз.

Как известно, пространственные конструкции на основе древесины более эффективны по сравнению с плоскостными. Они конкурентоспособны и по сравнению с аналогичными конструкциями одного класса из других традиционных материалов. Одним из перспективных видов пространственных несущих конструкций, выполненных из клеёной древесины, являются перекрёстно-балочные структуры, отличающиеся унификацией элементов, экономичностью и повышенной архитектурной выразительностью.

Широкое применение таких структур в отечественной практике ограничено отсутствием необходимых данных для определения расчётных усилий при различных схемах расположения балочных элементов, рекомендаций по выбору рациональных схем и невозможностью учёта ряда факторов, влияющих на их работу, а также не всегда удачным опытом возведения строений. Основную сложность при проектировании и изготовлении структур представляют узлы сопряжения балок, которые предпочтительнее выполнять жёсткими. Однако, в имеющихся литературных источниках отсутствуют предложения и исследования по разработке эффективных и рациональных жёстких узлов сопряжения балочных элементов в структуре.

Таким образом, проблема совершенствования балочных структур из клеёных деревянных элементов и их узловых сопряжений является актуальной и определяет общую постановку исследований.

Цель работы: исследование работы балочных структур из клеёных деревянных элементов, совершенствование их узловых сопряжений, уточнение методов расчёта и разработка рекомендаций по проектированию и применению.

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

- обобщить и проанализировать отечественный и зарубежный опыт применения перекрёстно-балочных структур в строительстве;

- установить закономерности влияния меняющихся статико-геометрических параметров и конструктивных решений на напряжённо-деформированное состояние перекрёстно-балочных структур;

- разработать новые конструкции узлов сопряжения клеёных деревянных элементов балочной структуры с применением вклеенных стальных шайб;

- провести экспериментальные исследования натурных образцов жёстких узлов сопряжения клеёных деревянных балок в структуре для изучения действительного характера работы предложенных конструктивных решений под нагрузкой и отработки технологических аспектов выполнения узлов;

- провести численные исследования напряжённо-деформированного состояния предложенных конструкций жёстких узлов для оценки надёжности и достоверности результатов экспериментальных исследований;

- определить технико-экономическую эффективность применения в балочных структурах разработанных конструкций жёстких узлов;

- дать рекомендации по конструированию, расчёту и изготовлению балочных структур с жёсткими узловыми соединениями на вклеенных стальных шайбах;

- внедрить результаты проделанной работы в строительную практику и учебный процесс.

Объект исследования – жёсткие узловые сопряжения элементов с применением соединения на вклеенных стальных шайбах в балочных структурах из клеёной древесины.

Предмет исследования – напряжённо-деформированное состояние балочных структур из клеёных деревянных элементов и их узлов сопряжения с развитием методики расчёта и рекомендаций по проектированию.

Методология работы. В работе используется экспериментально-теоретический метод. В теоретических исследованиях, которые выполнены в работе, использованы общие методы строительной механики и теории расчёта деревянных конструкций, метод конечных элементов. Физический эксперимент выполнен с использованием современного аттестованного измерительно-вычислительного оборудования, что обеспечивает необходимую достоверность полученных результатов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработаны новые конструкции жёстких узлов сопряжения клеёных деревянных элементов в балочных структурах с применением вклеенных стальных шайб (новизна разработок подтверждена патентами на полезную модель №144657 и №144669 от 27.08.2014. Бюл.№24-2014);

- разработана методика расчёта структур и жёстких узлов сопряжения балочных элементов в структуре;

- определены рациональные параметры структур и область их применения на основе эффективного использования материалов;

- установлены закономерности влияния на работу структур жёсткого и шарнирного сопряжения балок в узлах, схемы действия внешних нагрузок, схемы расстановки опорных стоек, величины пролёта структуры и геометрических параметров поперечного сечения балок;

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

Практическая ценность работы заключается:

- в разработке новых конструкций жёстких узлов сопряжения клеёных деревянных балочных элементов с применением вклеенных стальных шайб для использования в покрытиях зданий и сооружений различного назначения;

- в создании инженерного метода расчёта предлагаемых конструктивных решений структур и их узлов с разработкой рекомендаций по проектированию, изготовлению и применению;

- в возможности снизить материалоёмкость и трудозатраты изготовления балочной структуры из клеёных деревянных элементов при применении разработанных конструкций жёстких узлов.

На защиту выносятся:

- новые конструкции жёстких узлов сопряжения клеёных деревянных элементов в балочных структурах с применением вклеенных стальных шайб;

- результаты теоретических исследований балочных структур из клеёных деревянных элементов с учётом жёсткого и шарнирного сопряжения балок в узлах, схемы действия внешних нагрузок, схемы расстановки опорных стоек, величины пролёта структуры и геометрических параметров поперечного сечения балок;

- результаты экспериментальных исследований напряжённо-деформированного состояния разработанных конструкций жёстких узлов сопряжения клеёных деревянных элементов;

- инженерный метод расчёта предлагаемых конструктивных решений балочных структур и узлов сопряжения элементов в них;

- результаты технико-экономической оценки применения в балочных структурах из клеёных деревянных элементов разработанных конструкций жёстких узлов сопряжения на вклеенных стальных шайбах, а также рекомендации по их проектированию.

Внедрение результатов работы:

- результаты научной работы использованы при разработке серии полносборных деревянных домов из модульных элементов в виде клеёных

балочных конструкций с соединениями на вклеенных металлических шайбах фирмой ООО «ГЕОДОМ»;

- технические рекомендации и альбомы чертежей разработанных конструкций переданы в организацию ОАО институт «Пензсельстройпроект» для выполнения рабочих проектов мансардных крыш и стропильных систем жилых домов;

- материалы исследований включены в разделы курса «Конструкции из дерева и пластмасс», который читается студентам, обучающимся по направлению «Строительство» Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, а также используются в курсовом и дипломном проектировании.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на международной научно-практической конференции «Города России: система взаимовоздействия человек – здания и сооружения», г.Пенза, 2009г; международной научно-методической конференции «Магистры – будущая кадровая основа строительной отрасли», г. Пенза, 2009г; международной научно-практической конференции «Строительная индустрия: вчера, сегодня, завтра», г. Пенза, 2010г; международном научном форуме «Наука молодых – интеллектуальный потенциал XXI века», г.Пенза, 2011г; XI международной научно-технической конференции «Эффективные строительные конструкции: теория и практика», г.Пенза, 2011г; международной научно-технической конференции «Безопасность и эффективность строительных конструкций», г.Пенза, 2011, 2013г;

Основные положения диссертации опубликованы в 16 печатных работах, в том числе 4 статьи в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, 1 монографии, получены 2 патента на полезную модель.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, общих выводов, списка литературы из 141 наименования и приложения. Общий объём работы – 171 страница, в том числе 108 рисунков, 14 таблиц, 4 страницы приложений.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследований, дана краткая характеристика состояния вопроса, сформулированы цель и задачи работы, отмечены сведения, составляющие научную новизну и практическую значимость исследований.

В первой главе приведены основные сведения о перекрёстно-балочных структурных конструкциях из клеёной древесины, проанализированы их преимущества и недостатки.

Среди исследований, посвящённых вопросам разработки, изучения и совершенствования структурных балочных конструкций из древесины, отмечены работы Э.Н. Байды, В.М. Вдовина, А.В. Вешнякова, В.А. Гастева, В.Н. Диденко, П.А. Дмитриева, В.И. Жаданова, Д.С. Заварихина, Е.А. Кабанова, А.А. Калинина, Г.Н. Клещёвой, А.Г. Кондакова, Г.В. Кривцовой, Б.В. Лабудина, Л.Н. Лубо, Б.А. Пушкина, К.П. Пятикрестовского, В.И. Трофимова, А.Б. Шмидта.

Анализ отечественных и зарубежных примеров строительства позволяет сделать вывод, что балочные структуры являются эффективными несущими конструкциями для перекрытия и покрытия зданий, имеют достаточно широкую сферу практического применения и представляют интерес для современного строительства, как в архитектурном, так и в конструктивном отношении.

Однако, методы расчёта балочных структур нуждаются в уточнении с учётом действительной работы всей структурной системы и узловых сопряжений элементов. Отмечается, что известные конструкции узлов сопряжения элементов в балочных структурах из клеёной древесины не лишены ряда серьёзных недостатков. Критический анализ широкого круга примеров узлов позволил определить пути совершенствования узловых сопряжений в балочных структурах из клеёных деревянных элементов, сформулировать цель и задачи исследования.

Вторая глава диссертации посвящена анализу работы балочных структур из клеёных деревянных элементов.

Результаты расчётов структурных схем по имеющимся теоретическим методикам при сравнении с результатами расчётов в программном комплексе StructureCAD показали хорошую сходимость, из чего был сделан вывод, что статический расчёт балочных структур желательно проводить с применением программных комплексов, основанных на методе конечных элементов, при этом за расчётную схему принимать пространственно-стержневую модель, состоящую из стержней, жёстко соединённых друг с другом, а опирание на стойки задавать шарнирным.

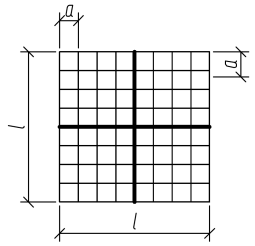
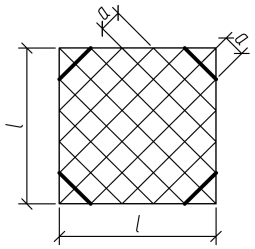
Для структур с ортогональной и диагональной сеткой расположения балок максимальный изгибающий момент и максимальный прогиб предлагается подсчитывать по формулам:

$$M_{max} = k_q \cdot q \cdot a \cdot l^2, \quad (1)$$

$$f_{max} = k_f \cdot \frac{q \cdot l^4}{E \cdot I}. \quad (2)$$

Автором были получены значения коэффициентов k_q и k_f, которые представлены в таблице 1, для случая структур с опиранием по контуру и загруженных равномерно распределённой нагрузкой по всей поверхности.

Таблица 1 – Коэффициенты к определению максимальных изгибающих моментов и прогибов в перекрёстных балках на квадратных в плане перекрытиях

Схема структуры	Параметры структурной схемы		Коэффициент к величине максимального изгибающего момента	Коэффициент к величине максимального прогиба
			k_q	k_f
	$a = \frac{l}{n}$	n=3	0,0677	0,0570
		n=4	0,0758	0,0489
		n=5	0,0741	0,0374
		n=6	0,0765	0,0327
		n=7	0,0753	0,0273
		n=8	0,0765	0,0245
		n=9	0,0757	0,0214
		n=10	0,0765	0,0195
		n=11	0,0759	0,0174
		n=12	0,0765	0,0163
	$a = \frac{l}{n\sqrt{2}}$	n=2	0,0748	0,0456
		n=3	0,0739	0,0273
		n=4	0,0724	0,0195
		n=5	0,0705	0,0152
		n=6	0,0689	0,0124
		n=7	0,0676	0,0105

Во второй главе установлены закономерности влияния меняющихся статико-геометрических параметров и конструктивных решений на НДС структур:

- узлы сопряжения элементов балочных структур предпочтительнее выполнять жёсткими, вариантов с шарнирным сопряжением балок в узлах следует избегать;

- рациональными для балочных структур являются пролёты от 9 до 24м;

- наиболее невыгодной схемой действия внешней нагрузки на структуру является равномерно распределённое загружение средней трети пролёта или приложение сосредоточенной силы в центральный узел структуры;

- размещение опорных стоек балочной структуры существенно влияет на усилия в балках, при этом увеличение их количества обычно не приводит к значительному уменьшению усилий в элементах, наибольшего уменьшения усилий можно достигнуть при внутриконтурном опирании структуры за счёт разгружающего эффекта консольных свесов;

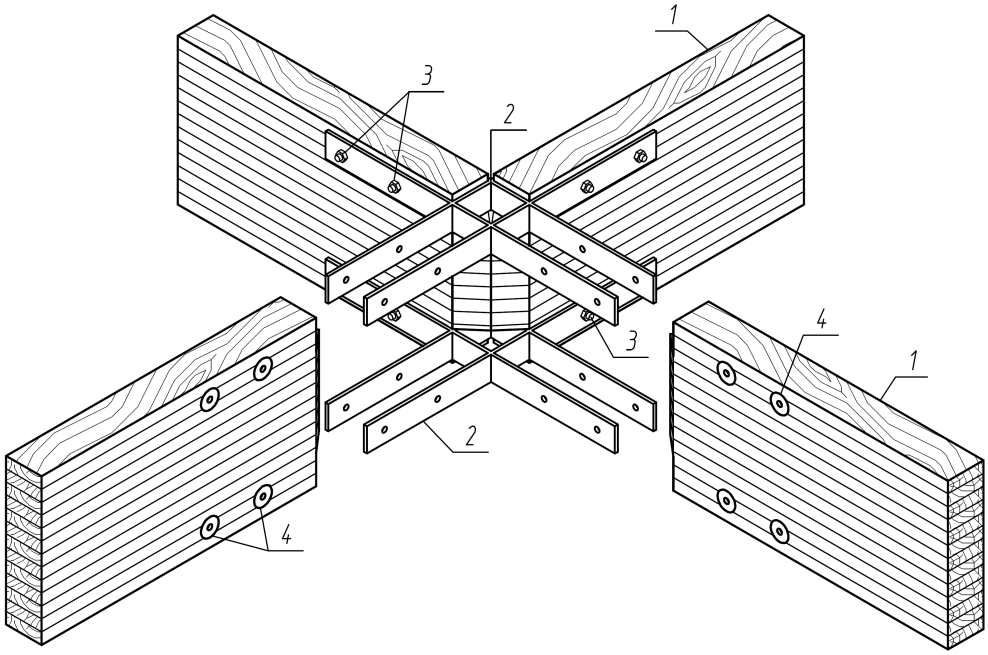
- высоту сечения балок рекомендуется назначать в пределах $h=(1/16\div1/25)\cdot l$; ширину сечения - $b=(1/5\div1/10)\cdot h$.

Третья глава диссертации посвящена разработке новых типов жёстких узлов сопряжения элементов в балочных структурах из клеёной деревесины. Проведя анализ соединений элементов деревянных конструкций, для совершенствования узловых сопряжений балочных структур принято в качестве основных рабочих связей использовать новый прогрессивный вид соединения элементов деревянных конструкций - соединение на вклеенных стальных шайбах.

Разработка конструкций жёстких узлов на вклеенных стальных шайбах направлена на повышение несущей способности узлов соединения элементов в балочной структуре, увеличение её жесткости и уменьшение деформативности, обеспечение технологичности сборки узлов и, как следствие, расширение области применения перекрёстно-балочных конструкций из клеёной древесины.

Представлены две разработанные конструкции: жёсткий узел балочной структуры на вклеенных стальных шайбах и соединительных сварных элементах, а также жёсткий узел на вклеенных шайбах и стальных накладках. Новизна предложенных конструкций узлов защищена патентами РФ на полезную модель.

Жёсткий узел балочной структуры на вклеенных стальных шайбах и соединительных сварных элементах (рисунок 1) содержит сопрягаемые под углом клеёные деревянные балки прямоугольного поперечного сечения, сверху и снизу которых выбраны четверти под соединительные сердечники и предварительно высверлены в боковых гранях сверху и снизу балок вблизи узла сопряжения круглые гнёзда диаметром на 2мм больше диаметра шайбы для удобства укладки, глубиной равной толщине шайбы.



1 - балочные элементы структуры; 2 - соединительные сварные элементы;
3 - стяжные болты; 4 - вклеенные шайбы

Рисунок 1 - Жёсткий узел балочной структуры на вклеенных стальных шайбах и соединительных сварных элементах

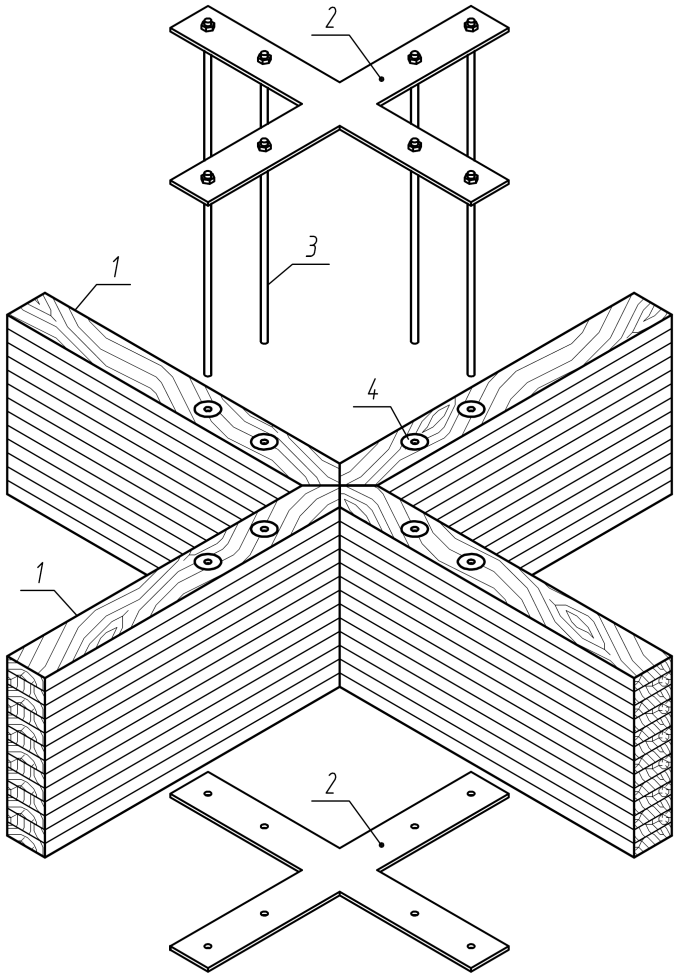
По центру выбранных круглых гнёзд высверлены сквозные отверстия под болты, так чтобы болты не упирались в древесину и не создавали в ней напряжения. Стальные шайбы вклеиваются в тело деревянных балок путём заполнения гнезда клеевой композицией на основе эпоксидной, фенол-резорциновой или других смол. Соединение балок в узле выполняется посредством сварных стальных сердечников коробчатого сечения, к которым по направлению соединяемых балок приварены парные стальные пластины, имеющие отверстия под болты, совпадающие соосно с месторасположением отверстий во вклеенных шайбах. После установки соединительных сварных элементов в отверстия вставляются болты, с помощью которых путём завинчивания на них гаек обеспечивается плотность соединения элементов и монолитность всего узла. Размеры приваренных к сердечнику пластин определяются согласно правилам расстановки шайб: удаление шайб друг от друга и расстояние от края балочного элемента до центра шайбы равно трём диаметрам шайбы, расстояние от края металлической накладки до центра шайбы равно диаметру шайбы, ширина пластины на 20мм больше диаметра шайбы.

Вклеенные шайбы передают усилия на древесину преимущественно через напряжения смятия, которые перераспределяются в балочном элементе на бóльшую площадь, чем сама шайба, что приводит к снижению локальных напряжений смятия и скалывания и, как следствие, к увеличению несущей способности узла. Введение клеевой композиции в кольцевое гнездо позволяет быстро и полностью включиться в работу стальной шайбе и исключить начальные деформации. Наличие монолитного соединения древесины с вклеенной шайбой существенно снижает податливость соединения элементов балочной структуры, т.е. способствует повышению жёсткости всего перекрытия.

Технологичность сборки такого узла обеспечивается применением в качестве соединительных элементов сварных стальных сердечников, которые устанавливаются не на всю высоту соединяемых балок, а лишь на её часть, располагаемую сверху и снизу, и к которым привариваются парные стальные полосы, установленные не в прорези балки, а по боковым граням.

Жёсткий узел балочной структуры на вклеенных шайбах и стальных накладках (рисунок 2) включает сопрягаемые под углом клеёные деревянные балочные элементы прямоугольного поперечного сечения с предварительно высверленными на верхней и нижней поверхностях балок вблизи места сопряжения круглыми гнёздами диаметром на 2мм больше диаметра вклеиваемой шайбы, глубиной равной толщине шайбы. По центру выбранных круглых гнёзд высверливаются сквозные отверстия под болты, так чтобы болты не упирались в древесину и не создавали в ней напряжения. Стальные шайбы вклеиваются в тело деревянных балок путём заполнения гнезда клеевой композицией. Соединение балок в узле производится посредством крестообразных накладок, расположенных по верхней и нижней граням балок, и имеющих отверстия под

болты, которые отрихтованы в соответствии с месторасположением центровых отверстий вклеенных шайб и сквозных отверстий в древесине балок. В отверстия вставляются болты, с помощью которых путём завинчивания на них гаек обеспечивается плотность соединения элементов и монолитность всего узла.



1 - балочные элементы структуры; 2 - стальные накладки;
3 - стяжные болты; 4 - вклеенные шайбы

Рисунок 2 - Жёсткий узел балочной структуры на вклеенных шайбах и стальных накладках

Наличие вклеенных стальных шайб в качестве рабочих связей и накладок, установленных лишь сверху и снизу узла, упрощает сборку.

Разработана и представлена технология изготовления конструкций узлов на вклеенных стальных шайбах. В процессе восприятия разработанными узлами нагрузок балочные элементы и вклеенные шайбы обеспечивают работу всей структуры как единого целого.

С целью изучения действительной работы жёсткого узла на вклеенных стальных шайбах и соединительных сварных элементах под нагрузкой были проведены экспериментальные исследования. **В четвёртой главе** представлены методика и результаты экспериментов, а также подробно описана технология изготовления опытных конструкций.

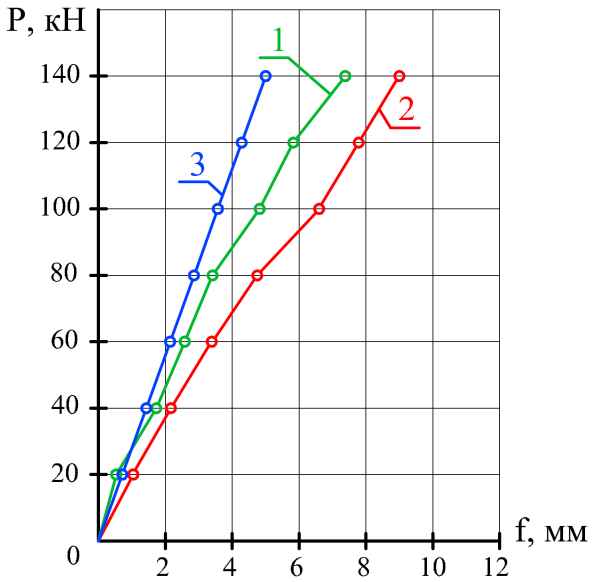
Учитывая то, что в каждом из предлагаемых вариантов жёстких узлов лежит стык четырёх балок, с целью обобщения экспериментального исследования, в начале проведены испытания жёсткого узла сопряжения клеёной балки. После чего на основе положительных результатов эксперимента с балкой проведены испытания на натурном образце унифицированного узла балочной структуры.

Испытаниям подлежала балка прямоугольного поперечного сечения размером 120х494мм, склеенная из досок древесины сосны II сорта, длиной 2960мм.

На первом этапе изучался характер работы клеёной балки без стыка. Затем была изготовлена и испытана балка с жёстким узлом на вклеенных шайбах. Согласно расчёту для восприятия возникающих в узле усилий, в каждом элементе балки расставлено по 2 пары шайб сверху и снизу.

Испытание производилось по схеме свободнолежащей балки на двух опорах, подверженной действию двух сосредоточенных сил в третях пролёта. Нагружение балок осуществлялось ступенями с шагом ΔP=20кН.

В процессе испытания измерялись прогибы балки в середине пролёта, для определения которых были расставлены прогибомеры Аистова. Графики зависимости «нагрузка Р – деформация *f* » для испытанных балок представлены на рисунке 3. На этом же рисунке приведён график нарастания прогибов, подсчитанных теоретически. Прогибы балок увеличивались примерно пропорционально росту нагрузки, т.е. их работа находилась в пределах упругости древесины. Серьёзных повреждений образцов, которые могли бы повлиять на снижение несущей способности, отмечено не было.



1 – для балки цельного сечения, 2 – для балки с жёстким стыком,
3 – подсчитанный теоретически

Рисунок 3 - Графики зависимости прогибов клеёных балок в середине пролёта от нагрузки

В целом, испытание жёсткого узла балки на вклеенных стальных шайбах подтвердило возможность использования такого способа соединения в качестве узлов перекрёстно-балочной структуры.

Испытываемый фрагмент жёсткого узла балочной структуры был изготовлен из четырёх клеедощатых элементов прямоугольного поперечного сечения 120х494мм длиной 1480мм. Для восприятия возникающих в узле усилий в каждом элементе расставлено по 2 пары шайб сверху и снизу. Сопряжение балок в узле выполнено с помощью двух соединительных элементов на болтах.

С целью оценки работы узла на «невыгодные» комбинации возникающих усилий испытания проводились при различных схемах загружения:

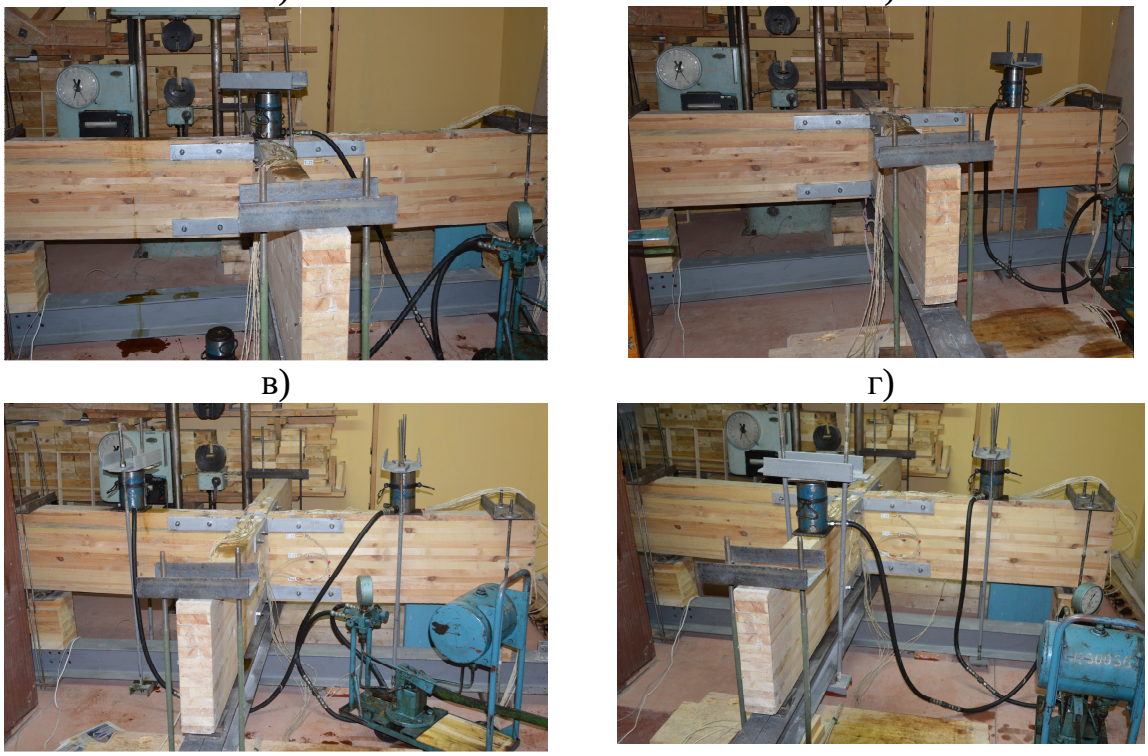
Схема №1. Симметричное нагружение всех четырёх балочных элементов одной силой в центре узла (рисунок 4 а);

Схема №2. Одностороннее загружение одного из элементов (рисунок 4 б);

Схема №3. Загружение двух элементов одного направления (рисунок 4 в);

Схема №4. Загружение двух ортогональных элементов (рисунок 4 г).

а) б)



в) г)

а – испытание по схеме загружения №1; б – по схеме №2; в – по схеме №3; г – по схеме №4

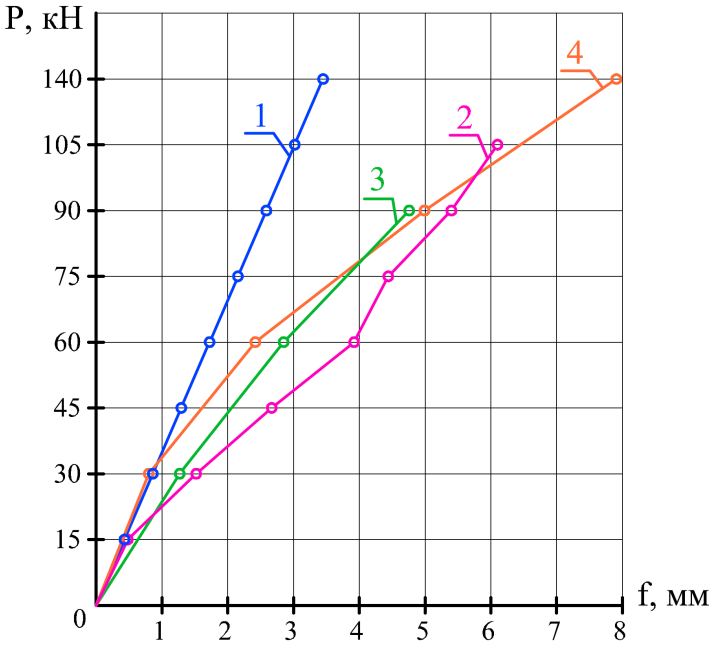
Рисунок 4 – Испытания жёсткого узла балочной структуры

Испытательная установка представляла собой две силовые балки взаимно перпендикулярного направления, расположенные в разных уровнях, на которые установлена модель узла на четырёх опорах. Для обеспечения устойчивости элементов узла из плоскости опорные сечения были раскреплены тяжами к силовым балкам. Нагрузка создавалась гидравлическими домкратами.

В процессе испытания измерялись прогибы в середине пролёта, для определения которых расставлены прогибомеры Аистова. Для детального исследования НДС на древесину были наклеены тензорезисторы, для записи данных измерения использовалась «Микропроцессорная многоканальная тензометрическая система ММТС-64.01».

Нагружение узла осуществлялось ступенями с шагом 15 или 30кН в зависимости от схемы приложения нагрузки. Скорость нагружения принималась непрерывной и равномерной с фиксацией конечного времени. Характерные повреждения, возникшие в результате проведения испытаний, связаны с раскрытием дефектов древесины в растянутой зоне балок.

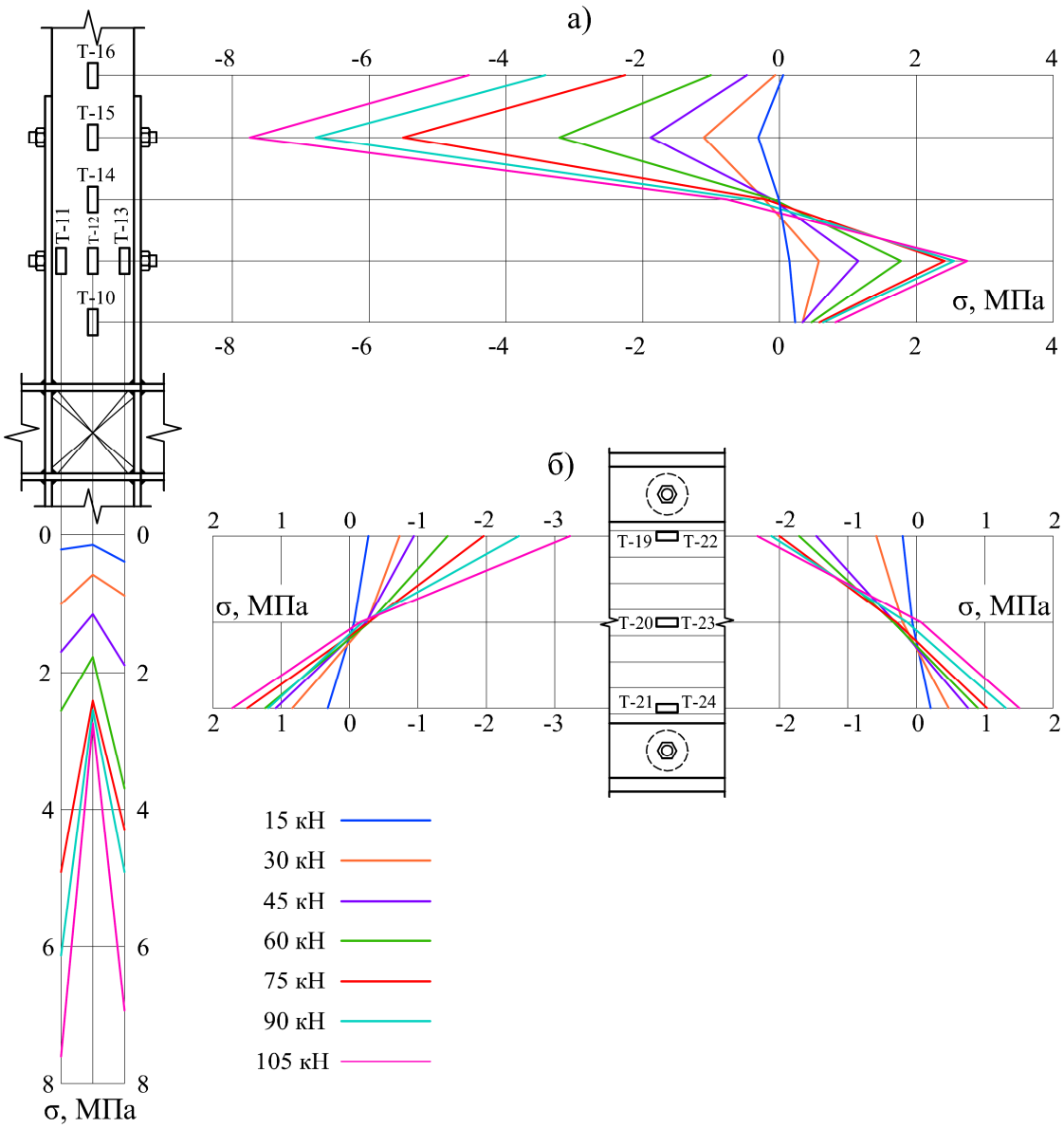
Графики зависимости «нагрузка P – деформация f» по разным схемам нагружения представлены на рисунке 5. Экспериментальные графики мало отличаются от теоретического и подтверждают их упругую зависимость, хотя с увеличением нагрузки возрастает доля пластической работы, которая является результатом деформативности болтов.



1 – подсчитанный теоретически, 2 – экспериментальный для схемы №2,
3 - экспериментальный для схемы №3, 4 - экспериментальный для схемы №4

Рисунок 5 - Графики зависимости прогибов узла
в середине пролёта от нагрузки для разных схем нагружения

На примере графиков распределения нормальных напряжений в нагруженном элементе узла при испытании по схеме №2 можно констатировать, что они носят локальный характер действия. По рисунку 6 а видно, что в местах постановки вклеенных шайб имеет место увеличение напряжений, а на участке между шайбами затухание. По высоте сечения нормальные напряжения имеют закон распределения близкий к теоретическому при поперечном изгибе балки (рисунок 6 б).



а - по тензорезисторам, наклеенным по ширине сечения над шайбами и по длине элемента,
б - по тензорезисторам, наклеенным на боковых поверхностях элемента

Рисунок 6 - Графики распределения нормальных напряжений в нагруженном элементе узла при испытании по схеме №2

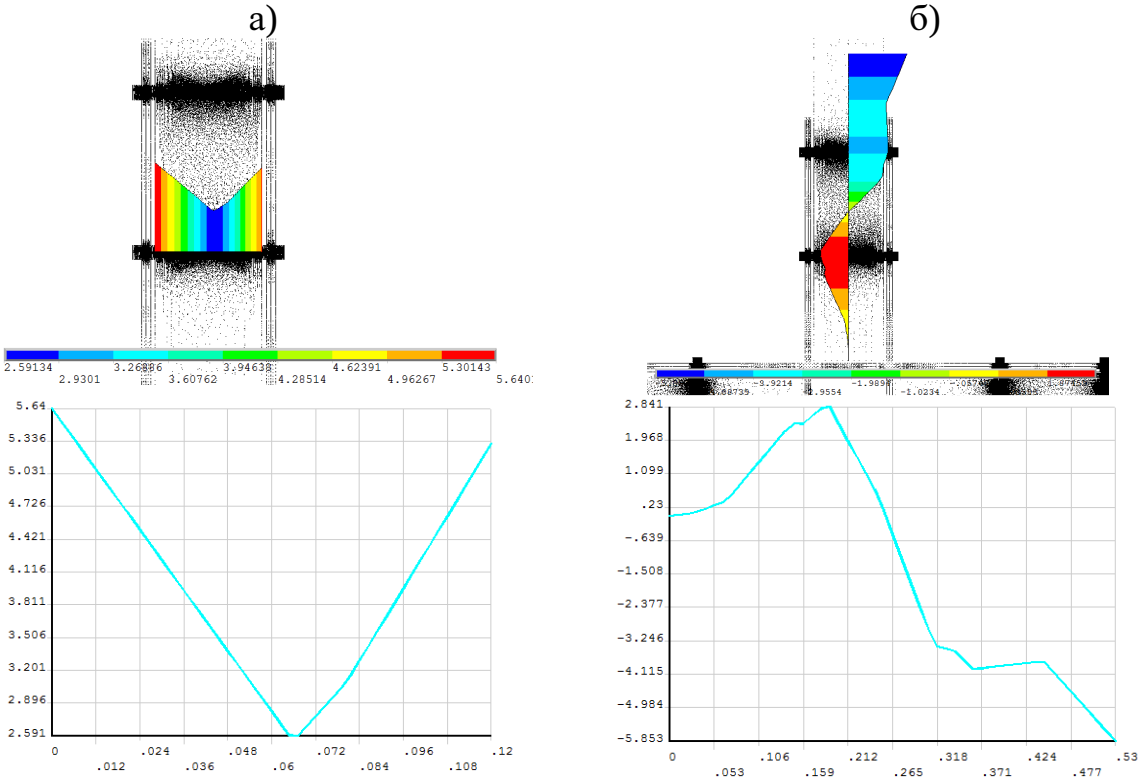
Испытания показали, что предлагаемая конструкция узла с применением вклеенных шайб позволяет рассматривать его как жёсткий, обеспечивающий совместную работу всех состыкованных балок. Силы, приложенные к одному из балочных элементов, вовлекают в работу все четыре элемента взаимно перпендикулярного направления, благодаря их жёсткому сопряжению в узле.

Напряжённое состояние балочных элементов на участке вблизи стыка характеризуется локальной передачей усилий через вклеенные металлические шайбы. Вовлечение в работу нескольких шайб способствует перераспределению узловых усилий на бóльшую площадь стыкуемых элементов, повышая тем самым общую надёжность работы узлового сопряжения.

В пятой главе представлены результаты теоретического исследования узлов балочных структур в программном комплексе ANSYS, целью которого было получение картины и характера напряжённо-деформированного состояния узлов при различных схемах нагружения и сравнения их с данными, полученными в результате физического эксперимента.

Для моделирования элементов узла в ANSYS был использован трёхмерный квадратичный конечный элемент задач МДТТ с десятью узлами - Solid187. Древесина задана как ортотропный материал, с разными упругими характеристиками в трёх направлениях. Приложение нагрузок произведено через функцию «Давление» соответственно четырём схемам загружения. Взаимодействие шайб с древесиной и болтов с отверстиями металлических соединительных деталей осуществляется путём объединения соответствующих перемещений соседних узлов. Конструкция закреплена путём наложения связей по площади вспомогательных пластин, расположение которых соответствует местам расстановки опор при проведении физического эксперимента.

На рисунке 7 представлены графики распределения нормальных напряжений в сечениях, соответствующих местам наклейки тензорезисторов нагруженного балочного элемента узла структуры при загружении по схеме №2 силой P=105кН. Оси абсцисс на графиках соответствует длина сечения в метрах, по оси ординат отложены значения напряжений в рассматриваемом сечении в МПа.



а – по тензорезисторам Т-11÷Т-13, б – по Т-10÷Т-16

Рисунок 7 - Эпюры и графики распределения нормальных напряжений при действии нагрузки по схеме №2 в сечениях, соответствующих местам наклейки тензорезисторов

На примере одностороннего загружения одного из элементов силой P=105кН на рисунке 8 представлена картина распределения вертикальных деформаций жёсткого узла балочной структуры на вклеенных шайбах. Значения перемещений приводятся в метрах.

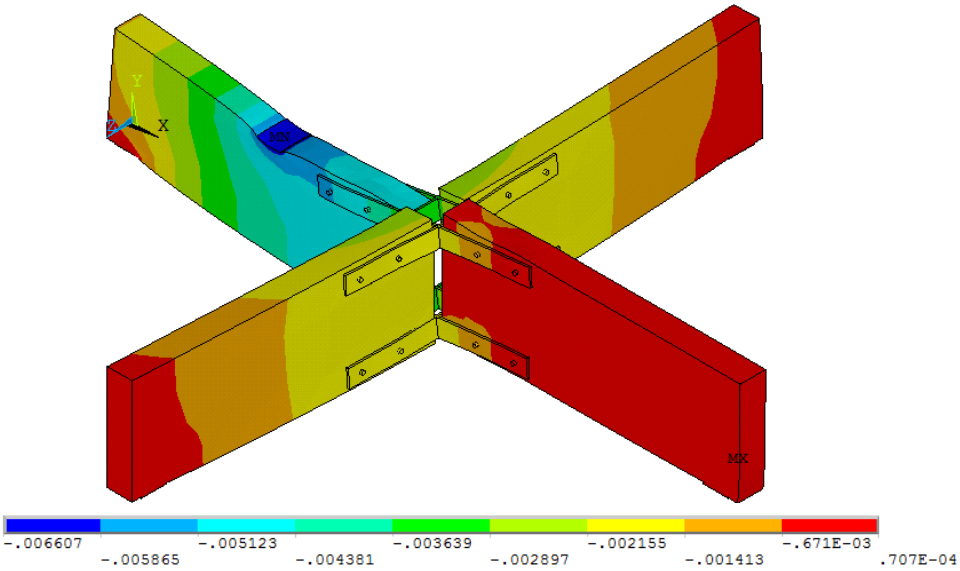


Рисунок 8 - Вертикальные перемещения узла балочной структуры при действии нагрузки по схеме №2

Различия в значении прогибов, полученных из эксперимента от данных ANSYS объясняются структурной неоднородностью материала реальной конструкции узла и наличием в местах сопряжения металлических болтов и пластин фактической податливости, которая не учтена в теоретических расчётах.

Результаты расчётов в ANSYS, показали хорошее совпадение с экспериментальными данными, что подтверждает объективность принятых методов. Из этого можно сделать вывод о конструктивной надёжности предлагаемого жёсткого узла и возможности использования таких узлов в перекрёстно-балочных структурах.

В шестой главе изложены рекомендации по проектированию балочных структур из клеёных деревянных элементов с жёсткими узлами на вклеенных стальных шайбах. А также отражены результаты технико-экономического анализа применения в балочных структурах разработанных жёстких узлов в сравнении с известными аналогами: на болтах и стальных крестообразных накладках и прокладках; на вклеенных стальных нагелях и стальных крестообразных накладках; на болтах посредством стальной крестовины, снабжённой полосовыми деталями; на вклеенных наклонных стальных стержнях.

Технико-экономическая оценка, выполненная по таким показателям, как расход материалов, трудоёмкость и стоимость изготовления, свидетельствует об экономической целесообразности применения в балочных структурах жёстких узлов на вклеенных стальных шайбах.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Проведённые теоретические и экспериментальные исследования балочных структур из клеёной древесины и жёстких узлов сопряжения элементов в них позволяют сделать следующие выводы.

1. На основании всестороннего анализа существующих зданий и сооружений отечественного и зарубежного строительства с покрытиями, выполненными с применением балочных структур из клеёных деревянных элементов, показана технологическая и экономическая целесообразность их применения в зданиях различного назначения. Такие покрытия обладают лёгкостью, пониженным расходом материала, низкой стоимостью, высокой технологичностью при монтаже и другими несомненными достоинствами.

Однако, более широкое использование структур сдерживается отсутствием универсального метода расчёта, применимого для различных схем расположения балочных элементов в перекрёстных системах. Проблемным вопросом при конструировании структур из клеёной древесины является отсутствие прогрессивных узловых сопряжений балочных элементов. Несмотря на большое разнообразие узлов, применяемых в практике строительства, продолжается поиск наиболее рациональных конструктивных решений.

2. Для практических инженерных расчётов структур предложены коэффициенты к определению максимальных изгибающих моментов и прогибов в перекрёстных балках с различной сеткой ортогонального и диагонального направления на квадратном в плане перекрытии.

3. Установлены закономерности влияния на напряжённо-деформированное состояние перекрёстно-балочных структур таких факторов как: величина пролёта, характер сопряжения балок в узлах, схема расположения опорных стоек, характер приложения нагрузки на структуру, параметры поперечного сечения балочных элементов, шаг и схема расположения балок в структуре.

4. Разработаны новые конструктивные решения жёстких узлов сопряжения клеёных деревянных элементов балочных структур, основанные на применении прогрессивного вида соединения на вклеенных стальных шайбах. Новизна предлагаемых конструкций жёстких узлов балочной структуры подтверждена патентами на полезную модель.

5. Надёжность работы предлагаемых жёстких узлов балочных структур доказана результатами экспериментально-теоретических исследований, проведённых на узлах стыкования двух и четырёх балочных элементов, выполненных в натуральную величину. Исследования показали достаточную несущую способность и жёсткость предлагаемых узлов, сопоставимую с работой цельных балочных клеёных элементов, а, следовательно, и практическую

возможность их использования в перекрёстно-балочных структурах и других несущих клеёных конструкциях (арки, рамы), где целесообразно и необходимо применение жёстких узлов.

Экспериментально-теоретические исследования проведены на высоком уровне с применением современных методов, приборов и вычислительной техники.

6. Предложена технология изготовления жёстких узлов сопряжения клеёных деревянных элементов с применением вклеенных стальных шайб, которая может быть использована при массовом строительстве перекрёстно-балочных структур.

7. Выполнен сравнительный технико-экономический анализ, результаты которого подтвердили экономическую целесообразность применения в балочных структурах из клеёных деревянных элементов жёстких узлов на вклеенных стальных шайбах. Трудоёмкость изготовления одного узла на вклеенных стальных шайбах в сравнении с известными аналогами меньше на 10÷30%, стоимость изготовления одного узла меньше на 12÷35%, стоимость материалов на узел ниже на 20÷30%.

Для структуры пролётом 12м применение предлагаемых конструкций жёстких узлов на вклеенных стальных шайбах обеспечивает: сокращение трудоёмкости монтажа всех узлов структуры до 28%, уменьшение стоимости изготовления всей структуры на 10÷30%, снижение стоимости балочной структуры в целом до 25%.

8. С использованием результатов экспериментально-теоретических исследований разработаны рекомендации по проектированию балочных структур из клеёных деревянных элементов с жёсткими узлами на вклеенных стальных шайбах.

9. Предложенные конструкции жёстких узлов на вклеенных стальных шайбах нашли применение при разработке серии полносборных деревянных домов фирмой ООО «ГЕОДОМ». Технические рекомендации и альбомы чертежей разработанных конструкций переданы в организацию ОАО институт «Пензсельстройпроект» для выполнения рабочих проектов мансардных крыш и стропильных систем жилых домов. Результаты проведённых исследований включены в разделы курса «Конструкции из дерева и пластмасс», который читается студентам, обучающимся по направлению «Строительство» в Пензенском государственном университете архитектуры и строительства.

Основные положения диссертации опубликованы:

- в изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. **Дудорова, Д.Д.** К технико-экономической оценке балочных структур из клееных деревянных элементов / **Д.Д. Дудорова**, В.М. Вдовин // Региональная архитектура и строительство. – 2010. - №1. – с. 71-77.

2. **Ишмаева, Д.Д.** Жёсткие узлы клеёных деревянных балочных элементов на вклеенных стальных шайбах / **Д.Д. Ишмаева**, В.М. Вдовин // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2014. - №1. – с. 189-195.

3. Вдовин, В.М. Оптимизация конструктивных решений балочных структур из клеёных деревянных элементов / В.М. Вдовин, **Д.Д. Ишмаева** // Региональная архитектура и строительство. – 2014. - №2. – с. 123-130.

4. 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.

- патенты РФ на полезную модель:

5. Пат. 144657 Российская Федерация, МПК E04B 1/38. Жёсткий узел сопряжения элементов балочных конструкций на вклеенных стальных шайбах / Вдовин, В.М., **Ишмаева, Д.Д.**; патентообладатель ФГБОУ ВПО ПГУАС - № 2014103648/03; заявл. 03.02.2014; опубл. 27.08.2014, Бюл. № 24. – 2с.

6. Пат. 144669 Российская Федерация, МПК E04B 1/38. Жёсткий узел сопряжения элементов балочных конструкций на вклеенных 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. – 2с.

- в монографии:

7. 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.

- в других изданиях:

8. Вдовин, В.М. Балочные структуры из клеёных деревянных элементов с узловыми соединениями на вклеенных металлических шайбах / В.М. Вдовин, **Д.Д. Дудорова** // Сборник статей международной научно-практической конференции «Города России: система взаимовоздействия человек – здания и сооружения». Пенза: РИО ПГСХА. – 2009. – с. 38-41.

9. **Дудорова, Д.Д.** Технико-экономическая оценка структурного перекрытия из клееных деревянных элементов / **Д.Д. Дудорова** // Сборник статей международной научно-методической конференции «Магистры – будущая кадровая основа строительной отрасли». – Пенза: РИО ПГСХА. – 2009. – с. 37-43.

10. **Дудорова, Д.Д.** К расчёту балочных структур из клееных деревянных элементов / **Д.Д. Дудорова**, В.М. Вдовин // Сборник статей международной

научно-практической конференции «Строительная индустрия: вчера, сегодня, завтра». – Пенза: РИО ПГСХА. – 2010. – с. 39-44.

11. **Дудорова, Д.Д.** Разработка и испытание жесткого узла с применением вклеенных стальных шайб / **Д.Д. Дудорова**, В.М. Вдовин // Сборник материалов международного научного форума «Наука молодых – интеллектуальный потенциал XXI века» - Пенза: ПГУАС. - 2011.

12. **Дудорова, Д.Д.** Расчет балочных структур из клееных деревянных элементов / **Д.Д. Дудорова**, В.М. Вдовин // Сборник статей XI международной научно-технической конференции «Эффективные строительные конструкции: теория и практика» – Пенза: РИО ПГСХА. - 2011. – с. 127-132.

13. Вдовин, В.М. Выбор расчетной модели и метода теоретических расчетов балочных структур из клееных деревянных элементов / В.М. Вдовин, **Д.Д. Дудорова** // Сборник статей международной научно-технической конференции «Безопасность и эффективность строительных конструкций» - Пенза: ПГУАС. - 2011. – с. 85-89.

14. Вдовин, В.М. Совершенствование методов расчета балочных структур из клееных деревянных элементов / В.М. Вдовин, **Д.Д. Ишмаева** // Сборник статей международной научно-технической конференции «Безопасность и эффективность строительных конструкций» - Пенза: ПГУАС. - 2013. – с. 35-39.

15. Вдовин, В.М. Экспериментальная модель проверки надежности жесткости узла структуры из клееных балочных элементов / В.М. Вдовин, **Д.Д. Ишмаева** // Сборник статей международной научно-технической конференции «Безопасность и эффективность строительных конструкций» - Пенза: ПГУАС. - 2013. – с. 40-43.

16. **Ишмаева, Д.Д.** Анализ работы балочных структур с жёстким и шарнирным сопряжением балок в узлах / В.М. Вдовин, **Д.Д. Ишмаева** // Сборник статей международной научно-технической конференции «Безопасность и эффективность строительных конструкций» - Пенза: ПГУАС. - 2013. – с. 25-29.