

На правах рукописи

Водяников Михаил Алексеевич

**НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ
УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ НАГЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ
КОНСТРУКЦИЙ, РАБОТАЮЩИХ В АГРЕССИВНОЙ СРЕДЕ**

05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (ПНИПУ)

Научный руководитель

Кашеварова Галина Геннадьевна,
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РААСН

Официальные оппоненты:

Турков Андрей Викторович,
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой строительных
конструкций и материалов ФГБОУ ВО
«ОГУ имени И.С. Тургенева»

Погорельцев Александр Алексеевич,
кандидат технических наук,
заведующий лабораторией несущих
деревянных конструкций ЦНИИСК им.
В.А. Кучеренко (АО «НИЦ
«Строительство»)

Ведущая организация

ФГАОУ ВПО «Северный
(Арктический) федеральный
университет» г. Архангельск

Защита состоится 20 апреля 2020 г., в 17.00 на заседании диссертационного совета Д 218.005.05 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет транспорта» по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9 (7-й корпус РУТ (МИИТ) Минаевский пер. д.2, ауд. 7618).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте РУТ (МИИТ), www.miit.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д218.005.05
кандидат технических наук

Шавыкина М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Конструкции из цельной и клееной древесины нашли широкое применение во многих отраслях народного хозяйства. Опыт применения этих конструкций в зданиях и сооружениях химической отрасли насчитывает более ста лет и показывает не поддающиеся сомнению преимущества древесины. В условиях химической агрессии древесина применяется при возведении складов, галерей межцехового транспорта, стропил над зданиями назначения, так как ее эксплуатационные характеристики в таких условиях значительно выше в сравнении со стальными, каменными и армокаменными конструкциями. За весь обозримый период эксплуатации не выявлено ни одного случая аварии, связанного с химической коррозией древесины. В то же время узлы соединений деревянных конструкций, проектируемые сегодня в виде стальных болтов, пластин, нагелей, накладных деталей и прочих подвержены воздействию коррозии, что является наиболее частой причиной аварийных ситуаций.

Восстановление антикоррозионного слоя зачастую невозможно без остановки эксплуатации объекта. Применение в качестве материалов соединительных элементов армированных пластиков (в числе которых углеродные композиционные материалы), позволяет решить проблему коррозионного разрушения элементов стыка. Существует ряд ценных свойств таких материалов: высокая механическая прочность; модуль упругости, сопоставимый с модулем упругости древесины; легкость, устойчивость к высоким температурам, инертность к коррозионным процессам, простота механической обработки. В Российской Федерации в 2010 году ГК «Нанотех» выпущена Дорожная Карта «Использование нанотехнологий в производстве углеродных волокон и продуктов на их основе», отражающая структуру стратегического развития производства углеволокна и материалов на его основе. Однако, на практике применение композитных элементов в строительных конструкциях, в частности углепластиков, сдерживается, в связи с отсутствием корректных методов расчета и нормативной документации. Поэтому развитие теоретических положений расчета, обоснование экономической эффективности применения углеродных композитов, является актуальным и расширяет возможности применения возобновляемых природных материалов.

Степень разработанности темы. Особенности расчетов строительных конструкций из древесины, а также конструктивные схемы проектирования стыков с применением стальных соединительных элементов широко изучены. В России выдающиеся инженерные конструкции на основе клееной древесины и инженерные методики их расчета созданы И. П. Кулибиным, К. Д. Фроловым, Д. И. Журавским, В. Т. Шуховым, Г. Г. Карлсеном, А. Д. Захаровым, И. К. Коробовым и другими. Новые решения деревянных конструкций были применены в СССР при строительстве павильонов первой сельскохозяйственной выставки в 1923 г., а после – при возведении ЦАГИ имени профессора Н. Е. Жуковского в 1925-26 гг. Кроме того, многочисленные исследования стыков и узлов сопряжения деревянных конструкций выполнены силами таких институтов, как ВИАМ, ЦНИИСК, ЦАГИ, МИСИ, ЛИСИ, ВИА. Отдельного внимания заслуживают

работы и исследования советских и российских деятелей науки В. Н. Маслова, В. В. Большакова, Е. М. Знаменского, В. С. Деревягина, В. Ю. Щуко, М. Е. Кагана, В. А. Цапаева, В. Ф. Бондина, А. В. Лянина, В.И. Линькова, Б.В. Лабудина, К.П. Пятикрестовского и др.

Широко применимым видом жестких соединений клееных деревянных конструкций, применяемых в современной строительной практике большепролетных сооружений, являются узлы с наклонно вклеенными арматурными стержнями с применением сварки ввиду технологичности и относительной простоты сборки. Основная методика расчета таких узлов на сегодняшний день представлена в работах группы ученых под руководством С. Б. Турковского, и А. А. Погорельцева носит название «система ЦНИИСК». Основные положения по расчету и конструированию таких узлов приведены в СП 64.13330.2011 «Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80». Эта методика сводится к сравнению минимальной несущей способности стержня из условия смятия гнезда древесины или изгиба наиболее нагруженного из стержней, а способы определения усилий в нагелях для нахождения наиболее нагруженного стержня в нормативных документах не приводятся. Эта задача решается в данной диссертационной работе.

Цель диссертационной работы – разработка методики расчета несущей способности и деформативности нагельных соединений деревянных конструкций на углепластиковых стержнях, работающих в агрессивной среде большепролетных складов хранения калийной соли.

Задачи диссертационной работы:

1. Оценить влияние влажности и солесодержания по глубине сечения древесины на прочность клеёных деревянных конструкций складов хранения соли. Установить скорость развития коррозионных процессов в стальных элементах узлов сопряжения деревянных конструкций.

2. Провести лабораторные и вычислительные эксперименты бесклеевых нагельных соединений на сдвиг со стальными и углепластиковыми стержнями, работающими на изгиб, для сравнительного анализа характера разрушения стыков.

3. Разработать методику расчета несущей способности и деформативности конструкции деревянной балки со стыком на вклеенных углепластиковых нагелях, объединенных в единый узел при помощи композитных накладных деталей, учитывающую ортотропию клееной древесины и контактное взаимодействие элементов стыка.

4. Выявить влияние параметров элементов стыка на несущую способность и деформативность конструкции.

5. Провести вычислительные эксперименты и сравнительный анализ несущей способности и деформативности конструкций балок со стыком и без стыка.

6. Провести натурные испытания образцов балок из клееной древесины с применением углепластиковых нагелей и накладок до разрушения для экспериментального подтверждения теоретических результатов.

7. Выполнить оценку экономической эффективности применения углепластиковых элементов в узле в качестве альтернативы стальным элементам.

Научная новизна заключается в том, что:

1. Установлены параметры *солевого содержания* и *влажности* агрессивной газовой среды в большепролетных складах хранения соли и их влияние на жизненный цикл клееных деревянных конструкций. Выявлено, что снижение прочности древесины складов хранения соли от совокупного воздействия коррозионных факторов происходит в первые 10...15 лет эксплуатации и носит затухающий характер.

2. Определена скорость развития коррозии соединительных металлических элементов каркаса большепролетных арочных складов.

3. Получены зависимости напряженно-деформированного состояния конструкции балки с нагельным соединением от конструктивных параметров жесткого стыка (угол наклона, количество и расположение стержней).

4. Показано, что разрушение узла сопряжения в зависимости от нагрузки и конфигурации стыка происходит в связи с одним из следующих прогнозируемых факторов: потери прочности элементов соединения, проскальзывания (нарушения сцепления стержня и древесины), либо расслоения древесины стыка. Ширина раскрытия контактов и плотность сопряжения стыка соединяемых элементов зависит от размеров элементов стыка, величины и скорости приложения нагрузки.

5. Разработан алгоритм расчета прочности деревянных балок с жестким стыком на углепластиковых стержнях в пролете, эксплуатируемых в химически агрессивной газовой среде складов хранения соли. На основании алгоритма разработана вычислительная технология создания конечно-элементной модели конструкции, учитывающая ортотропию клееной древесины и контактное взаимодействие элементов стыка.

6. Доказана экономическая эффективность применения композитных деталей в качестве альтернативы стальным элементам при создании равнопрочных узлов.

Теоретическая и практическая значимость работы:

– установлено влияние параметров агрессивной среды большепролетных каркасов складов хранения соли на жизненный цикл элементов из древесины на углепластиковых связях;

– выявлены отличительные особенности работы стыков клеёных деревянных конструкций со стальными и углепластиковыми деталями под знакопеременными нагрузками в условиях химически агрессивной среды, и характер разрушения узлов сопряжения с использованием углепластиковых деталей.

– определены конструктивные особенности расположения углепластиковых стержней в узле сопряжения деревянных конструкций в зависимости от размеров образцов, величины и способа приложения нагрузки;

– разработан алгоритм и конечно-элементный метод расчета составной деревянной балки с жестким стыком в пролете, учитывающий контактное взаимодействие и разрушение элементов конструкции; создан программный модуль для расчёта на языке программирования APDL с применением CAD-ориентированного подхода.

Методология и методы исследования. В работе использованы теоретические и эмпирические методы исследования. Решения задач базируются на экспериментальных данных и известных теоретических положениях технологии и

расчета строительных конструкций зданий и сооружений, методах строительной механики, механики деформируемого твердого тела, математического моделирования, математической статистики и механики волокнистых композиционных материалов. Используются расчетные программные комплексы ANSYS, ANSYS Workbench, CAD-система AutoCAD.

На защиту выносятся:

1. Результаты прогнозирования прочностных показателей материалов клеёных деревянных конструкций, подтвержденные экспериментальными исследованиями влияния эксплуатационных факторов на длительную прочность, работающих в неблагоприятных условиях агрессивных сред (повышенной влажности, насыщении древесины солями магния и калия с учетом фактора времени).

2. Результаты лабораторных и вычислительных экспериментов бесклеевых нагельных соединений на сдвиг со стальными и углепластиковыми стержнями, работающими на изгиб, и сравнительный анализ характера разрушения стыков.

3. Вычислительная технология создания корректной расчетной модели конструкции деревянной балки с узловым нагельным соединением, учитывающая ортотропию клееной древесины, модели контактного взаимодействия элементов стыка и усовершенствованная методика расчета деревянных конструкций с углепластиковым нагельным соединением.

4. Результаты численного и экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния и сравнительного анализа конструкции деревянной балки со стыком на клеенных углепластиковых нагелях и балки без стыка, а также результаты оценки влияния конструктивных параметров стыка на несущую способность и деформативность конструкции в целом.

5. Результаты оценки эффективности замены стальных элементов на углепластиковые в равнопрочных нагельных соединениях конструкций, работающих в условиях агрессивной среды.

Степень достоверности и апробация результатов:

Достоверность результатов обеспечивается: базированием на доказанных и корректно использованных выводах фундаментальных и прикладных наук; сравнением результатов расчётов с экспериментальными данными, и данными расчетов по методикам, предлагаемым действующими нормативными документами, а также практическим опытом использования теоретических исследований. При проведении экспериментов достоверность результатов обеспечивалась применением современных поверенных и метрологически аттестованных приборов и оборудования, статистической обработкой данных и их сравнением с данными зарубежных и отечественных аналогов.

Апробация работы и публикации. Основные результаты диссертационного исследования были представлены на VIII, IX и X Всероссийских молодежных конференциях аспирантов, молодых ученых и студентов «Современные технологии в строительстве. Теория и практика» (г. Пермь, 2016-2018 гг.); Международной научной конференции «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений («Золотовские Чтения») (РААСН, г. Москва, 2018 г.); II международной научной конференции «International

Conference on Materials Engineering and Nanotechnology (ICMEN 2017)» (Куала-Лумпур, Малайзия, 2017 г.); IV международной научной конференции «International Conference on Chemical and Materials Engineering (ICCME 2017)» (Гавана, Куба, 2017 г.); IV международной научной конференции «International Conference on Composite materials and Material Engineering (ICCMME 2019)» (Токио, Япония, 2019 г.).

Работа обсуждалась на научных семинарах кафедры «Строительные конструкции и вычислительная механика» (ПНИПУ, г. Пермь).

Публикации. В рамках диссертационной работы опубликовано 12 научных статей, в их числе 8 статей в ведущих рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, входящих в базы цитирования Scopus и Web of Science.

Личный вклад автора – постановка задачи (совместно с научным руководителем), разработка расчётных моделей и программ численной реализации методов расчета задач контактного взаимодействия, проведение расчетов строительных конструкций зданий и сооружений и анализ результатов, постановка и проведение экспериментов для верификации полученных результатов.

Структура и объем диссертации. Диссертация включает в себя введение, пять глав, основные результаты и выводы, список литературы из 109 источников. Объем диссертационного исследования составляет 157 страниц машинописного текста, в данный объём входят 139 страниц основного текста, содержащего 88 рисунков и 8 таблиц, библиографический список, а также 2 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, описаны цели и задачи исследования, сформулирована научная новизна, ее практическая и теоретическая значимость.

В первой главе приведен обзор нормативной и научной литературы и современного решения задач стыков цельных и клееных деревянных конструкций с бесклеевыми и клеевыми нагельными соединениями. Приведены некоторые наиболее широко применяемые узлы и методики расчета соединений деревянных конструкций, а также рассмотренные в нормативной документации расчетные характеристики несущей способности нагелей из различных строительных материалов. Описаны пути дальнейшего совершенствования узлов стыка конструкций.

Рассмотрены работы по исследованию соединений деревянных конструкций на клеиваемых стержнях, выполненные Российскими и зарубежными учеными. Отмечен большой вклад развитие данного направления И. П. Пинайкиным, Б. И. Евдокимовым, Г. А. Столповским, И. Г. Овчинниковой и др. Новым технологическим решением стала разработка уникальной системы жестких стыков «система ЦНИИСК» (рисунок 1), выполненная группой ученых под руководством С. Б. Турковского.

В тело древесины под различными углами к волокнам клеиваются арматурные стержни повышенной прочности, преимущественно стальной

арматуры классов А300–А500 с клеями на базе эпоксидных смол ЭД20 с различными наполнителями.

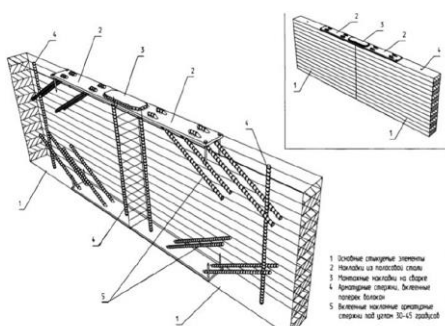


Рисунок 1 — Типовой узел «системы ЦНИИСК»

Узлы «системы ЦНИИСК» базируются на работе клеенных стержней на растяжение с выдергиванием и на сжатие с продавливанием. Расчетную несущую способность стержня, клеенного под углом к волокнам древесины, определяют по формуле (1) методики СП 64.13330.2011 «Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80» в разделе «Соединения на клеенных стержнях».

$$T = Rpd_l k_p k_c k_b m_d \leq F_a R_a \quad (1)$$

В связи с универсальностью стыка нами решено использовать существующие наработки этой системы с целью создания коррозионностойких конструкций без применения металлических элементов. Во всех вариантах стержни фиксируются посредством стыковых стальных пластин по граням соединяемых элементов. Расчет таких узлов традиционно сводится к проверке несущей способности клеенных в одном направлении стержней на выдергивание, а также на продавливание для стержней, клеенных поперек волокон. Также выполняется проверка древесины на смятие поперек волокон под накладными деталями. Такой стык обеспечивает наиболее полное использование прочностных характеристик соединяемых материалов и позволяет решать проблемы, связанные с транспортировкой объемных сборных конструктивных элементов. Кроме того, большая разница коэффициентов линейного термического расширения стали и древесины параллельно волокнам приводит к ограничению стыковки крупно-сборных большепролетных элементов в условиях большого годового перепада температур.

По результатам обзора литературы сделан вывод об эксплуатационных ограничениях таких стыков на предприятиях с химически агрессивными газоздушными средами, связанных, в первую очередь, с коррозионным износом стальных накладных деталей и арматурных стержней.

Вторая глава посвящена вопросам влияния химически агрессивной среды на конструкции из клееной древесины, стальные и композитные детали. Выполнен прогноз технического состояния клееных деревянных конструкций, эксплуатируемых в таких средах. Объясняются уникальные свойства и структура древесины как строительного материала и ее применимость в условиях агрессивных сред. Отмечено, что большой опыт практического использования большепролетных арочных складов из клееной древесины для хранения минеральных удобрений накоплен на калийных предприятиях Пермского края. Срок эксплуатации деревянных конструкций в условиях солевой агрессии составляет более 50 лет без выполнения ремонтных мероприятий.

Обобщен тридцатипятилетний опыт мониторинга технического состояния строительных конструкций и наблюдения за эксплуатацией клееных несущих и ограждающих конструкций складов. В течение последнего десятилетия нами

отобрано большое количество образцов из клееной древесины с действующих объектов предприятий калийной промышленности и выполнена статистическая обработка накопленных данных. Это позволило выявить наиболее характерные особенности работы клееных арочных конструкций и установить факторы, влияющие на их долговечность, а именно влияние *солевого содержания* и *влажности* на прочность древесины.

С целью установления степени насыщенности древесины солями, из полуарок эксплуатируемых складов нами были отобраны опытные образцы. По данным лабораторных испытаний, установлено, что при максимальном насыщении хлористым калием, содержание солей в опытных образцах не превышало 25 %, а глубина насыщенного слоя после 40 лет эксплуатации не превышает 2...5 мм, и на глубине 15 мм снижается до 6...8 % (рисунок 2). Прочностные характеристики клееных деревянных образцов, насыщенных солевым раствором, снижаются в зависимости от количества раствора в образце. Наибольшее снижение прочности древесины в агрессивной среде не превышает 20 % (рисунок 3).

Накопление влаги древесной конструкций и ее распространение в глубину сечения зависит от продолжительности эксплуатации. Влажность древесины мало зависит от атмосферных условий, но при условии интенсивной запыленности конструкций гигроскопическая соль в системе «влажный воздух-соль-древесина» является влагопереносной системой. Увлажнение и изменение прочностных характеристик древесины конструкций протекают более интенсивно по сравнению с соленаккумуляцией.

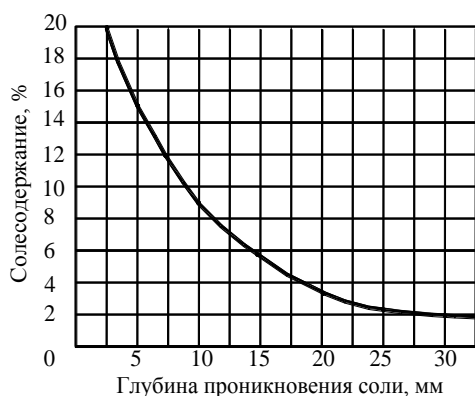


Рисунок 2 — Распределение солевого содержания по глубине сечения

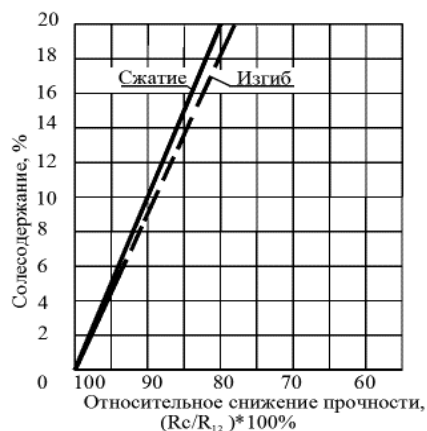


Рисунок 3 — Снижение относительной прочности древесины



Рисунок 4 — Распределение влаги по глубине сечения

На рисунке 4 показано распределение влажности по глубине сечения конструктивного элемента при ширине более 150 мм и сроке эксплуатации 15 лет. Из графика видно, что наиболее интенсивно процесс проникновения влаги в глубину сечения происходит первые 5-8 лет.

Затем процесс замедляется, и глубина увлажненной зоны не превышает 1/3 высоты элемента. Распределение влажности по сечению реальных конструктивных элементов в различные сроки эксплуатации и с учетом специфики эксплуатационных условий складов описывается эмпирическим уравнением (2).

$$W = \frac{48}{\delta^{0,83}} \tau^{(0,3\delta^{0,16})} \quad (2)$$

Наличие в поперечном сечении конструктивного элемента слоев с различной влажностью приводит к сложному перераспределению внутренних напряжений, что отрицательно сказывается на прочностных и упругих характеристиках древесины. Учитывая данные о влиянии влажности, условие прочности поперечного сечения сжато-изгибаемого элемента имеет вид (3).

$$\sigma_i = \frac{M \frac{E^W}{E} \left(\frac{A}{F_{np}} + y_i - h_o \right)}{I_{np} \xi} \leq R_{сж} \quad (3)$$

Расчет проводится для сроков эксплуатации 5, 10, 20, 40, 60 лет. Результаты расчета показали, что, начиная с 20 лет, разрушение некоторой части волокон не приводит к лавинному разрушению оставшихся по всему сечению, а в результате перераспределения напряжений происходит некоторое повышение несущей способности оставшегося не разрушенным сечения. Приведенные данные позволяют прогнозировать срок службы несущих деревянных конструкций складов калийных производств, при гигроскопическом увлажнении не менее 60 лет. Фактические данные по результатам обследований и отбора образцов позволяют сделать вывод о том, что при сроке эксплуатации конструкций более 30 лет, эксплуатационная среда не оказывает существенного влияния на прочность древесины, что согласуется с выводами теоретических оценок.

Для сравнения приведены исследования зависимости коррозионного повреждения стальных накладных деталей, применяемых на сегодняшний день во всех узловых соединениях деревянных конструкций, которые описываются полиномами 3-й и 4-й степени. По полученным нами статистическим данным отмечено, что стальные накладки будут иметь сквозные коррозионные повреждения после 60 лет эксплуатации. Однако дефицит несущей способности, при котором возникнет вероятность обрушения конструкции, произойдет намного раньше этого срока. Следует отметить, что химический состав продукта оказывает влияние на скорость протекания коррозионных процессов.

С целью обеспечения долговечности и надежности строительных конструкций предложено рассмотреть замену стальных крепежных деталей композитными. Исследователями А. Г. Демешкиным и А. А. Швабом (Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, Россия, Новосибирск) рассмотрено влияние химически агрессивной (соляной) среды на волокна из стекловолокна, базальта и углеродного (*карбонового*) волокна. Исследования показали: разрушение волокнистых композитных материалов, таких как базальт, стеклопластик и углепластик происходит по внешней поверхности волокон. Стеклопластик и базальт после выдержки в концентрированном растворе хлористого калия имеют практически одинаковые количественные показатели

потери прочности: через 21 суток материал полностью исчерпывал несущую способность (рисунки 5, 6).

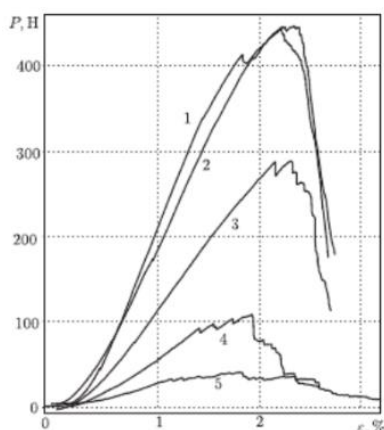


Рисунок 5 – Диаграмма растяжения для образцов из стекловолокна

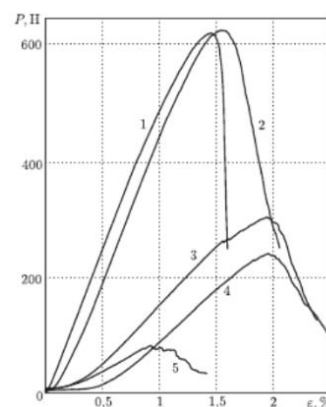


Рисунок 6 – Диаграмма растяжения для образцов из базальта

Для углеродного волокна (*карбона*) процесс разрушения прекратился после 14 суток (рисунок 7), показатели прочности изменились на 18...22 % (рисунок 8) от первоначальных.

На рисунках 5, 6, 8 графики **1** и **2** соответствуют начальному состоянию; **3, 4, 5** – состоянию через 7, 14 и 21 суток, соответственно.

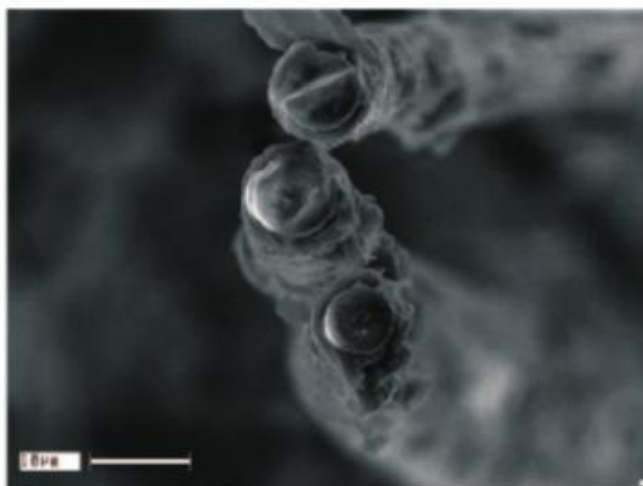


Рисунок 7 — Сечение углеродного волокна после 21 суток

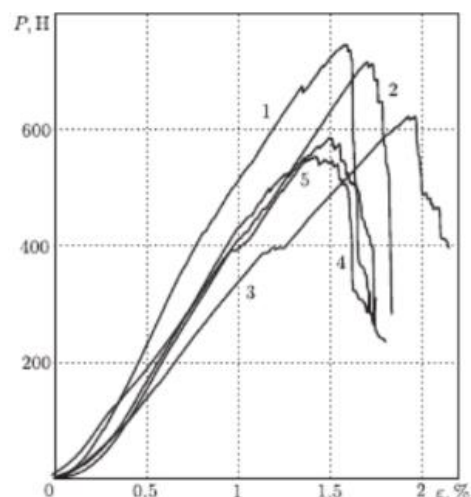


Рисунок 8 — Диаграмма растяжения для образцов из углеволокна

Разрушение отдельных волокон в концентрированном растворе происходит намного более интенсивно, чем в реальных конструкциях. Это связано с величиной степени агрессии и с тем, что в реальности применяют не отдельные волокна, а изделия в виде связки жгутов, покрытых химически нейтральной смолой.

Исходя из практики применения углеродных лент в качестве внешнего армирования конструктивных элементов объектов, используемых на предприятиях с сильной солевой агрессией, можно сделать заключение, подтверждающее выводы авторов исследований об отсутствии видимых разрушений углеродных композитов, связанных с химической агрессией.

В **третьей** главе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния цилиндрических нагелей из углеродного композита при действии поперечных сил

и их сравнение со стальными нагелями. Сделаны выводы о возможности применения нагелей из углеродного волокна, представлены качественные и количественные характеристики работы соединения, характер разрушения и усилия, возникающие в нагелях. Испытания выполнены на различном оборудовании и с различной скоростью нагружения образцов. Построены компьютерные модели расчета, учитывающие физическую нелинейность и контактное взаимодействие.

Основные положения о расчете и проектировании узлов соединения деревянных конструкций с использованием стальных, деревянных и стеклопластиковых нагелей разработаны в России инженерами Г. Г. Карлсенем, И. П. Кулибиным, В. Г. Шуховым, В. Ф. Ивановым, П. А. Дмитриевым, Ю. В. Слицкоуховым, В. М. Коченовым; в Германии – Гестеши, Графом, Шнидтманом и другими. В настоящее время расчет нагельных соединений в соответствии с общей теорией предельных состояний выполняется по первой группе предельных состояний (несущая способность) на прочность и по второй группе предельных состояний (по деформациям).

Дефицит несущей способности по условию смятия нагельного гнезда принимается в момент, при котором напряжения смятия достигают предельных величин $R_{см}^{BP}$ и $R_{см}^{ДЛ}$. При действии временных нагрузок за критическую величину напряжения смятия принимается временное сопротивление $R_{см}^{BP}$, а при длительном воздействии – длительное сопротивление смятию $R_{см}^{ДЛ}$ соответственно (рисунок 9).

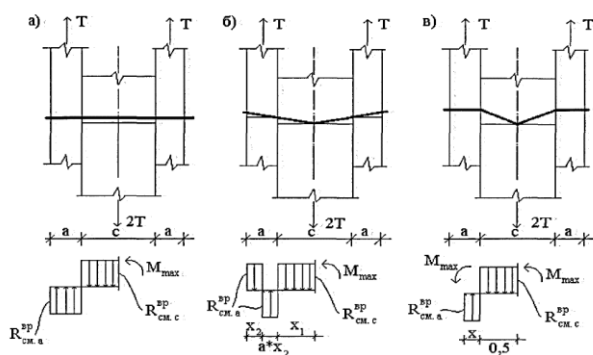


Рисунок 9 — Эпюры напряжений нагельных соединений и соответствующие схемы деформирования

Расчетная несущая способность соединения определяется с учетом так называемых пороков древесины, зависящих от качества пиломатериала, изменчивости нагрузок и материала нагеля и описывается формулой (4).

$$N = n_{cp} n T_{min} \quad (4)$$

Для проведения лабораторных испытаний нагелей были использованы стержни из углеродного композита Monsterod АСК-6 диаметром 5 мм.

Стержни испытывались на растяжение до разрыва по ГОСТ 31938-2012 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций» (рисунок 10) на испытательной машине Instron 5582; с преобразователем перемещений Instron 2630-105. Скорость движения траверсы при испытаниях принята 5 мм/мин. В качестве контрольных образцов использованы стальные нагели аналогичного диаметра.

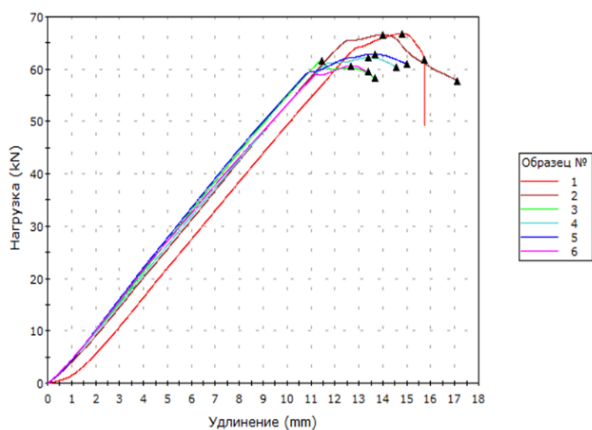


Рисунок 10 — Диаграмма растяжения углеродных стержней

Для определения НДС цилиндрических нагелей из углеродного композита и стали на

действие поперечных сил изготовлены две группы образцов из древесины с различной толщиной соединяемых элементов 25 и 50 мм. Схема симметричного двухсрезного нагельного соединения показана на рисунке 11. Размеры деревянных элементов принимались в соответствии с рекомендациями СП.

Выполнен предварительный расчет по изложенной выше методике СП. Расчетная несущая способность нагеля T_{min} определялась из условия смятия древесины среднего элемента и равна 5 и 10 кН для образцов с толщиной соединяемых элементов 25 и 50 мм, соответственно. Фактическая разрушающая нагрузка N_u , как правило, превышает расчетную в 1,5...2 раза и принята 10 и 20 кН соответственно.

Проведены две серии испытаний до полного разрушения образцов: 1 - *пошагово* возрастающей нагрузкой; 2 - *непрерывно* возрастающей нагрузкой через постоянно движущуюся траверсу. По данным, полученным в каждой серии испытаний для каждого материала нагелей, типоразмера образцов и характера приложения нагрузки построены графики зависимости сдвиговых перемещений от приложенной нагрузки (рисунок 12)

1-я серия испытаний проводилась на гидравлическом прессе ПГМ-500.

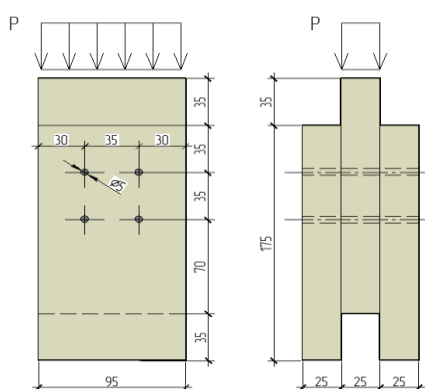


Рисунок 11 — Расчетная схема и образец в прессе ПГМ-500МГ

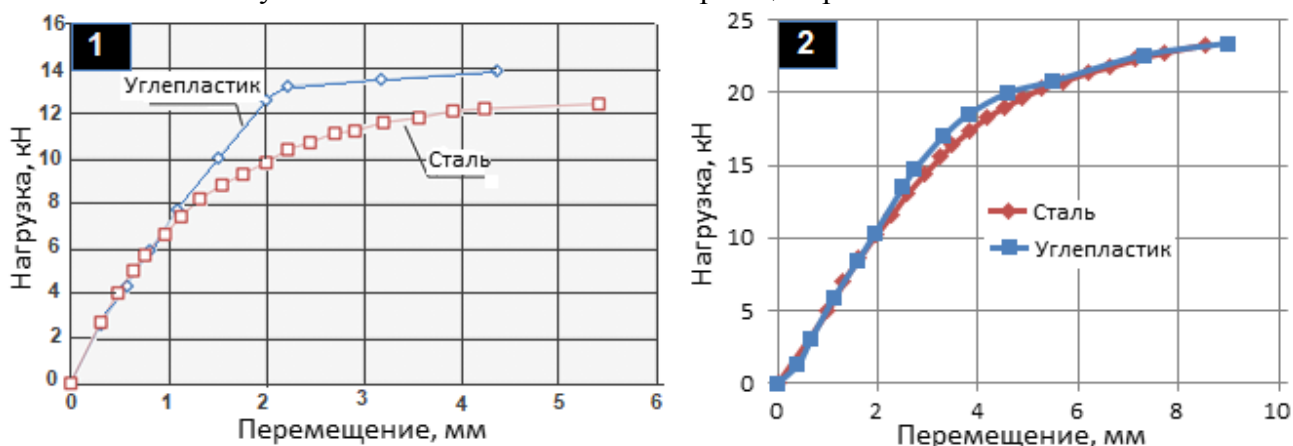


Рисунок 12 — Зависимости сдвиговых перемещений в соединении от нагрузки для стального и углепластикового нагелей с толщиной досок 25 мм (1) и 50 мм (2) в 1-й серии испытаний

В 1-й серии испытаний: для образцов со *стальными* нагельными с толщиной досок **25 мм** при нагрузке 11,1 кН работа соединения перешла в стадию пластических деформаций, разрушение обусловлено появлением трещины со сколом по среднему элементу (рисунок 13-1а). Для образцов с толщиной досок **50 мм** разрушающая нагрузка составила 17 кН (рисунок 13-2а).

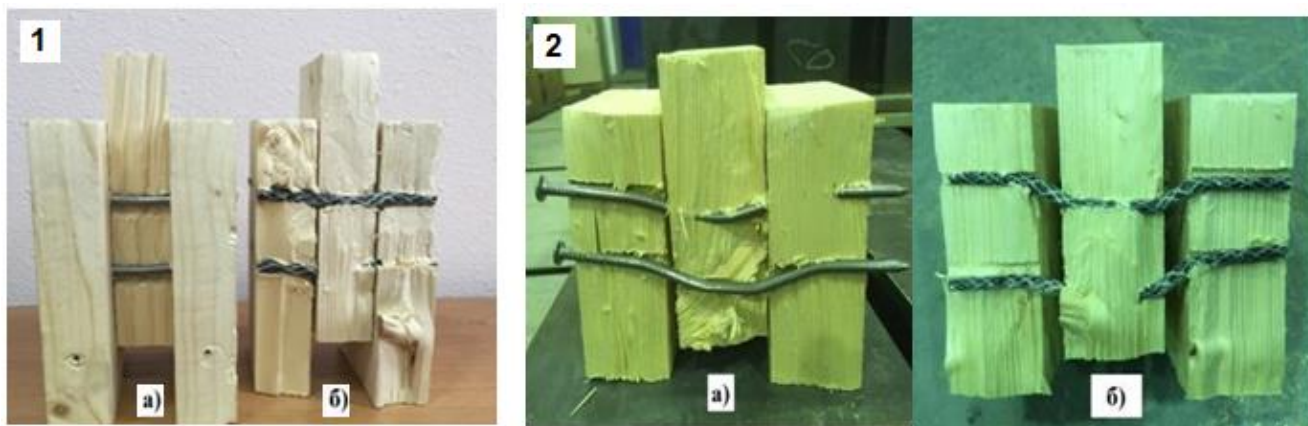


Рисунок 13 – Характер разрушения образцов со стальными (а) и углепластиковыми (б) нагелями с толщиной досок 25 мм (1) и 50 мм (2)

Для образцов с *углепластиковыми* нагелями с толщиной досок **25 мм** выявлены небольшие изгибы нагелей с незначительным растрескиванием полимерной матрицы и раскрытие образцов по плоскостям досок (рисунок 13-1б). Раскалывание деревянных элементов отсутствует. После снятия нагрузки нагели практически вернулись в первоначальное состояние. Для образцов с толщиной досок **50 мм** (рисунок 13-2б) разрушение образцов произошло в связи с переходом нагеля в стадию пластических деформаций и растрескиванием полимерной матрицы при нагрузке на образец 18 кН. Таким образом, результаты экспериментов этой серии коррелируют с расчетными нагрузками, определяемыми *из условия смятия древесины* среднего элемента.

2-я серия испытаний на универсальной испытательной машине ZWICK/Roell Z400E (рисунок 14) проводилась непрерывно возрастающей нагрузкой со скоростью нагружения в 1 кН/мин и 5 кН/мин. Результаты испытаний образцов показаны на рисунке 15.



Рисунок 14 — Образец в испытательной машине Zwick Z400E

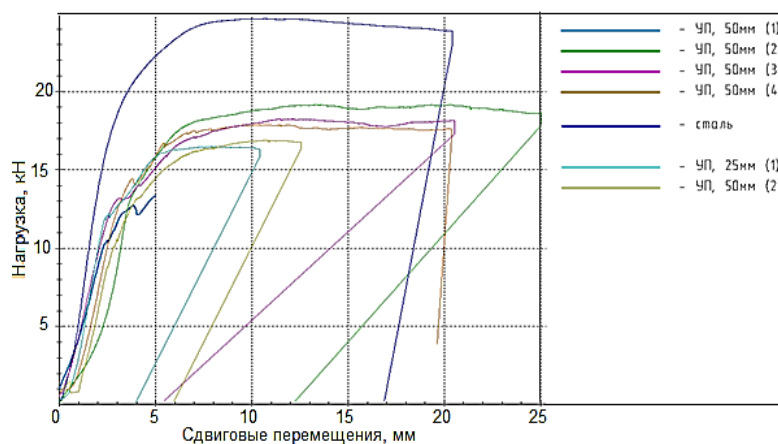


Рисунок 15 — Зависимости сдвиговых перемещений в соединении от нагрузки для стальных и углепластиковых нагелей во 2-й серии испытаний

В данных условиях разрушение стыка зависит, в основном, от несущей способности нагеля, но при этом происходит смятие, а в отдельных случаях и раскалывание древесины. Углепластиковые нагели разрушаются вследствие растрескивания полимерной матрицы, но при разгрузке стыка остаточная

деформация существенно уменьшается в отличие от стальных нагелей, вследствие чего происходит смещение крайних элементов образца в стороны относительно центрального. При испытаниях образцов со стальными нагелями при скорости загрузки более 5 мм/мин наблюдается раскалывание древесины образца по центральному элементу, а с углепластиковыми - раскалывания древесины не происходит.

Для анализа напряженно-деформированного состояния нагельного соединения и верификации полученных экспериментальных данных создана расчетная модель образцов (древесина-сталь и древесина-углепластик) в программном комплексе ANSYS и ANSYS Workbench (рисунок 16). Аналогично натурным испытаниям, усилие от пресса на образец передавалось пошагово (ступенями по 1 кН). Нелинейное поведение материалов описывалось нелинейными диаграммами, полученными экспериментально (углепластик) и встроенными в программный комплекс моделями нелинейного деформирования стали и древесины.

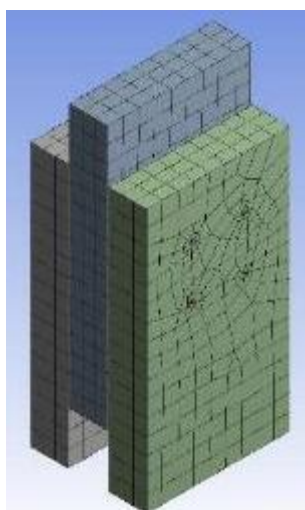


Рисунок 16 — Модель образца в расчетном комплексе ANSYS Workbench

При моделировании контактного взаимодействия использовались элементы: CONTACT173 (для поверхности древесины) и TARGET170 (для поверхности нагеля). Решалась нелинейная контактная задача. Расчетная разрушающая нагрузка для образца с толщиной досок 50 мм и углепластиковыми нагелями составила 12...14 кН, со стальными нагелями - 16...18 кН; взаимное перемещение контрольных узлов деревянных элементов, расположенных в нескольких точках образца, составило 1,97 мм и 1,8 мм, соответственно.

Для иллюстрации на рис. 17, 18 показаны результаты расчета интенсивности напряжений в нагелях.

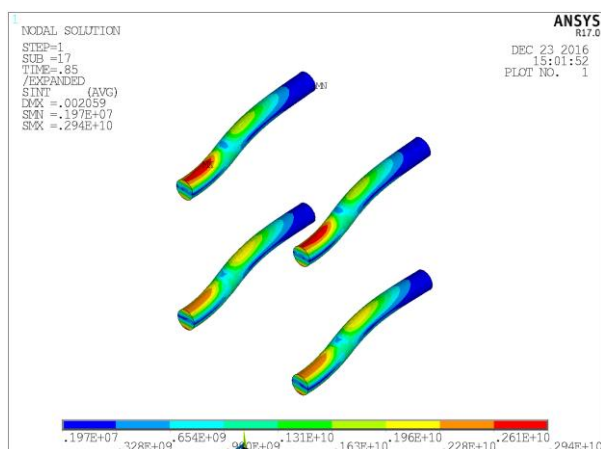


Рисунок 17 — Изополя интенсивности напряжений в углепластиковом нагеле

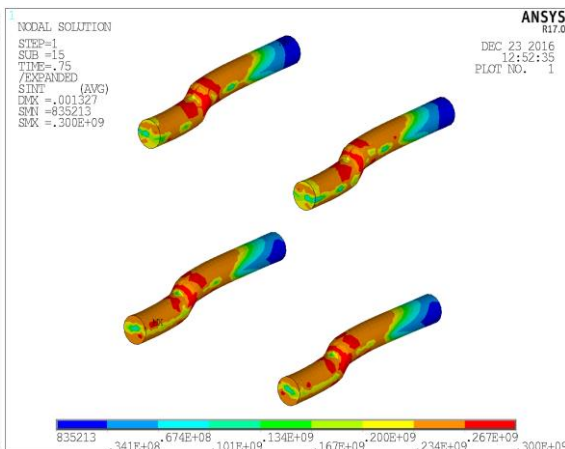


Рисунок 18 — Изополя интенсивности напряжений в стальном нагеле

Теоретические данные, полученные в результате эксперимента и данные, полученные численным методом, коррелируют между собой. Разброс значений прогибов и величины разрушающей нагрузки составляет порядка 10...12 % и связан с несовершенством (пороками) структуры древесины и погрешностью при изготовлении образцов, а также отсутствием строительных норм на проектирование конструкций из углепластика.

В четвертой главе представлены результаты численных и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния конструкции деревянной балки с жестким узловым соединением на углепластиковых клеиваемых нагелях.

Существующая методика расчета соединений «системы ЦНИИСК» сводится к сравнению минимальной несущей способности стержня из условия смятия древесины гнезда или изгиба наиболее нагруженного из стержней, но методики определения усилий в нагелях и определения наиболее нагруженного из них в нормативных документах не приводится.

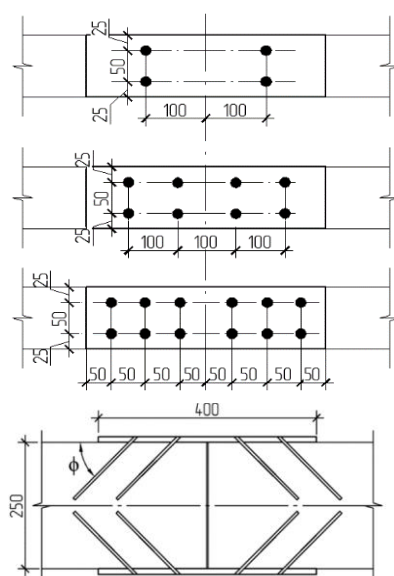


Рисунок 19 —
Варьируемые параметры
нагельного соединения

Для оценки влияния параметров стыка на НДС и определения наиболее рационального варианта узлового соединения проведены вычислительные эксперименты несущей способности и деформативности конструкции. В качестве варьируемых параметров приняты следующие (рисунок 19): количество стержней в соединении (4, 8 либо 12); угол клеивания стержня (0, 15, 30, 45, 60°). Контролировались параметры: максимальные напряжения в древесине, в стержнях, в накладках и прогиб образца в вертикальной плоскости. Стержни устанавливались в два продольных ряда, расположение стержней принято в соответствии с требованиями норм.

Создана расчетная конечно-элементная модель слоистой деревянной балки сечением 100×225×3000 мм со стыком в середине пролета, нагруженная по схеме 4-точечного изгиба. Накладки по верху и низу балки – двунаправленный углепластик на матрице синтетического полимерного связующего закреплены к древесине при помощи клеенных стержней. Модель построена в программном комплексе AUTODESK AutoCAD и экспортирована в ПК «ANSYS» с помощью макросов, написанных на языке параметрического программирования APDL (рисунок 20).

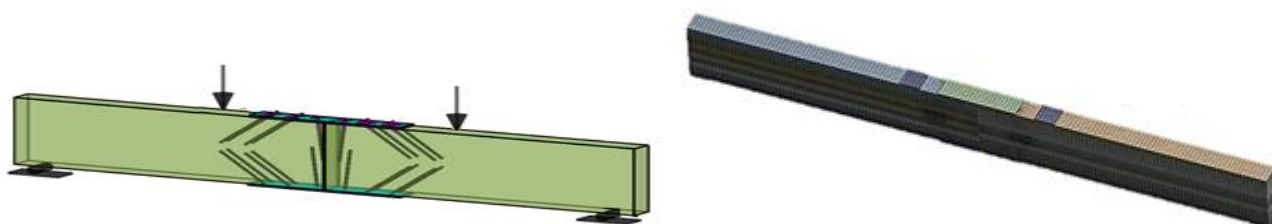


Рисунок 20 – Расчетная схема и конечно-элементная модель балки

Рассматривались разные варианты сеток. С точки зрения сходимости и скорости расчета предпочтительней сетка с измельчением в зоне контакта. Основной особенностью данной композитной конструкции является контактное взаимодействие составляющих ее элементов, в процессе деформирования и разрушения. Напряженное состояние в контактных зонах крайне многообразно. Поверхности могут вступать и выходить из контакта внезапно. На напряженное состояние значительно влияет трение, и его необходимо принимать в расчет.

На совместных границах контактирующих элементов возникают распределенные поверхностные силы. Нормальная t_n и касательная t_t составляющие распределенной контактной силы, действующей на любой элемент, имеют вид:

$$t_n = t \cdot n \leq 0; \quad t_t = t \cdot \tau, \quad (4)$$

где n - внешняя нормаль к контактной поверхности тела, τ - касательный вектор к контактной поверхности тела.

При нахождении тел в контакте нестрогое неравенство (4) имеет вид строгого неравенства, а при выходе из контакта превращается в равенство. Касательные контактные силы могут принимать любые значения. Приложение касательного напряжения в контакте не приводит к проскальзыванию при условии, если тела в области контакта, склеены «друг с другом» или коэффициент трения стремится к бесконечности. В этом случае касательные контактные силы не зависят от нормальных контактных сил, но и не равны нулю. Контактующие тела неподвижны друг относительно друга, т.е. касательные силы подчиняются закону Кулона до тех пор, пока выполняется неравенство: $|t_t| \leq \mu_s |t_n|$, где статический коэффициент трения $\mu_s > 0$. При нарушении неравенства (4) тела начинают движение друг относительно друга. Тогда касательные контактные силы подчиняются равенству $|t_t| = \mu_d |t_n|$, где динамический коэффициент трения $\mu_d \leq \mu_s$. Движение будет продолжаться, пока не будет выполнено неравенство $|t_t| < \mu_d |t_n|$.

В данной задаче область контакта может изменяться, и в общем случае, содержит как участки сцепления, так и участки скольжения, возникающие при превышении модулем касательной силы предельного значения силы трения (трения покоя). Для моделирования контактного взаимодействия и скольжения между трехмерными поверхностями использовалась модель «Frictional» и контактные элементы CONTA174 и TARGE170. Коэффициент трения зависит от материалов, и принят для пары «древесина-углепластик» – 0,25, а для пары «древесина-древесина» – 0,33. При создании расчетной модели учтена ортотропия древесины, трансверсально-изотропные свойства пластин, реальные диаграммы деформирования углепластиковых нагелей.

Численная реализация *нелинейной краевой задачи определения напряженно-деформированного состояния конструкции* осуществлялась пошаговым методом с шагом приложения нагрузки 1,0 кН. На каждом шаге решения для получения сходимости выполнялись равновесные итерации с помощью метода Ньютона-Рафсона. Проверка сходимости для сил и перемещений производилась с использованием евклидовой нормы для всех степеней свободы.

Результаты расчета представлены в виде графиков на рисунке 21.

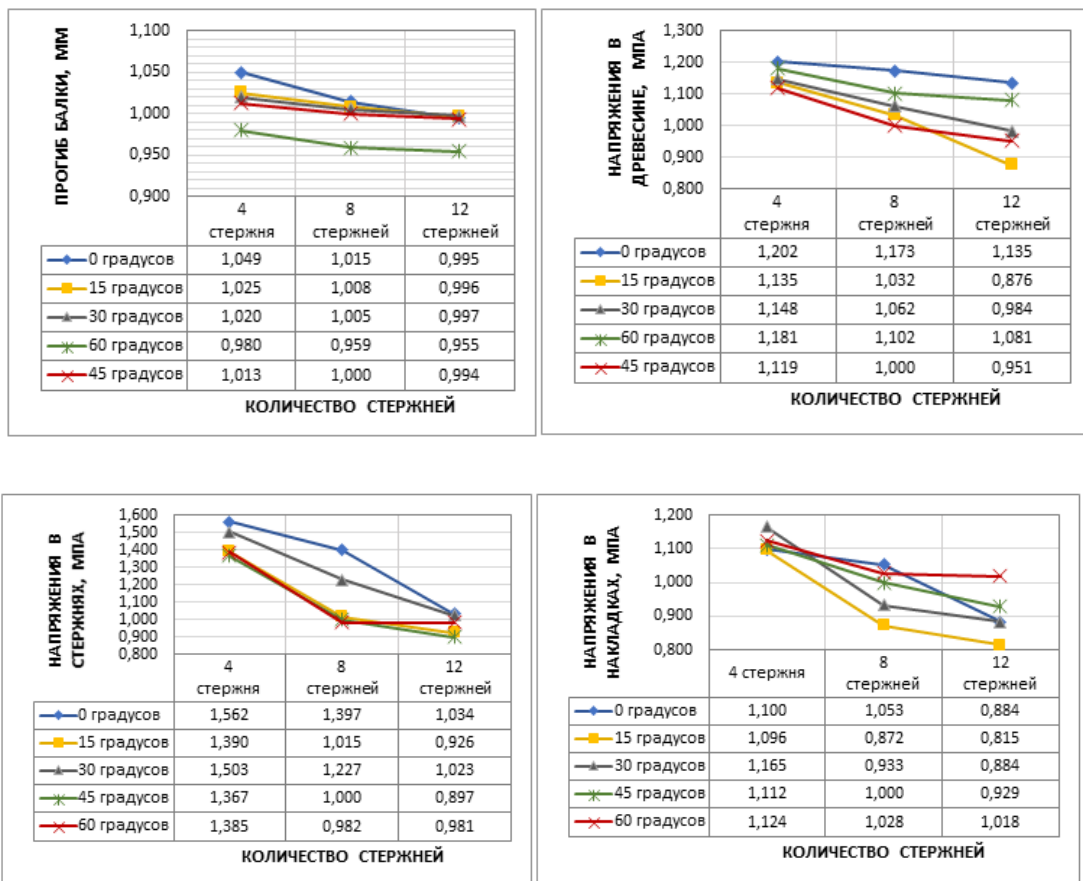


Рисунок 21 – Результаты оценки влияния параметров стыка на НДС конструкции

Выполнена оценка работы стыка по двум схемам, балочной на (четырёхточечный изгиб, рисунок 22) и консольной (на трехточечный изгиб, рисунок 23), а также сравнение с балкой без стыка. Сделаны выводы о применимости композитов в таких конструкциях, приведены достоинства и недостатки углепластиковых деталей в сравнении со сталью. Определены места наиболее вероятного разрушения конструкции.

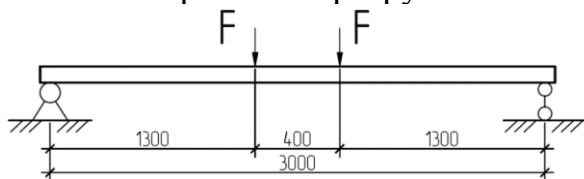


Рисунок 22 – Расчетная схема балки на четырехточечный изгиб

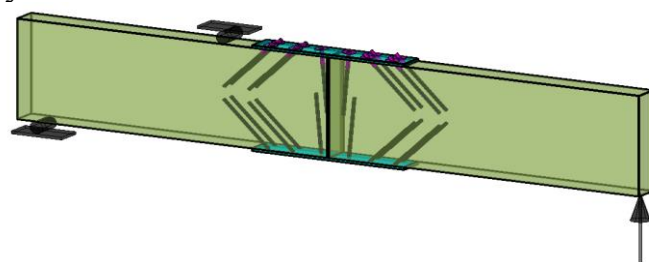


Рисунок 23 — Схема нагельного соединения и расчетная схема балки на трехточечный изгиб

Создана расчетная конечно-элементная модель слоистой деревянной балки со стыком в середине пролета (рисунок 24). Накладки по верху и низу балки – двунаправленный углепластик на матрице синтетического полимерного связующего закреплены к древесине при помощи вклеенных стержней. Модель экспортирована в ПК «ANSYS» с помощью макросов, написанных на языке параметрического программирования APDL (рисунок 21). Рассматривались разные варианты сеток. Размер и тип сетки существенно влияет на результаты расчета. С

точки зрения сходимости и скорости расчета предпочтительней сетка с измельчением в зоне контакта.

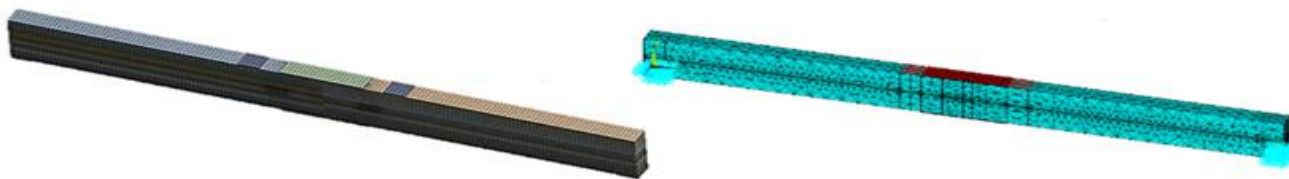


Рисунок 24 – Конечно-элементная модель разрезной балки

С целью определения влияния различных параметров стыка на НДС узлового соединения были проведены вычислительные эксперименты. На рисунке 25 представлены некоторые результаты расчетов для наиболее рационального варианта стыка с расстановкой восьми нагелей по каждой стороне под углом 45° к линии, проходящей вдоль длинного края балки при расчетах на трехточечный и четырехточечный изгиб.

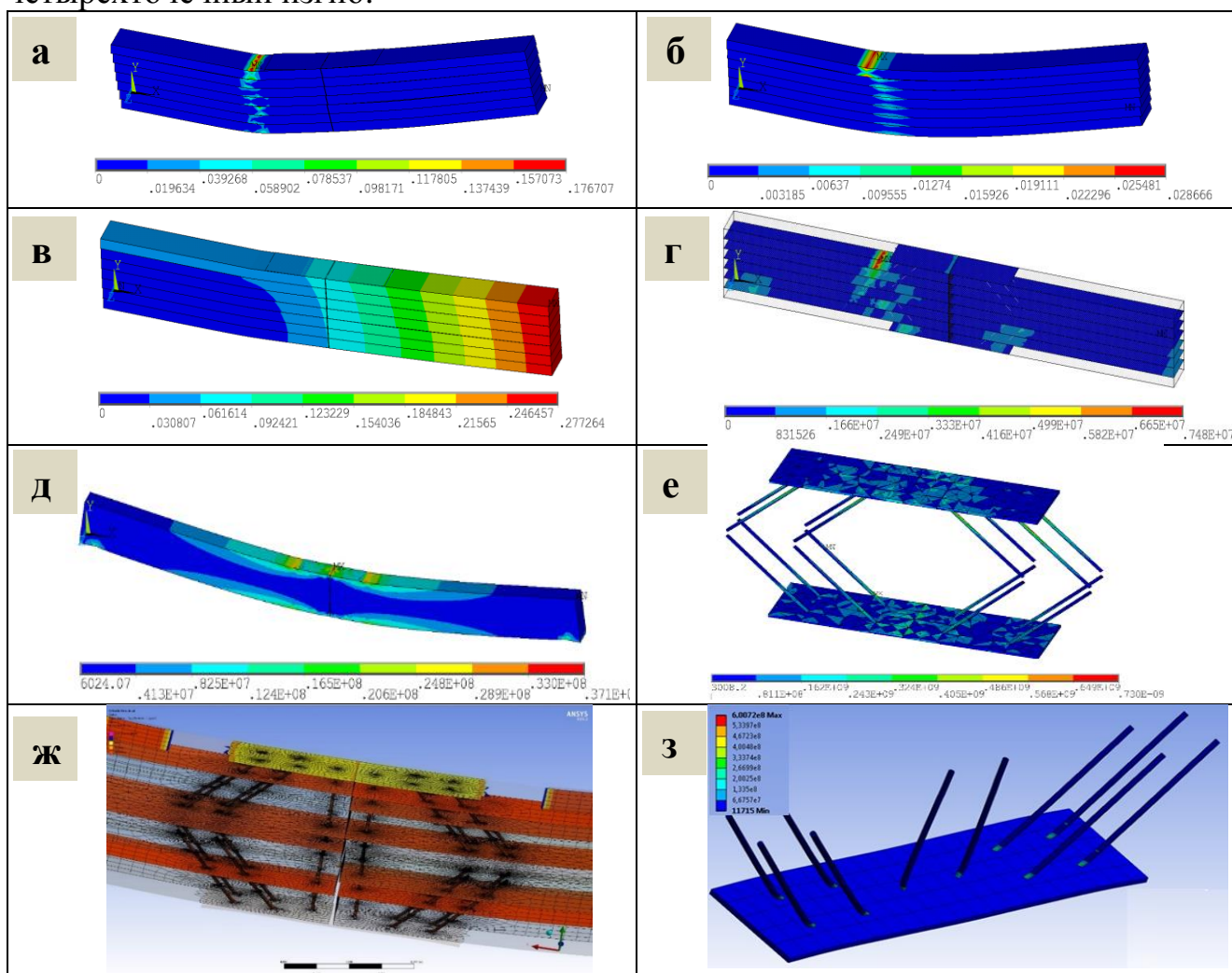


Рисунок 25 – Результаты расчета несущей способности и деформативности конструкции балки с углепластиковыми нагелями: а) деформированная схема балки со стыком при 3-точечном изгибе с образованием пластического шарнира; б) деформированная схема балки без стыка при 3-точечном изгибе; в) изополя суммарных перемещений при 3-точечном изгибе; г) распределение касательных напряжений в зонах контакта при 3-точечном изгибе; д) Изополя распределения эквивалентных напряжений в теле древесины (Па) при 4-точечном изгибе; е) Изополя распределения эквивалентных напряжений в соединительных деталях (Па) при 4-точечном изгибе; ж) Контактное взаимодействие стержней, пластин и слоев древесины в момент разрушения при 4-точечном изгибе; з) Изополя эквивалентных напряжений в соединительных деталях при 4-точечном изгибе

Расчеты показали, что разрушение конструкции балки с жестким стыком происходит при нагрузке 25,6 кН. Процесс разрушения начинается с образования пластических деформаций под опорами траверсы в зоне максимального изгибающего момента (при нагрузке 15,4 кН), взаимного проскальзывания слоев клееной древесины, затем происходит раскрытие зоны стыка, отрыв соединительных планок, а также стержней в местах контакта.

Для верификации результатов расчета проводились **натурные испытания** таких же балок длиной 1,5 м и 2,0 м до разрушения пошагово возрастающей нагрузкой на специально запроектированном стенде (рисунок 25). Давление на балку передавалось через траверсу, имеющую две шарнирные опоры.

Средняя разрушающая нагрузка в экспериментах составила 25,4 кН, перемещение в середине пролета при этом 7,2 мм. Сжатая кромка балки в месте стыка образовала лобовой упор. Ширина раскрытия нижней кромки в месте стыка отмечена при 5,7 мм. Для замера перемещений применялись индуктивные датчики линейных перемещений ДПЛ-100, подключенные к регистрирующему блоку ТЕРЕМ-4.1. При испытании балок характер разрушений соответствовал прогнозу численного моделирования. После выключения из работы первого стержня конструкция продолжала некоторое время работать упруго, но при повышении нагрузки происходит резкое разрушение остальных стержней. Эта информация подтверждается скачкообразным поведением кривой на графике нагрузка-перемещение (рисунок 27) с последующим наращиванием деформаций при падении нагрузки.



Рисунок 26 – Балка на стенде

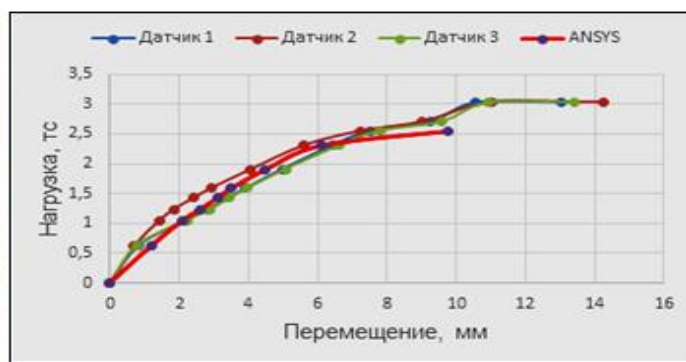


Рисунок 27 – Графики перемещение-нагрузка

В **пятой главе** выполнен расчет экономического эффекта от внедрения карбонового узла. В качестве примера принят проектируемый типовой склад гранулированного хлористого калия размерами 210x45 м по осям. Оценка эффективности проекта выполнена в соответствии с «Методическими рекомендациями по оценке эффективности инвестиционных проектов», утвержденными Приказом Минэкономки России № ВК 477 от 21.06.1999 г. путем сравнения вариантов: эталонного и предлагаемого. Эталонный вариант предусматривает применение стального узла, а предлагаемый – применение узла из углепластиковых деталей.

По результатам подсчета годового экономического эффекта сделаны выводы о стоимости и сроке окупаемости углепластиковых узлов, учитывающие амортизацию, себестоимость, межремонтные сроки службы. При сравнении затрат,

осуществляемых до начала и в процессе эксплуатации, экономия от применения карбоновых узлов за весь период эксплуатации склада составляет 319,53 млн руб. Расчетный срок окупаемости углепластиковых узлов составляет 3,48 года. При расчете окупаемости учтены изначально более высокая стоимость углепластиковых деталей, по сравнению со стальными и существенно меньшие затраты на эксплуатацию по прошествии времени при более длительном сроке службы. Это определяет экономическую целесообразность эксплуатации конструкций с применением композитных деталей.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Выполнен аналитический обзор научных публикаций отечественных и зарубежных ученых по расчету и проектированию стыков клееных деревянных конструкций, нормативной документации. Рассмотрены варианты стыков на нагелях и на вклеенных стержнях.

2. Установлены эксплуатационные факторы агрессивной среды (солесодержание, влажность, длительность эксплуатации) и их влияние на жизненный цикл конструкций из цельной и клееной древесины, включающей металлические элементы, которые получены в результате статистической обработки данных за последние 10 лет при инженерном обследовании строительных конструкций и обобщения опыта мониторинга за предыдущие 35 лет.

3. Установлено, что снижение прочностных характеристик древесины от совокупного воздействия факторов происходит в первые 10...15 лет эксплуатации и носит затухающий характер. Влияние же химической агрессии на соединительные детали крепления конструкций носит необратимый характер, будь то уменьшение поперечного сечения стальных элементов, связанных с коррозионным износом, либо разрушение химических волокон стекловолокна и базальта, связанных со структурными разрушениями материала. Углеродные волокна менее подвержены влиянию агрессивной среды, процесс является затухающим и прекращается через 14 суток, прочность снижается на 18 - 22 %.

4. По результатам натурных и вычислительных экспериментов показана принципиальная возможность замены стальных несущих элементов в конструкции стыка на углепластиковые. Выявлены характерные особенности работы нагелей под нагрузкой на изгиб и характер смятия окружающей древесины при использовании стальных и углепластиковых нагелей, в зависимости от размеров конструктивных элементов и характера приложения нагрузки. При действии пошагово возрастающей нагрузки результаты натурных и численных экспериментов, коррелируют с расчетными нагрузками, определяемыми *из условия смятия древесины* по инженерной методике СП. При испытаниях непрерывно возрастающей нагрузкой разрушение стыка зависит, в основном, от несущей способности нагеля, но при этом происходит смятие, а в отдельных случаях и раскалывание древесины. При этом скорость нагружения и характер деформации стержней играет значительную роль при определении несущей способности соединения.

5. Разработана вычислительная технология создания корректной расчетной модели и усовершенствованная методика расчета деревянных конструкций с углепластиковым нагельным соединением, учитывающая анизотропию композитных материалов и клееной древесины, контактное взаимодействие элементов стыка, которая позволяет: понять характер разрушений композитной конструкции, распределение напряжений и перемещений, возникающих внутри стыка, скрытых для регистрации при экспериментальном исследовании, выявить положение наиболее нагруженного элемента, оценить влияние конструктивных параметров стыка на несущую способность и деформативность конструкции в целом. Созданы алгоритмы и программные модули на языке APDL с применением САД-ориентированного подхода.

6. Проведены натурные эксперименты большеразмерных образцов балок при разных вариантах нагружения, в которых разрушение конструкции происходит согласно прогнозу численной модели в результате взаимного проскальзывания слоев клееной древесины и разрушения полимерной матрицы вклеиваемых стержней с началом образования пластических шарниров под пятками траверсы и образованием трещин в древесине в месте стыка.

7. Кратковременные испытания в целом показали жизнеспособные решения при проектировании узлов на вклеенных стержнях, однако для полноты картины работы таких деталей необходимо проведение длительных экспериментов, включая огневые испытания и испытания на вибрационную нагрузку. Необходимо учесть старение композитов.

8. Расчет экономической эффективности показал, что типовое арочное сооружение при замене узлов стыка полуарок со стали на углепластик имеет срок окупаемости 3,48 года. Это обусловлено отсутствием необходимости восстановления антикоррозионной защиты, снижением стоимости инженерных обследований, а также большим сроком эксплуатации конструкции.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации — в изданиях, рекомендуемых ВАК

1. *М. А. Водяников, Г. Г. Кашеварова.* Численное и экспериментальное моделирование жесткого стыка слоистых деревянных конструкций // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering* — 2017 — vol.13 — iss. 2 — pp. 84–92
2. *М. А. Водяников, Г. Г. Кашеварова.* Оценка влияния агрессивной среды на долговечность клееных деревянных конструкций // *Строительство и реконструкция* — 2017 — №1(69) — стр. 100–103
3. *М. А. Водяников.* Результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния стыкового соединения деревянных конструкций на углепластиковых нагелях // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering* — 2018 — iss. 2 — pp. 48–56
4. *М. А. Водяников, А. В. Воробьев.* Оценка работы соединений деревянных конструкций на стальных и углепластиковых цилиндрических нагелях // *Вестник ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика* — 2017 — №1 — стр. 159–169

— в рецензируемых научных изданиях, входящих в базы цитирования
Scopus и Web of Science

5. *M. A. Vodiannikov, G. G. Kashevarova. Analysis of Wood Structure Connections Using Cylindrical Steel and Carbon Fiber Dowel Pins // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering — 2017 — Vol. 205*
6. *M. A. Vodiannikov, G. G. Kashevarova. Modeling of CFRP and Glulam Combined Action // Materials Science Forum — 2018 — Vol. 928*
7. *M. A. Vodiannikov, G. G. Kashevarova. Composite Materials in the Fasteners of glued wooden Structures Pins // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering — 2018 — Vol. 456*
8. *M. A. Vodiannikov, G. G. Kashevarova. Composite Solutions For Glulam Joints // Key Engineering Materials — 2019 — Vol. 801*

— в других изданиях

9. *М. А. Водяников, Г. Г. Кашеварова. Сравнительный анализ работы соединений деревянных конструкций на стальных и углепластиковых нагелях // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук — 2017 — №20*
10. *М. А. Водяников, Г. Г. Кашеварова. Анализ возможностей совместного применения углепластиков и клееной древесины, работающих в агрессивной среде // Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии — 2016 — №6.*
11. *М. А. Водяников, Г. Г. Кашеварова, П.С. Штро. Деформативность и несущая способность узлов стыка деревянных конструкций на стальных и углепластиковых нагелях // Строительство и архитектура. Опыт и современные технологии — 2017 — №9.*
12. *М. А. Водяников, Г. Г. Кашеварова. Композитные решения стыков клееных деревянных конструкций // Сборник трудов РААСН – 2018 –Том 2.*