

На правах рукописи



АРКАЕВ Максим Александрович

**УСИЛЕНИЕ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СТАЛЬНЫХ ВИТЫХ КРЕСТООБРАЗНЫХ СТЕРЖНЕЙ**

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 – 2017

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

Научный руководитель: – доктор технических наук, профессор
Жаданов Виктор Иванович

Официальные оппоненты: – **Лабудин Борис Васильевич**,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова»,
профессор кафедры инженерных
конструкций и архитектуры

– **Турков Андрей Викторович**,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева»,
заведующий кафедрой городского
строительства и хозяйства

Ведущая организация: – **АО «НИЦ «Строительство», г. Москва**

Защита состоится 21 сентября 2017 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.184.01, созданного на базе Пензенского государственного университета архитектуры и строительства, по адресу: 440028, г. Пенза, ул. Германа 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-212-184-01/85-38-arkaev-maksim-aleksandrovich>.

Автореферат разослан 20 июля 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Бакушев
Сергей Васильевич

Актуальность темы исследования. В настоящее время на территории России эксплуатируется множество строительных объектов различного назначения, выполненных с использованием конструкций на основе древесины. За время эксплуатации из-за воздействия различных факторов зачастую возникает необходимость усиления строительных конструкций для восстановления их несущей способности и жесткости. Кроме этого необходимость усиления возникает при проведении технического перевооружения и реконструкции строительных объектов, при повышении грузоподъемности и интенсивности работы подъемно-транспортного оборудования, установке дополнительных коммуникаций и других работ, приводящих к увеличению эксплуатационных нагрузок.

Анализ трудов и работ в исследуемой области показал, что, как правило, проведение работ по усилению сопряжено с использованием различных типов соединительных связей. Наиболее эффективными и технологичными зарекомендовали себя соединения на стальных механических элементах, таких как гвозди, нагели, болты, вклеенные стержни и т.п. При всем многообразии все эти связи не лишены определенных недостатков в виде малой несущей способности и значительной деформативности, большой трудоемкости и сложности изготовления.

Несомненно, что создание и исследование новых типов соединительных элементов с высокой несущей способностью, возможностью внедрения в древесину без предварительной рассверловки отверстий, с обеспечением фиксации элементов в проектном положении без вспомогательных деталей, которые могут быть эффективно использованы при усилении деревянных конструкций, является актуальной проблемой, решение которой будет способствовать повышению эффективности применения древесины в строительстве. При этом рассматриваемая тематика требует комплексного подхода, связанного с всесторонним анализом наилучших отечественных и зарубежных аналогов и с внесением коррективов в существующие методики расчета и конструирования.

Степень разработанности темы. Советскими и российскими учеными проведена колоссальная работа по определению различных видов дефектных состояний эксплуатируемых деревянных конструкций, причин их появления, а также по разработке различных методов и способов восстановления и усиления деревянных конструкций. Основные результаты такой работы отражены в трудах М.Д. Бойко, В.В. Большакова, И.М. Гуськова, Г.Н. Зубарева, В.Ф. Иванова, А.В. Калугина, Г.Г. Карлсена, Л.М. Ковальчука, Т.А. Мальцева, Н.А. Митюшина, Г.В. Свенцицкого, Ю.В. Слицкоухова, А.В. Туркова, С.Б. Турковского, Г.А. Цвингмана и других ученых.

Творчество русских инженеров XVIII-XIX веков Д.И. Журавского, И.П. Кулибина, И.К. Коробова, А.Д. Захарова, В.Г. Шухова легло в основу трудов в области расчетов деревянных конструкций и соединений с применением механических связей таких институтов, как ЦНИИСК, ЦАГИ, ЦНИПС, ВИАМ, ЦНИИМОД, ВИА, АН УССР, МИСИ, ЛИСИ, Сибстрин. Особого внимания заслуживают труды советских и российских ученых В.В. Большакова, В.К. Вильдемана, В.Ф. Иванова, Ю.М. Иванова, Г.Г. Карлсена, В.М. Коченова, А.В. Леняшина, В.Н. Маслова, Б.Л. Николаи, и позднее В.С. Деревягина, П.А. Дмитриева, М.Е. Кагана, Н.Ф. Котова, Ю.В. Слицкоухова, Ю.Д. Стрижакова, Г.А. Цвингмана, В.А. Цепяева.

В настоящее время теоретические и экспериментальные работы в области соединений на механических связях в России ведутся в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, МГСУ, СПбГАСУ, НГАСУ (Сибстрин), СФУ (г. Красноярск), ВлГУ (г. Владимир), Нижегородском ГАСУ, ПГУАС (г. Пенза), ПГТУ (г. Йошкар-Ола), ОГУ (г. Оренбург) такими учеными как С.Б. Турковский, А.А. Погорельцев, В.И. Линьков, Е.Н. Серов, Н.В. Шешукова, В.Н. Шапошников, В.В. Пуртов, В.Н. Шведов, И.С. Инжутов, С.И. Рощина, В.А. Цапаев, В.М. Вдовин, В.Г. Котлов, Г.А. Столповский и другими.

На пути совершенствования механических связей в деревянных конструкциях В.Н. Шведовым был разработан новый тип соединительных элементов в виде крупноразмерных нагелей крестообразного поперечного сечения прямолинейной формы с возможностью их огнестрельной забивки. С целью улучшения их технических характеристик Г.А. Столповским предложен соединительный элемент в виде крестообразного стального стержня витой формы, который отличается хорошей работой на выдергивание из массива древесины. Сведения о дальнейших исследованиях витых крестообразных стержней, в том числе при характерной работе связей на изгиб, в доступных источниках отсутствуют. Также отсутствует четкая инженерная методика расчета деревянных конструкций при их усилении с использованием рассматриваемых стержней.

Цель работы: экспериментально-теоретическое обоснование целесообразности усиления деревянных конструкций с использованием стальных витых крестообразных стержней с совершенствованием методики расчета.

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

- обобщить и проанализировать накопленный опыт конструкторских разработок, проведенных в направлении способов усиления деревянных конструкций с применением механических соединительных связей;
- провести теоретические и экспериментальные исследования работы древесины на смятие в отверстиях жесткими штампами крестообразного поперечного сечения витой формы;
- численными методами исследовать особенности напряженно-деформированного состояния соединений усиливаемых конструкций на предложенных типах связей;
- экспериментальными методами при действии кратковременных и длительных нагрузок подтвердить адекватность результатов численных расчетов;
- с учетом результатов проведенных экспериментально-теоретических исследований выполнить опытно-конструкторские разработки вариантов усиления деревянных конструкций с использованием витых стержней крестообразного поперечного сечения;
- усовершенствовать методику расчета и разработать рекомендации по усилению деревянных конструкций с использованием предложенного типа связей;
- дать оценку технико-экономической эффективности использования витых крестообразных стержней при усилении деревянных конструкций;
- внедрить в строительную практику и учебный процесс результаты выполненной работы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработан новый способ усиления деревянных конструкций при помощи стальных витых крестообразных стержней, на основе которого предложены эффективные конструктивные решения восстановления эксплуатационной надежности растянутых, сжатых и изгибаемых несущих конструкций. Разработанный способ основывается на принципе увеличения поперечного сечения усиливаемой конструкции и обеспечения её совместной работы с усиливающими деревянными элементами за счет установки соединительных стальных витых крестообразных стержней;

- предложены конечно-элементные параметрические модели соединений усиливаемых деревянных конструкций при помощи стальных витых крестообразных стержней, позволяющие определить и проанализировать основные компоненты напряженно-деформированного состояния этих соединения и усиливаемых конструкций в целом при их работе на изгиб;

- установлены закономерности влияния на работу соединений в усиливаемых конструкциях на стальных витых крестообразных стержнях габаритных размеров стержней, толщин деревянных элементов, направления волокон древесины и типа соединения (симметричное или несимметричное);

- доказана перспективность применения разработанного способа усиления деревянных конструкций, позволяющего восстанавливать их требуемую степень прочности и жесткости при уменьшении расхода древесины, стали и снижении трудоемкости работ в сравнении с известными аналогами;

- введены в практическую методику расчета предложенного способа усиления деревянных конструкций новые формулы и корректировочные коэффициенты, позволяющие учесть реальную работу стальных витых крестообразных стержней в соединении усиливаемых и усиливающих элементов;

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

Теоретическая значимость работы:

- доказана целесообразность использования витых крестообразных стержней при усилении деревянных конструкций, что обеспечивает широкое применение предложенного способа в практике ремонтных работ, который по сравнению с традиционными схемами усиления обладает меньшей материалоемкостью и трудозатратами, а также повышенными показателями эксплуатационных свойств и долговечностью;

- применительно к тематике диссертации эффективно использованы современные численные методы и высокоинформативные экспериментальные методики исследования соединений усиливаемых деревянных конструкций, в том числе методы статистической обработки экспериментальных данных;

- изложены положения аналитического решения задачи по определению прочности и жесткости соединений на стальных витых крестообразных стержнях, выполняемых при усилении деревянных конструкций;

- раскрыт принцип повышения прочности и жесткости эксплуатируемых деревянных конструкций, который заключается в увеличении поперечного сече-

ния с обеспечением совместной работы деревянных элементов за счет использования стальных витых крестообразных стержней;

- изучены закономерности влияния геометрических и конструктивных параметров витых крестообразных стержней на прочность и деформативность усиливаемых растянутых и изгибаемых деревянных конструкций;

- проведена модернизация алгоритмов расчета усиливаемых деревянных конструкций с применением стальных витых крестообразных стержней, учитывающих неполноту информации об их напряженно-деформированном состоянии, а именно выведены и доказаны экспериментально-теоретические аппроксимационные формулы, характеризующие влияние на соединение габаритных размеров стержней, толщин деревянных элементов, направления волокон древесины и фактической конструкции соединения.

Практическая значимость работы подтверждается тем, что:

- разработаны и внедрены в строительную практику новые способы усиления деревянных конструкций с применением стальных витых крестообразных стержней;

- обоснована методика конструирования и расчета усиливаемых деревянных конструкций, позволяющая учитывать фактические параметры узлов и устраняющая недостаточность отечественных нормативных документов в части проектирования рассматриваемого способа усиления;

- определены диапазоны варьирования геометрических параметров элементов соединения усиливаемых деревянных конструкций, обеспечивающие их технико-экономическую эффективность и эксплуатационную надежность;

- созданы практическая методика расчёта и разработаны рекомендации по конструированию и выполнению усиления деревянных конструкций при помощи стальных витых крестообразных стержней;

- представлена оценка технико-экономической эффективности предложенного способа усиления.

Методология и методы диссертационного исследования. В работе использован экспериментально-теоретический метод. В теоретических исследованиях применены общие методы строительной механики и теории расчета деревянных конструкций. Физический эксперимент выполнен с использованием современного аттестованного измерительно-вычислительного оборудования в испытательном центре «Оренбургстройиспытания», а также в лаборатории проблемных испытаний Оренбургского государственного университета, что обеспечило необходимую достоверность полученных результатов.

На защиту выносятся:

- новые способы усиления деревянных конструкций при помощи стальных витых крестообразных стержней;

- результаты исследования работы древесины на смятие в отверстиях жесткими штампами витой формы крестообразного поперечного сечения, обеспечивающие надежную работу соединений усиливаемых конструкций и их высокую степень эксплуатационной надежности;

- результаты оценки напряженно-деформированного состояния соединений на витых крестообразных стержнях и конструкций, усиленных с их использованием, проведенной при помощи численных исследований и экспериментальных методов при кратковременном и длительном действии нагрузок;

- методика расчета и рекомендации по усилению деревянных конструкций с использованием соединительных связей витой формы крестообразного поперечного сечения, а также результаты их технико-экономической оценки.

Достоверность полученных результатов работы обеспечена использованием обоснованных математических моделей задач строительной механики и теории упругости, представительным объемом экспериментальных исследований (356 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 IV региональной научно-практической конференции аспирантов, молодых ученых и студентов «Современные технологии в строительстве. Теория и практика», Пермь, 2013 г.; Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы строительного и дорожного комплексов», Йошкар-Ола, 2013 г.; VI, VII, VIII, IX и X Всероссийских научно-технических конференциях «Актуальные вопросы строительства», Новосибирск, 2013-2017 гг.; Всероссийских научно-методических конференциях (с международным участием) «Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры», Оренбург, 2013-2017 гг.; I и II Международных научно-технических конференциях «Инновационные строительные технологии. Теория и практика», Оренбург, 2013 г., 2015 г.; Международной научно-практической конференции «Деревянное домостроение Сибири 2030», г. Красноярск, 22-23 апреля 2015 г.; Научно-технической конференции «Деревянные конструкции: разработка, исследования, применение», г. Москва, 26-27 октября, 2016 г.

Внедрение результатов работы:

- с использованием витых крестообразных стержней выполнены работы по усилению стропильных и балочных конструкций зданий жилых домов, школ, детских садов и других объектов общественного назначения (всего восемь объектов в г. Оренбурге и Оренбургской области);

- материалы исследований и альбомы рабочих чертежей разработанных способов усиления деревянных конструкций переданы по запросу в Правительство Оренбургской области, а также в проектные организации и институты для внедрения в строительстве;

- результаты опытно-конструкторских разработок используются в курсовом и дипломном проектировании студентами ОГУ, обучающимися по направлению «Строительство» профилей «Промышленное и гражданское строительство» и «Городское строительство».

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 21 печатной работе, в том числе 7 статей в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ. Получено 2 патента РФ на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 185 наименований и приложения. Общий объем работы – 190 страниц, в том числе 65 рисунков, 20 таблиц, 6 страниц приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первой главе дан обзор работ, соответствующих теме диссертации, проанализированы основные принципы и известные методы усиления деревянных конструкций. Критический анализ традиционных типов механических связей, применяемых при усилении, позволил выявить ряд недостатков при их использовании и определить, что наиболее рациональным видом связей в рассматриваемой области является стальной витой крестообразный стержень. Определены рациональные пути использования таких стержней при усилении деревянных конструкций, конкретизированы цель и задачи исследований.

Теоретическим и экспериментальным исследованиям работы древесины на смятие в отверстиях жесткими штампами витой формы крестообразного поперечного сечения посвящена **вторая глава** диссертации. Основная задача исследований заключалась в получении зависимости между сопротивлением древесины при ее сжатии и при ее смятии при различных габаритных жесткого штампа. Принимая во внимание достаточно сложную форму, как самого стержня, так и ответного паза в массиве, исследования проведены с использованием численных методов при помощи программного комплекса «Ansys». Для твердотельного моделирования деревянного бруса были использованы объемные конечные элементы 1-го порядка тетраэдрической формы. Для увеличения точности расчета и контактного взаимодействия вблизи отверстия использовалась функция призматического слоя. При моделировании стержней в качестве конечных элементов были использованы объемные конечные элементы формы гексаэдра.

Численные исследования показали, что при толщине деревянного бруса $s=5d$ несущая способность древесины при ее смятии вдоль волокон крестообразным штампом с ориентацией ребер по отношению к волокнам $\alpha=0^{\circ}(90^{\circ})$ выше, чем при ориентации ребер $\alpha=45^{\circ}$, при смятии поперек волокон – наоборот. Витой крестообразный стержень занимает промежуточное положение между прямолинейным стержнем с ориентацией ребер по отношению к волокнам $\alpha=0^{\circ}(90^{\circ})$ и 45° , как при смятии древесины вдоль волокон, так и поперек (рисунок 1). Объясняется это тем, что при витой форме крестообразного штампа положение ребер по отношению к волокнам в массиве образца изменяется, но в любом случае находится в интервале между $\alpha=0^{\circ}(90^{\circ})$ и 45° . При толщине деревянных образцов $s=5d$ (поворот каждого из 4-х ребер на 90°) ориентация ребер витого стержня не оказывает влияния на напряженно-деформированное состояние древесины, при этом ориентация ребер на поверхности внедрения ($\alpha_{вн}$) и выхода ($\alpha_{вых}$) стержня из массива одинакова.

Для оценки влияния ориентации ребер стержней на НДС древесины при ее смятии численными методами была определена нагрузка, необходимая для перемещения на 1 мм жестких штампов витой формы крестообразного поперечного сечения вдоль и поперек волокон массива образцов толщиной 50, 75, 100, 125 и 150 мм при $\alpha_{вн}=0^{\circ}, 45^{\circ}$. Дополнительно из условия обеспечения достаточной жесткости стержня и соответственно равномерного смятия древесины при проведении экспериментов, а также для объективного сравнения результатов численных и экспериментальных исследований были выполнены численные расчеты при толщине деревянного элемента $2,5d$. Анализируя полученные данные, можно

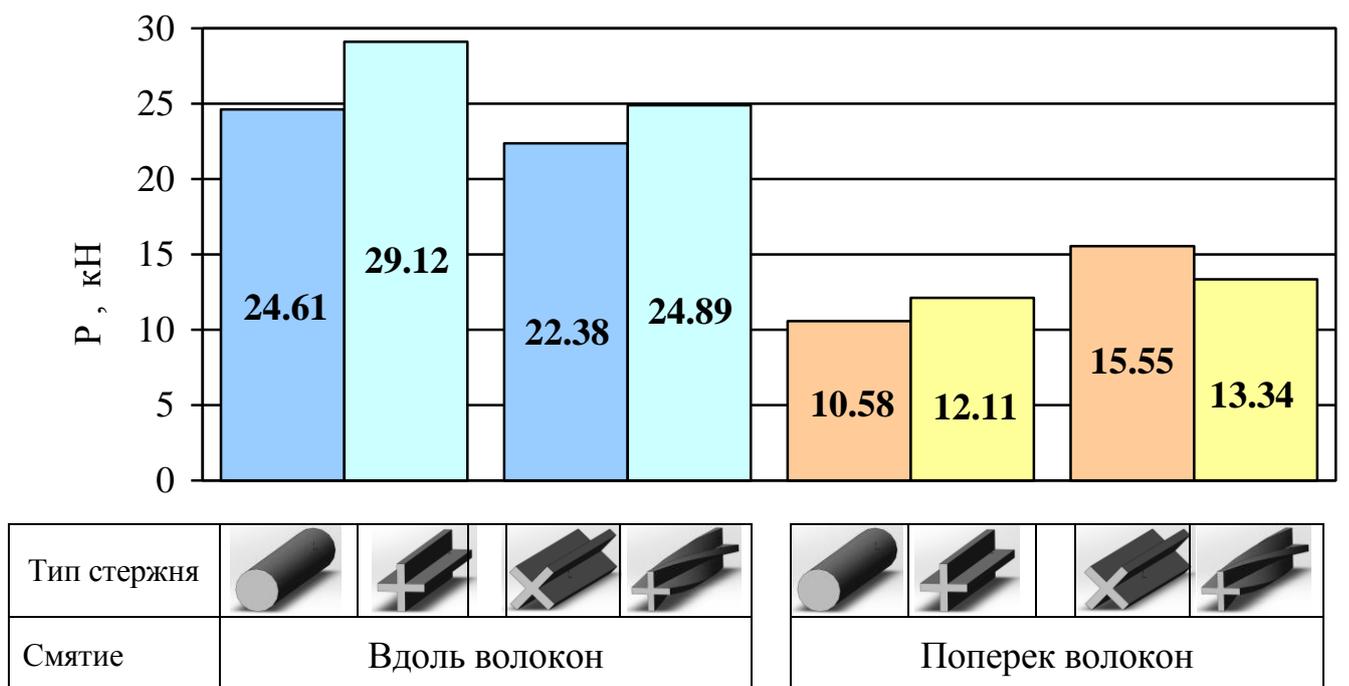


Рисунок 1 – Нагрузка для перемещения на 1 мм жестких штампов $d=12$ мм различного типа в массиве древесины толщиной $5d$

сделать вывод о незначительном влиянии ориентации ребер по отношению к волокнам на поверхности внедрения стержня на величину сминающей нагрузки. Максимальное расхождение значений нагрузки при деформации в 1 мм в зависимости от ориентации ребер $\alpha_{вн}=0^0$ и $\alpha_{вн}=45^0$ составляет 4,7 % при смятии древесины, как вдоль волокон, так и поперек.

При определении зависимости между сопротивлением древесины при ее сжатии и при ее смятии при различных габаритных размерах жесткого витого штампа была принята гипотеза, что такую известную зависимость для цилиндрических нагелей можно применить для исследуемого случая, но с введением соответствующих корректировочных коэффициентов. Значения этих коэффициентов определяли по результатам численных и экспериментальных данных через величины условных напряжений, возникающих при смятии древесины в отверстии:

$$\sigma_{см} = \frac{N}{dc}, \text{ МПа} \quad (1)$$

где N – нагрузка, Н; d – габаритный размер штампа, мм; c – толщина бруса, мм.

Испытание на смятие осуществляли путем нагружения выступающих концов штампов через металлические тяги. Фрагменты испытания образцов при смятии древесины в отверстии вдоль и поперек волокон показан на рисунке 2.

Данные о соотношении $\sigma_{см}/R_c$ при различных габаритных размерах штампа при смятии вдоль и поперек волокон, полученные по итогам численных и экспериментальных исследований, приведены в таблице 1.

Сравнительный анализ результатов численных и экспериментальных исследований работы древесины при ее смятии в отверстии стержнями цилиндрической формы и стержнями витой формы крестообразного поперечного сечения

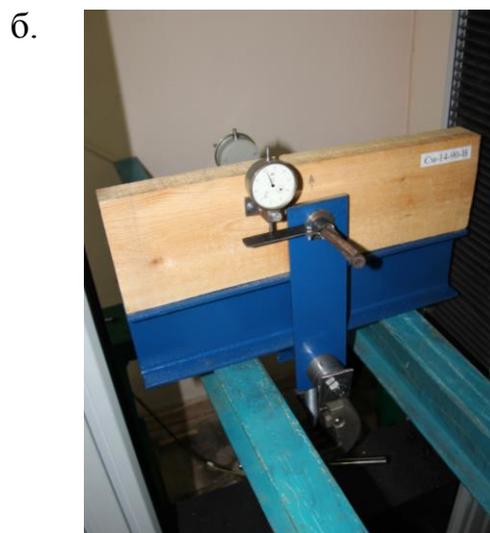


Рисунок 2 – Фрагмент испытания на равномерное смятие древесины в отверстии штампом: а - вдоль волокон, б – поперек волокон

Таблица 1 – Результаты численных и экспериментальных исследований смятия древесины в отверстии витыми крестообразными стержнями.

Отношения	Габаритный размер стержня d , мм							
	10		12		16		20	
	Числ.	Эксп.	Числ.	Эксп.	Числ.	Эксп.	Числ.	Эксп.
Смятие вдоль волокон								
$\sigma_{CM}^{цил} / R_C$	0,829	0,802	0,812	0,784	0,795	0,759	0,776	0,736
$\sigma_{CM}^{вит} / R_C$	0,835	0,746	0,821	0,732	0,813	0,721	0,806	0,694
Смятие поперек волокон								
$\sigma_{CM.90}^{цил} / R_C$	0,372	0,355	0,349	0,332	0,319	0,302	0,298	0,281
$\sigma_{CM.90}^{вит} / R_C$	0,459	0,409	0,440	0,384	0,407	0,351	0,387	0,330

позволяет судить о том, что показатели, полученные по результатам численных исследований, выше экспериментальных величин: для цилиндрических стержней на 3,3-5,2 % – при смятии вдоль волокон, на 4,6-5,7 % – при смятии поперек волокон; для витых крестообразных стержней на 9,8-13,9 % – при смятии вдоль волокон, на 10,9-14,7 % – при смятии поперек волокон. Существенные расхождения результатов численных и экспериментальных исследований древесины при ее смятии в отверстии витыми крестообразными стержнями обусловлены тем, что при внедрении рассматриваемых стержней в массив древесины происходит разрыв волокон, а также смятие древесины при вращении стержня по мере его внедрения. Вышеперечисленные особенности внедрения витого крестообразного стержня снижают плотность его контакта с древесиной, что, безусловно, оказывает влияние и на смятие древесины в отверстии.

Результаты сравнительного анализа экспериментальных исследований работы древесины при ее смятии в отверстии цилиндрическими стержнями и витыми крестообразными показали, что значения временных сопротивлений смя-

тию вдоль волокон штампами витой формы крестообразного поперечного сечения ниже, чем цилиндрическими штампами на 5,7-7,0 %, при смятии поперек волокон выше на 15,2-17,4 %. Это позволило определить значения корректировочных коэффициентов для определения расчетного сопротивления древесины смятию под витым крестообразным стержнем, которые приняты $k = 0,9$ – при смятии вдоль волокон и $k_{90} = 1,15$ – при смятии поперек волокон.

Комплексная оценка влияния различных факторов на смятие древесины в отверстиях витыми крестообразными стержнями была выполнена с использованием методик математического планирования эксперимента. В результате выявлено, что наибольшее влияние на смятие древесины в отверстиях оказывают: габаритные размеры стержня, толщина деревянного элемента и способ его внедрения. Диапазон изменения габаритных размеров стержня 12–20 мм. Толщины деревянных элементов принимались в интервале 50–125 мм. При проведении исследований рассматривались огнестрельный способ внедрения стержней при помощи монтажного пистолета ПЦ-81 и вручную при помощи молота.

По результатам исследований определено, что наибольшее влияние на значение условных напряжений оказывают габаритные размеры используемого стержня (максимальная разница значений: 12,5 % при смятии вдоль волокон, 20,7 % – при смятии поперек). Влияние толщин деревянных элементов – незначительно (при смятии древесины вдоль волокон – 5,3 %, при смятии поперек – 5,7 %). При использовании механического способа забивки несущая способность древесины при ее смятии в отверстиях витыми крестообразными стержнями меньше, чем при использовании огнестрельного способа на 10,2...14,9 %.

По результатам численных и экспериментальных исследований определено и доказано, что значения временных сопротивлений древесины смятию в отверстиях витыми крестообразными стержнями вдоль волокон могут быть определены аналогично цилиндрическим нагелям по формуле:

$$R_{CM}^{BP} = 0.8R_C^{BP} (1.1 - 0.11d) \times k \times k_{заб} \quad , \quad \text{МПа} \quad (2)$$

где k – коэффициент, учитывающий витую форму и крестообразное поперечное сечение стержня, $k = 0,9$;

$k_{заб}$ – коэффициент, учитывающий способ внедрения витого крестообразного стержня в массив древесины:

$k_{заб} = 1,0$ – при огнестрельном способе забивки;

$k_{заб} = 0,85$ – при механическом способе забивки

При смятии древесины витыми крестообразными стержнями поперек волокон:

$$R_{CM.90}^{BP} = 0.1R_C^{BP} \left(1 + \frac{2.5}{d^{0.55}} \right) \times k_{90} \times k_{заб} \quad , \quad \text{МПа} \quad (3)$$

где k_{90} – коэффициент, учитывающий витую форму и крестообразное поперечное сечение стержня, $k_{90} = 1,15$.

Теоретическим исследованиям соединений, выполненных с использованием витых крестообразных стержней, посвящена **третья глава** диссертации. При изучении фактического НДС соединений усиливаемых конструкций были решены следующие задачи: в существующей методике расчета соединений выявлены параметры, на которые оказывает влияние использование предложенных стержней; определены прочностные и деформативные характеристики односрезных и двусрезных соединений усиливаемых конструкций на витых крестообразных стержнях и изгибаемой балки, усиленной путем увеличения поперечного сечения; на основе результатов численных исследований сформулированы основные положения практического расчета предложенного способа усиления на витых крестообразных стержнях. В качестве основного инструмента исследований принят экспериментально-теоретический метод, при котором проводится численный анализ НДС рассматриваемых соединений, и вводятся корректирующие коэффициенты, тщательно выверенные экспериментально.

Несущая способность односрезных соединений на стальных витых крестообразных стержнях может быть определена по аналогии с цилиндрическими нагельными из условий смятия древесины элементов по формулам:

$$T_a^{BP} = k_a a d R_{CM,a}^{BP} , \quad (4)$$

$$T_c^{BP} = k_c c d R_{CM,c}^{BP} , \quad (5)$$

где $R_{CM,a}^{BP}, R_{CM,c}^{BP}$ – соответственно, временные сопротивления смятию древесины в гнездах для элементов с толщинами a и c ;
 k_a, k_c – числовые коэффициенты, характеризующие степень использования нагельного гнезда в каждом элементе;
 d – габаритные размеры стержня.

Для общего случая, когда $a \neq c$, при $\delta_{cm}^n / \delta_{cm}^y = \infty$ числовые коэффициенты в (4) и (5) определяют по формулам:

$$k_a = \frac{-(1 + \frac{1}{n}) + \sqrt{(1 + \frac{1}{n})^2 + (1 + m)(1 + \frac{1}{mn^2})}}{1 + m} , \quad (6)$$

$$k_c = \frac{-(1 + n) + \sqrt{(1 + n)^2 + (1 + \frac{1}{m})(1 + n^2 m)}}{1 + \frac{1}{m}} , \quad (7)$$

$$\text{где } m = \frac{R_{CM,a}^{BP}}{R_{CM,c}^{BP}}; \quad n = \frac{a}{c}.$$

Использование в качестве соединительного элемента витых крестообразных стержней будет учитываться в формулах (4) – (7) при определении значений временных сопротивлений древесины смятию в отверстиях $R_{CM,a}^{BP}$ и $R_{CM,c}^{BP}$ по формулам (2), (3), полученным во второй главе.

Предельная несущая способность односрезных соединений из условия изгиба соединительного элемента определяется по формуле:

$$T_{II} = k_{II} \cdot d^2 \cdot \sqrt{R_{CM}^{BP} \cdot \sigma_T} \quad , \quad (8)$$

где k_{II} – числовой коэффициент, определяемый схемой исчерпания прочности соединения с образованием по длине стержня пластических шарниров;
 σ_T – предел текучести стали стержня;
 R_{CM}^{BP} – временное сопротивление древесины смятию в нагельном гнезде вдоль волокон.

Значение коэффициент k_{II} для витых крестообразных стержней определяют аналогично цилиндрическим; в общем виде его можно представить в виде функции:

$$k_{II} = f(a; c; d; R_{CM.a}^{BP}; R_{CM.c}^{BP}; \sigma_T; M_{nl}) ,$$

где M_{nl} – предельный пластический момент поперечного сечения стержня.

При этом максимальное значение числового коэффициента k_{II} определяют из условия работы стержня на изгиб при избыточном защемлении стержня в обоих соединяемых элементах, характеризующимся образованием двух зон пластических деформаций. Минимальное его значение обуславливается образованием зоны пластических деформаций в одном из элементов при равномерном распределении напряжений смятия вдоль стержня в другом, что соответствует наиболее невыгодному случаю работы стержня на изгиб.

Аналогичные выкладки применимы и для двусрезных соединений.

Для объективной оценки напряженно-деформированного состояния одно- и двусрезных соединений и определения степени влияния ориентации ребер по отношению к волокнам были проведены численные исследования в ПК «Ansys». Были созданы конечно-элементные твердотельные трехмерные модели экспериментальных соединений на витых крестообразных стержнях по аналогии со второй главой. При проведении исследований односрезных соединений рассматривались комбинации различных толщин соединяемых элементов (см. таблицу 2).

Таблица 2 – Комбинации толщин деревянных элементов односрезных соединений

Толщины элементов	Номер комбинации толщин элементов				
	1	2	3	4	5
с	100	100	150	100	150
а	50	75	75	100	100

Значения несущей способности односрезных соединений при перемещении деревянного элемента с меньшей толщиной a на 1 мм для различных комбинаций толщин соединяемых элементов приведены на рисунке 3.

По результатам исследований витой крестообразный стержень занимает промежуточное положение между прямолинейным крестообразным стержнем с ориентацией ребер $0^{\circ}(90^{\circ})$ и 45° , как с точки зрения смятия древесины в отверстии, так и с точки зрения прочности и жесткости самого тела стержня в зоне об-

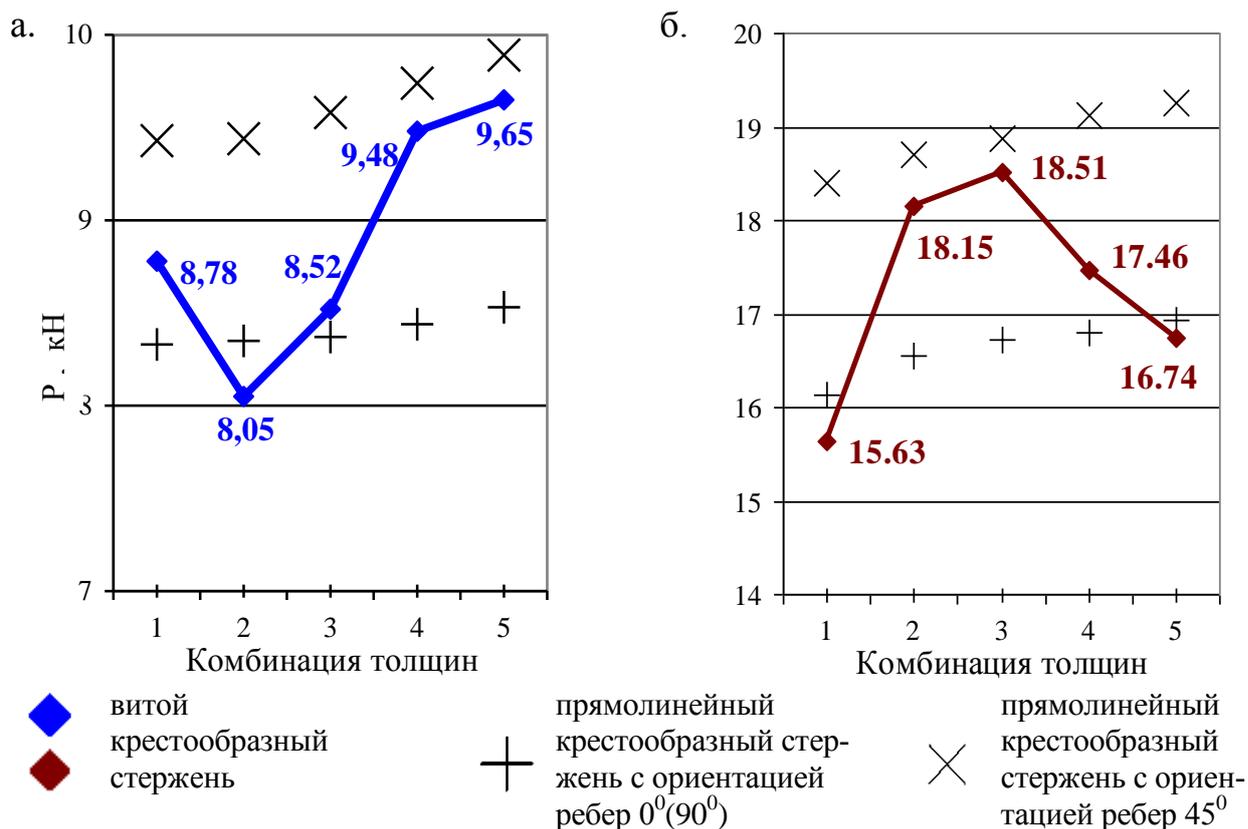


Рисунок 3 – Несущая способность односрезовых соединений на витых стержнях с габаритными размерами: а – 10 мм, б – 16 мм

разования пластических деформаций. Однако, несущая способность соединений, выполненных с использованием витых крестообразных стержней, может оказаться ниже в сравнении с использованием прямых стержней. Данный факт объясняется тем, что при использовании стержней различных габаритных размеров и различных комбинаций толщин деревянных элементов возможно сочетание неблагоприятной ориентации ребер, как с точки зрения смятия древесины в отверстиях (на поверхности сплачивания элементов), так и с точки зрения изгиба стержня (в зоне образования пластических деформаций).

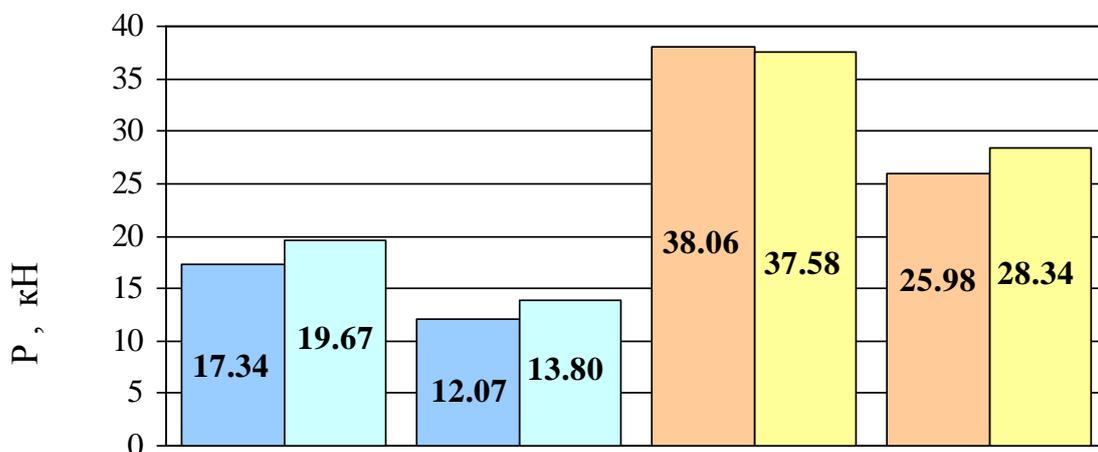
Учитывая сложность определения конкретного местоположения зоны образования пластических деформаций для всего многообразия возможных соединений, для витых крестообразных стержней является целесообразным в расчетах в качестве геометрических характеристик сечения витого стержня крестообразного поперечного сечения, зачастую в некоторый запас прочности, принимать минимальные значения пластического момента сопротивления $W_{пл}$ крестообразного поперечного сечения, что соответствует ориентации ребер 0°(90°).

При проведении численных исследований НДС двусрезовых соединений были разработаны два типа твердотельных трехмерных моделей. Для модели первого типа характерно использование трех деревянных элементов, в которых нагрузка прикладывается вертикально по направлению вдоль волокон, как для среднего, так и для крайних элементов. Модель второго типа отличается тем, что направление вертикальной нагрузки соответствует ориентации вдоль волокон для среднего элемента и поперек волокон для крайних элементов. При проведе-

нии исследований рассматривались двусрезные соединения со следующими комбинациями толщин деревянных элементов: комбинация 1 – $c=100$ мм, $a=65$ мм; комбинация 2 – $c=150$ мм, $a=100$ мм.

Несущая способность двусрезных соединений на витых крестообразных стержнях, определенная численными методами, приведена на рисунке 4. Результаты численных исследований двусрезных соединений на витых крестообразных стержнях модели первого типа так же (как и для односрезных соединений) подтверждают значительный разброс значений их несущей способности, что так же объясняется неблагоприятным сочетанием ориентации ребер у плоскости сплачивания элементов и в зоне образования пластических деформаций.

Выявлена разница в значениях несущей способности двусрезных соединений моделей первого и второго типов. Данный факт объясняется тем, что сопротивление древесины смятию в отверстии вдоль волокон выше, чем при смятии поперек волокон, что так же подтверждается выводами по результатам исследований, выполненных во второй главе, а также формулами (2), (3).



Комбинация толщин	1	2	1	2	1	2	1	2
Тип модели	1		2		1		2	
Габаритные размеры дмм	10				16			

Рисунок 4 – Несущая способность двусрезных соединений

В рамках третьей главы проведены численные исследования НДС изгибаемой составной однопролетной шарнирно опертой балки, усиленной при помощи соединительных связей в виде витых крестообразных стержней. Размеры балки соответствовали экспериментальным образцам и составили: поперечное сечение усиливаемого элемента – $94 \times 145(h)$ мм, элемента усиления $94 \times 95(h)$ мм, длина балки – 3000 мм, стержни с габаритными размерами 12 мм общей длиной 240 мм, шаг стержней – 120 мм, при этом в средней зоне балки на участке длиной $0,2l = 600$ мм установка стержней не предусматривалась. Нагрузка $q=5,0$ кН/м задавалась равномерно-распределенной по верхней грани элемента усиления.

По результатам численных расчетов определено, что максимальное значение прогиба в середине пролета составляет $f=8,14$ мм, значение величины сдвига

элемента усиления относительно усиливаемого элемента составило $\delta = 0,59$ мм. По полученным изополям (рисунок 5,а) была построена эпюра распределения нормальных напряжений по высоте поперечного сечения балки в середине пролета (рисунок 5,б), анализ которой позволил выявить скачок значений напряжений в зоне контакта элемента усиления с усиливаемым элементом. Данный скачок обусловлен тем, что дискретные механические связи не обеспечивают работу составной конструкции как монолитной и обладают податливостью.

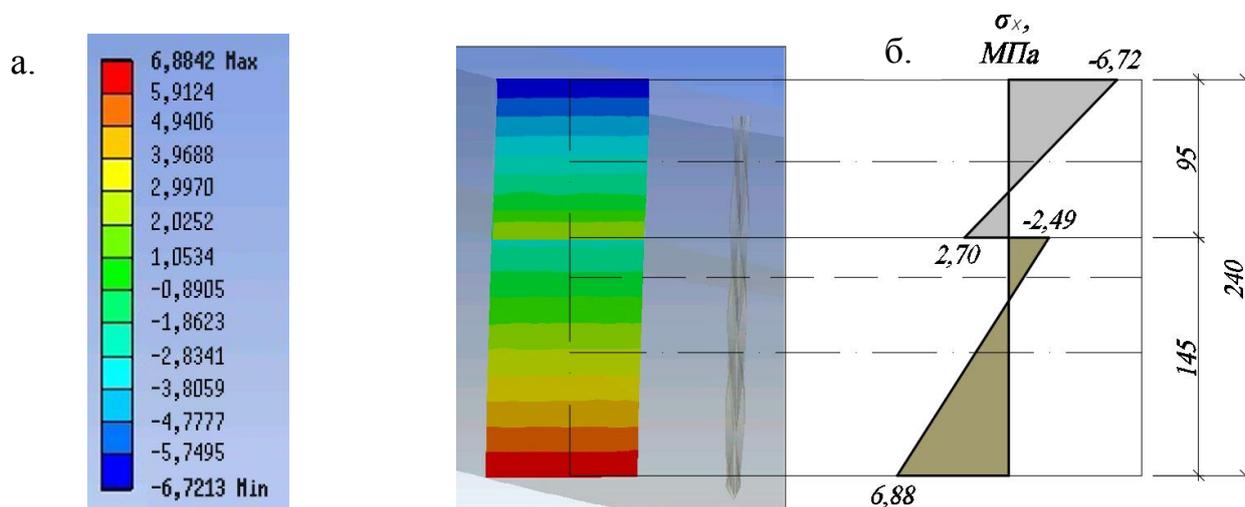


Рисунок 5 – Изополя нормальных напряжений в середине пролета по поперечному сечению балки (а) и эпюра нормальных напряжений (б)

С целью изучения действительной работы предлагаемого способа усиления деревянных конструкций, выявления степени достоверности результатов численных исследований, обоснованности усовершенствованных методик расчета были проведены испытания одно- и двусрезных соединений, а также составных балок на витых крестообразных стержнях. Всего было испытано 108 соединений (зачетные эксперименты) и четыре балки длиной 3,0 м. Кратковременным испытаниям были подвержены все изготовленные соединения и балки, на действие длительных нагрузок была испытана одна балка Б-4. Методика и анализ результатов экспериментальных исследований приведены в **четвертой главе**.

Испытываемые соединения изготовлены с использованием витых крестообразных стержней с габаритными размерами 10 мм и 16 мм. Геометрические размеры деревянных элементов при проведении эксперимента назначались такими же, как при проведении численных исследований. Для обеспечения симметричности приложения нагрузки односрезные соединения испытывались парами, т.е. одно испытание объединяло два идентичных соединения (в зачет шел один опыт). В остальном конструкция образцов полностью соответствовала стандартным схемам испытания нагельных соединений.

Конструкция опытных образцов соединений показана на рисунке 6, схемы их разрушения – на рисунке 7. Разрушение соединений происходило из-за изгиба стержня, при этом оно сопровождалось обмятием древесины гнезд и образованием одной или двух (односрезные соединения) и одной или четырех зон пластических деформаций в стержнях в рамках исследуемых комбинаций толщин.

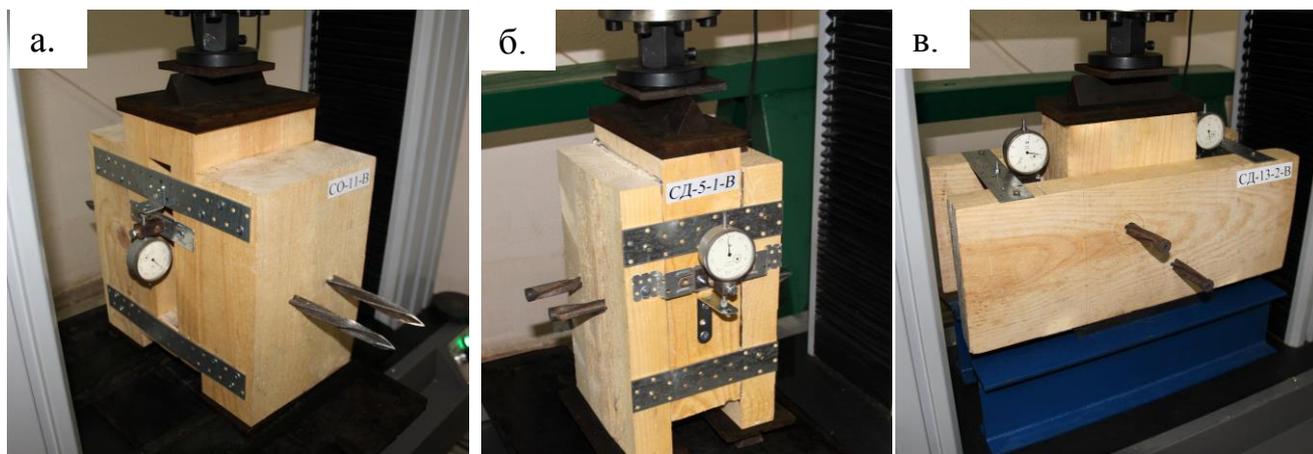


Рисунок 6 – Конструкция опытных образцов соединений

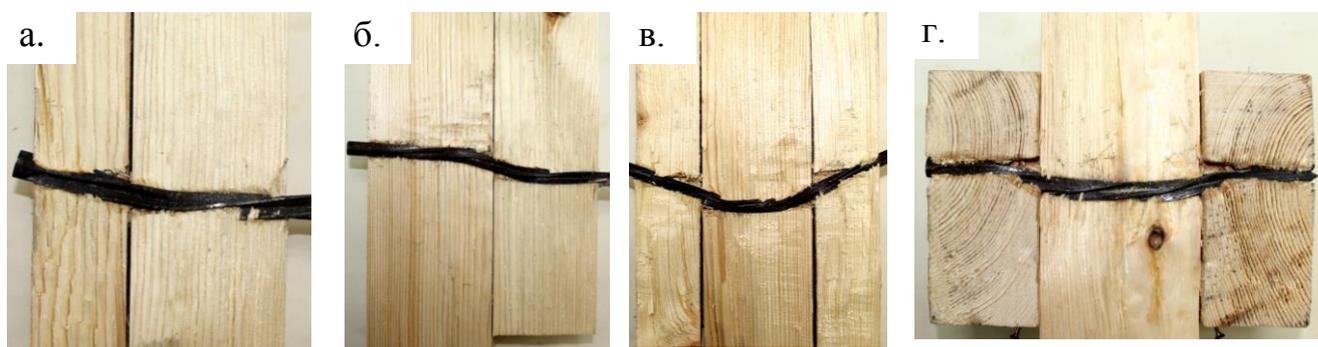


Рисунок 7 – Характер разрушения односрезных (а, б) и двусрезных (в, г) соединений

Сравнительный анализ результатов экспериментальных и численных исследований показал, что значение несущей способности моделей односрезных соединений выше несущей способности натуральных образцов на 6–17 %, при этом расхождение между экспериментальными и практическими расчетами не превысило 8,2 %. Данные расхождения объясняются тем, что модели в численных исследованиях являются идеализированными и не учитывают такие факторы, как разрыв и обмятие древесины в зоне внедрения витого крестообразного стержня в массив, а в практических расчетах введена фактическая величина R_{CM} , полученная с учетом экспериментальных параметров, приведенных во второй главе.

В рамках экспериментальных исследований также были проведены испытания изгибаемых балок при их усилении путем увеличения поперечного сечения при кратковременном и при длительном действии нагрузок. Для получения действительной картины работы исследуемых балок под нагрузкой при проведении испытаний измеряли прогибы балок в середине и третях пролета (прогибомеры 6ПАО-ЛИСИ), осадки опор и взаимное смещение верхней и нижней балок по шву сплачивания у торцов, в третях и в середине пролета (индикаторы часового типа с ценой деления шкалы 0,01мм); фибровые деформации древесины в середине пролета балки (микропроцессорная многоканальная тензометрическая система ММТС-64 и тензорезисторы с базой 12 мм). Всего на каждой испытываемой балке было установлено 14 тензорезисторов, 3 прогибомера, 12 индикаторов с ценой деления 0,01 мм.

Нагружение балок производили до расчетных нагрузок ступенями, равными $0,2 P_{расч}$. Нагрузка на балку передавалась посредством насосной станции, подключенной к двум параллельно работающим домкратам, и двумя траверсами, при помощи которых усилие от домкрата передали на балку в виде сосредоточенных сил в четырех точках, расположенных равномерно по длине балки. После трехкратного испытания балок расчетными нагрузками конструкции доводили до разрушения. Всего было проведено 15 испытаний.

При проведении испытаний на действие длительной нагрузки для сопоставления с результатами кратковременных испытаний схема приложения нагрузки, комплектность и расстановка механических приборов при кратковременных и длительных испытаниях были полностью идентичны. Нагружение балки осуществляли непрерывно до достижения нагрузки расчетной величины.

В процессе испытаний прогибы балок Б-1, Б-2, Б-3 и Б-4, как в третях, так и в середине пролета увеличивались пропорционально росту нагрузки, при этом разница в значениях деформаций у четырёх балок не превышала 9,0 %. При достижении нагрузкой расчетной величины ($P=3,0$ кН, эквивалентная погонная нагрузка $q_{экв}=5,0$ кН/м) максимальные значения прогибов в середине пролета составили 9,60 мм или $1/302$ от расчетного пролета. При нормативном значении ($P=2,5$ кН, $q_{экв}=4,2$ кН/м) эти величины соответственно были равны 8,25 мм и $1/352L$. Также пропорционально росту нагрузки происходило увеличение горизонтальных взаимных смещений верхнего и нижнего брусьев, замеренных как на опорах, так и третях пролета. Этот факт также свидетельствует об упругой работе балки в пределах расчетных нагрузок. При расчетной нагрузке максимальная величина этого смещения составила 0,71 мм.

Значение прогиба в середине пролета, определенного по программе «Ansys», при действии расчетной нагрузки с учетом податливости связей составило 8,9 мм, что на 7,3 % меньше экспериментального показания. В условиях испытания реальной конструкции этот факт подтверждает адекватность разработанной расчетной модели.

Характер распределения нормальных напряжений по высоте сечения в середине пролета балки показан на рисунке 8.

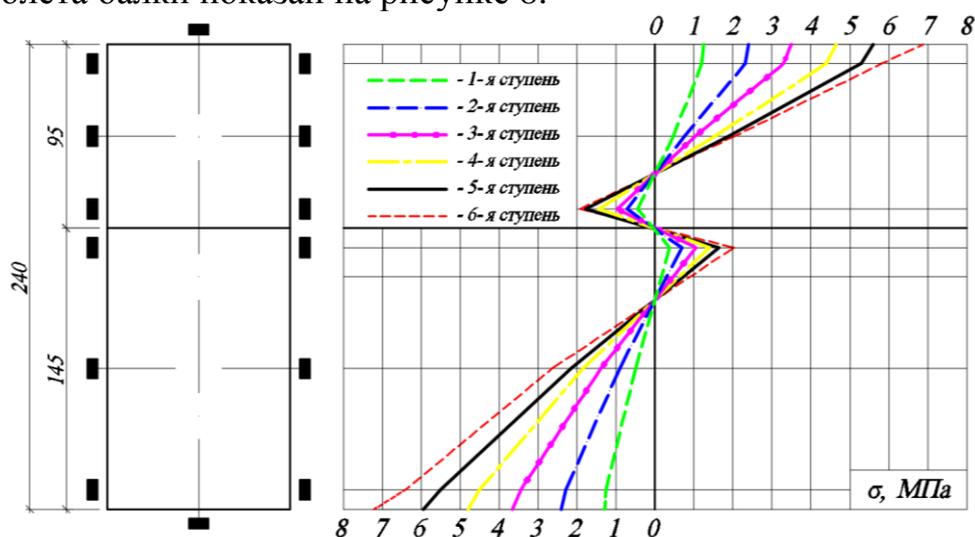


Рисунок 8 – Характер распределения нормальных напряжений по высоте сечения в середине пролета балки

Как видно из рисунка, соединительные связи в виде витых крестообразных стержней практически сразу включаются в работу балки. Однако это включение не обеспечивает работу конструкции как монолитной и приводит к скачку в значениях нормальных напряжений по линии сплачивания брусьев. Такая картина распределения напряжений полностью соответствует теории расчета составных стержней, когда из-за податливости связей наблюдается увеличение значений напряжений в крайних волокнах в сравнении с балками цельного поперечного сечения. Одновременно величины напряжений меньше соответствующих расчетных значений для балок-пакетов, что подтверждает эффективную работу связей. Разница в теоретических и экспериментальных значениях нормальных напряжений по высоте поперечного сечения балки в характерных точках составляют 2,5 % до 11,6 %.

Опытная конструкция балки Б-1 разрушилась при нагрузке $P=13,0$ кН. Коэффициент безопасности по нормальным напряжениям составил 2,4 при требуемой величине 2,37. Процесс разрушения как балки Б-2, так и балки Б-3, был идентичным. Разрушающая нагрузка для балки Б-2 составила $P=12,5$ кН. Балка Б-3 разрушилась при нагрузке $P=9,5$ кН (коэффициент безопасности $K_{xp}=1,98$). Снижение разрушающей нагрузки в сравнении с балками Б-1 и Б-2 связано с тем, что в середине пролета балки имел место сучок с характерным отклонением волокон древесины от продольной оси балки. При этом величины смещения торцов брусьев были сопоставимы с этими же величинами у балок Б-1 и Б-2.

Полученные коэффициенты безопасности в целом для условий испытаний натуральных конструкций можно считать достаточными для гарантии эксплуатационной надежности предложенного способа усиления.

Балка Б-4 после трехкратных испытаний до расчетных нагрузок была выдержана в течении 10 суток и поставлена на длительные испытания (28.11.2016 г.). Опытная конструкция была выдержана под расчетной нагрузкой $P=3,0$ кН в течении 120 суток.

Наиболее интенсивное нарастание прогиба балки в третях и в середине пролета (рисунок 9) наблюдалось в первые 10 суток, в следующие 15 суток скорость нарастания деформаций заметно падала, а в последние 95 суток испытаний значение прогиба практически не изменялось (приращение в пределах 6 %).

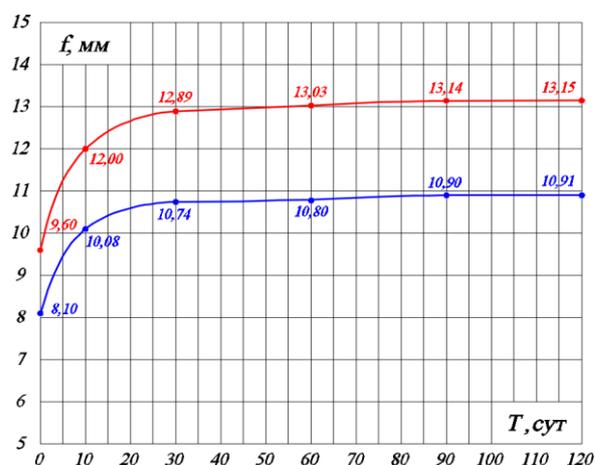


Рисунок 9 – Общий вид балки при длительных испытаниях и график нарастания прогибов балки в середине и в третях пролета с течением времени

Максимальный прогиб в середине пролета за период наблюдений составил 13,15 мм или 1/221 пролета, таким образом, возрос по сравнению с кратковременным в 1,37 раза. Характер изменения деформаций, полученных в ходе эксперимента, позволяет сделать вывод о том, что деформативность балки подчиняется обычным временным закономерностям изменения прочности древесины при длительном действии нагрузок, которые могут быть записаны затухающей экспонентной зависимостью. В целом характеристики деформативности опытной конструкции не превысили предельно допустимых значений и хорошо сопоставимы с проведенными работами в области составных деревянных конструкций на стальных стержнях, которые можно рассматривать как аналог предлагаемому способу усиления на основе витых крестообразных стержней.

В пятой главе определена область применения и рассмотрены рациональные варианты усиления деревянных конструкций с использованием витых крестообразных стержней, изложены указания по конструированию, расчету и производству работ по усилению. Особенностью пошагового алгоритма расчета предлагаемого способа усиления является учет фактических физико-механических характеристик древесины, определение расчетных геометрических характеристик усиливаемой конструкции как приведенного составного поперечного сечения и расчет на прочность по нормальным напряжениям и жесткость с учетом податливости предложенного типа связей.

Проведенный сравнительный технико-экономический анализ на различных примерах усиления деревянных конструкций подтвердил целесообразность использования витых стальных крестообразных стержней, при этом в сравнении с традиционными типами связей в виде стальных цилиндрических нагелей достигается снижение трудоемкости работ на 18-27 %, общей стоимости усиления на 16-30 %, общего веса элементов на 5-21 % в зависимости от типа усиливаемых конструкций.

Итоги выполненного исследования

1. Разработан новый способ усиления деревянных конструкций при помощи стальных стержней крестообразного поперечного сечения, отличающийся от известных аналогов простотой внедрения стержней в массив древесины и сниженной материалоемкостью.

2. Экспериментально-теоретические исследования напряженно-деформированного состояния соединения древесины со стержнями крестообразного поперечного сечения, в том с применением программного комплекса Ansys, по разработанной авторской методике позволили определить нормативные характеристики древесины при её смятии в отверстиях предложенными типами стержней в зависимости от ориентации волокон древесины по отношению к направлению сминающей силы, габаритных размеров стержня и способа его внедрения в массив древесины. При этом проведенные эксперименты выявили существенное влияние на НДС древесины таких реальных факторов как разрыв волокон, а также смятие древесины от вращения стержня при его внедрении, что невозможно было выявить в численных расчетах.

3. Анализ напряженно-деформированного состояния одно- и двусрезных соединений усиливаемых конструкций и изгибаемых составных балок на предложенных типах связей, выполненный на базе проведенных численных исследований, позволил подтвердить возможность применения к рассматриваемому способу усиления методики расчета узлов на цилиндрических нагелях, при этом необходимо учитывать степень влияния на прочность соединения полученной величины расчетного сопротивления смятия древесины под витым крестообразным стержнем, фактическое значение предела текучести примененной стали, а также геометрические характеристики крестообразного витого соединительного элемента.

4. В результате проведенных экспериментальных исследований разработанных вариантов одно- и двусрезных соединений усиливаемых деревянных элементов, а также натуральных изгибаемых балок составного поперечного сечения, усиленных при помощи предложенных типов соединительных элементов выявлены:

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

– возможность применения для расчета предложенного способа усиления деревянных конструкций стандартного программного комплекса «Ansys», при этом полученные значения экспериментальных деформаций, которые превышают теоретических данных на 6...17 % в зависимости от рассчитываемого типа соединения, объясняются идеализированной расчётной схемой и особенностями реального изготовления соединений, что необходимо учитывать в практических расчетах соответствующими корректировочными коэффициентами;

- характер разрушения соединений и конструкций на витых крестообразных стержнях, связанный с изгибом стержня с образованием одной, двух (односрезные соединения) или трех, четырех (двусрезные соединения) зон пластических деформаций с частичным смятием древесины на концах стержня и по шву сплачивания соединяемых элементов, полностью соответствует предпосылкам теоретического расчета и результатам численных исследований и подтверждает их корректность и обоснованность.

5. Разработанный способ усиления деревянных конструкций с использованием витых стержней крестообразного поперечного сечения обладает необходимой степенью прочности и жесткости, в том числе при длительном действии нагрузок, и может быть рекомендован к применению в строительной практике.

6. На основе результатов экспериментально-теоретических исследований при действии кратковременных и длительных нагрузок усовершенствована методика расчета и разработаны рекомендации по конструированию и расчету усиления деревянных конструкций с применением витых стальных стержней крестообразного поперечного сечения. Достоверность основных положений методики и рекомендаций базируется на достаточном объеме экспериментальных данных, полученных с использованием современных измерительных приборов, испытательных машин и оснастки; на рациональном факторном анализе переменных параметров, позволившем получить более полные по количественным и качественным параметрам результаты исследований.

7. Проведенный сравнительный технико-экономический анализ на различных примерах усиления деревянных конструкций подтвердил целесообразность использования витых стальных крестообразных стержней, при этом в сравнении с традиционными типами связей в виде стальных цилиндрических нагелей достигается снижение трудоемкости работ на 18-27 %, общей стоимости усиления на 16-30 %, общего веса элементов на 5-21 % в зависимости от типа усиливаемых конструкций.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Теоретические и экспериментальные результаты выполненной работы позволяют автору сформулировать дальнейшие направления по развитию темы диссертации:

- исследование возможности применения и особенностей использования витых крестообразных стержней, изготовленных из конструкционных пластмасс, в соединениях деревянных конструкций, в том числе при эксплуатации в химически агрессивных средах;

- совершенствование технологии заводского изготовления витых стержней крестообразного поперечного сечения;

- исследование особенностей напряженно-деформированного состояния соединений с витыми стержнями крестообразного поперечного сечения, введенными в массив древесины под углом к волокнам, по аналогии с вклеенными арматурными стержнями;

- проектирование различных типов сплошных, сквозных, плоских и пространственных деревянных конструкций с применением витых крестообразных стержней.

Основные положения диссертации опубликованы:

– в изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. *Аркаев, М.А.* Стальной крестообразный стержень – универсальный элемент для соединений деревянных конструкций / *М.А. Аркаев*, Г.А. Столповский // Вестник Оренбургского государственного университета. – Оренбург. – 2010. – №4. – С. 25.

2. *Аркаев, М.А.* Оценка напряженно-деформированного состояния соединений деревянных конструкций на витых стержнях численными методами / *М.А. Аркаев*, В.И. Жаданов, Г.А. Столповский, С.В. Лисов // Вестник Оренбургского государственного университета. – Оренбург. – 2012. – №4. – С. 258-262.

3. *Аркаев, М.А.* Способы усиления стержневых деревянных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений / *М.А. Аркаев*, Г.А. Столповский, К.В. Шмелев, М.И. Сергеев // Вестник Оренбургского государственного университета. – Оренбург. – 2013. – №5. – С. 158-163.

4. *Аркаев, М.А.* Оценка влияния конструктивных параметров витого стержня крестообразного поперечного сечения на его несущую способность при выдергивании / *М.А. Аркаев*, Г.А. Столповский, С.В. Лисов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2013. – №6. – С. 130-136.

5. *Аркаев, М.А.* Особенности расстановки витых стержней в узловых сопряжениях деревянных конструкций / *М.А. Аркаев*, В.И. Жаданов, Г.А. Столповский, В.Б. Зиновьев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2014. – №5. – С. 91-97.

6. **Аркаев, М.А.** Расчет односрезных соединений на витых крестообразных нагелях при усилении деревянных конструкций путем увеличения поперечного сечения / **М.А. Аркаев**, В.И. Жаданов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2017. – №2. – С. 92-100.

7. **Аркаев, М.А.** Усиление деревянных конструкций с использованием витых крестообразных нагелей / **М.А. Аркаев**, В.И. Жаданов, Г.А. Столповский // Промышленное и гражданское строительство. – 2017. – №5. – С. 23-29.

– **патенты РФ на изобретения:**

8. Патент РФ на изобретение № 2498026. Кл. Е 04 В 1/32. Арочная конструкция для покрытий зданий / Жаданов В.И., Дмитриев П.А., Михайленко О.А., **Аркаев М.А.** Опубл. 10.11.13. М.: Бюл. № 31. – 6 с.

9. Патент РФ на изобретение № 2535866. Кл. Е 04 С 2/10. Клеодощатая панель для сейсмостойкого строительства // Жаданов В.И., **Аркаев М.А.**, Украинченко Д.А., Лисов С.В., Столповский Г.А. Опубл. 20.12.14. М.: Бюлл. № 35. – 6 с.

– **в других изданиях:**

10. **Аркаев, М.А.** Актуальность разработки новых способов соединения деревянных строительных элементов в объеме магистерских диссертаций // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. Материалы Всероссийской научно-методической конференции; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург. – 2012. – С. 325-328.

11. **Аркаев, М.А.** Расширение области применения крестообразных витых нагелей в соединениях деревянных элементов / **М.А. Аркаев**, И.П. Пинайкин // Традиции и инновации в строительстве и архитектуре: материалы 69-й Всероссийской научно-технической конференции по итогам НИР 2011 года. Самарск. гос. арх.-строит.ун-т. – Самара. – 2012. – Ч.II. – С. 395-398.

12. **Аркаев, М.А.** Соединения деревянных конструкций на нагелях крестообразного поперечного сечения / **М.А. Аркаев**, В.И. Жаданов, Г.А. Столповский, С.В. Лисов // Вестник Одесской государственной архитектурно-строительной академии. – Одесса. – 2012. - №47. - часть 2. – С. 134-138.

13. **Аркаев, М.А.** Усиление деревянных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений (монография) / **М.А. Аркаев**, В.И. Жаданов, Г.А. Столповский, Д.А. Украинченко, С.В. Лисов // Оренбург: ООО ИПК «Университет». – 2012. – 176 с. ISBN 978-5-4417-0127-3.

14. **Аркаев, М.А.** Усиление деревянных конструкций при помощи витых нагелей крестообразного поперечного сечения / **М.А. Аркаев**, К.В. Шмелев, М.И. Сергеев // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. Материалы всероссийской научно-методической конференции. – Оренбург: ОГУ. – 2013. – С. 351-354.

15. **Аркаев, М.А.** Эволюция стальных стержней в соединениях элементов строительных конструкций / **М.А. Аркаев**, Г.А. Столповский, К.В. Шмелев // Актуальные проблемы строительного и дорожного комплексов: материалы международной научно-практической конференции. - Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет. – 2013. – С. 228- 232.

16. **Аркаев, М.А.** Особенности расчета соединения деревянных конструкций на витых крестообразных связях при действии длительных нагрузок / **М.А. Аркаев**, Г.А. Столповский, К.В. Шмелев // В сб.: Современные строительные конструкции из металла и древесины. - №17. – Одесса: ООО «Внешрекламсервис». – 2013. – С. 258-264.

17. **Аркаев, М.А.** Стальные винтовые стержни крестообразного поперечного сечения для соединения и ремонта элементов строительных конструкций / **М.А. Аркаев**, А.Ю. Огир // Международная научно-техническая конференция "Инновационные строительные технологии, теория и практика", посвященная 30-летию юбилею кафедры строительных конструкций ОГУ: материалы конференции. 24-25 октября 2013. – Оренбург. – 2013. – С. 35-40.

18. **Аркаев, М.А.** Развитие способов усиления деревянных конструкций / **М.А. Аркаев**, А.Ю. Огир // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. Материалы всероссийской научно-методической конференции. – Оренбург: ОГУ. – 2014. – С. 582-587.

19. *Аркаев, М.А.* Совершенствование механических связей нагельного типа в соединениях деревянных конструкций / *М.А. Аркаев*, Л.А. Муртазина, А.Ю. Огир, К.В. Шмелев // В сб.: Современные строительные конструкции из металла и древесины. – Одесса. – 2014. – №18. – С.20-23.

20. *Аркаев, М.А.* О недостатках механических связей нагельного типа в деревянных конструкциях / *М.А. Аркаев*, А.Ю. Огир // Строительная наука-2014: теория, образование, практика, инновации (посвящается 55-летию ИСиА САФУ): сборник трудов междунар. научно-техн. конф., г. Архангельск. – Архангельск. -2014. - С. 23-27.

21. *Аркаев, М.А.* Учет витой формы крестообразного нагеля в расчете балочных деревянных конструкций при их усилении путем увеличения поперечного сечения / *М.А. Аркаев*, В.И. Жаданов, А.Ф. Рожков // Строительная механика и расчет сооружений. – 2016. – №6. – С.55-59.

22. *Аркаев, М.А.* О необходимости восстановления и усиления строительных конструкций зданий жилого сектора / *М.А. Аркаев*, А.С. Медведев // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры [Электронный ресурс]: материалы Всероссийской научно-методической конференции. – Оренбург: ОГУ. – 2016. – С. 486-492.

23. *Аркаев, М.А.* Исследование напряженно-деформированного состояния древесины при ее смятии в отверстиях крестообразными витыми нагельными / *М.А. Аркаев*, В.И. Жаданов, В.Е. Афанасьев // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: Материалы VII международной научно-практической конференции. 13-14 октября 2016 года. – СПб. Изд-во Политехн. ун-та, 2017 – С.120-132.