

На правах рукописи



СТОЯНОВ ВЛАДИМИР ОЛЕГОВИЧ

**ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ ДЕРЕВЯННЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ, УСИЛЕННЫХ ПОЛИМЕРНЫМИ КОМПОЗИТАМИ**

Специальность: 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в Акционерном обществе «Научно-исследовательский центр «Строительство», Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций имени В.А. Кучеренко (АО «НИЦ «Строительство», ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко).

Научный руководитель: кандидат технических наук
Погорельцев Александр Алексеевич

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

Рощина Светлана Ивановна
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Строительные
конструкции» ФГБОУ ВО «Владимирский
государственный университет им. А.Г. и
Н.Г. Столетовых»

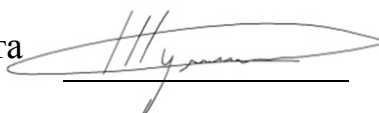
Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-
строительный университет»**

Защита состоится «03» октября 2018 г. в 15:00 (по местному времени) на заседании диссертационного совета Д 303.020.02, созданного на базе АО «НИЦ «Строительство» по адресу: г. Москва, ул. 2-я Институтская, д.6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке по адресу: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, д.6 и на сайте www.cstroy.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2018г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Шулятьев Станислав Олегович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В России клееные деревянные конструкции (ДК) находят применение как в традиционном малоэтажном домостроении, так и в строительстве большепролетных общественных зданий, включая спорткомплексы, бассейны, аквапарки, животноводческих комплексов, теплиц, мостов, комплексов для хранения минеральных удобрений, руд, солей и других сооружений. Архитектурные решения и технологические процессы часто ограничивают габариты несущих деревянных элементов, что обуславливает поиски эффективного метода повышения несущей способности конструкции без изменения ее внешнего вида. Требования по сохранности внешнего облика конструкции предъявляют также и при реконструкции зданий исторической и культурной ценности.

Одним из путей решения проблемы является усиление конструкций. Наиболее распространенными деревянными конструкциями являются изгибаемые элементы и вопросы усиления этих элементов являются актуальными. Характерными дефектами для изгибаемых элементов являются биопоражения, крупные сучки в растянутой зоне, некачественные зубчатые шипы, внепроектные врезки, расслоения и продольные усушечные трещины. В связи с этим одной из актуальных задач является разработка методов по восстановлению и повышению несущей способности и жесткости изгибаемых ДК.

В сооружениях, эксплуатируемых в условиях химически агрессивной среды, а также в специальных сооружениях, для которых необходимы радиопрозрачность и повышенные диэлектрические характеристики, к конструкциям из древесины и материалам, применяемым при усилении, предъявляются соответствующие требования.

Полимерные композиты обладают высокими прочностными характеристиками, невысоким объемным весом и устойчивы к агрессивным воздействиям окружающей среды. Эти достоинства и большое разнообразие композитов по виду и форме позволяют рассматривать их в качестве перспективных материалов для армирования.

Степень разработанности темы. Главная причина, ограничивающая применение полимерных композитов для усиления деревянных конструкций — это отсутствие как в России, так и за рубежом нормативных документов для расчета и проектирования усиления. Это обусловлено малым количеством

исследований в данной области по сравнению с железобетонными и стальными конструкциями.

Известные примеры усиления и методики расчета деревянных конструкций, армированных полимерными композитами, не учитывают ряд особенностей работы древесины, таких, как существенные изменения размеров древесины при изменении влажности воздуха, работу древесины на скалывание. Также не исследованы варианты локального усиления конструкций в растянутых зонах на участках с дефектами, не разработаны методы повышения сдвиговой прочности изгибаемых элементов для предотвращения негативного воздействия расслоений и непрочных соединений, не разработаны методики расчета для проектирования балок составного сечения. Это указывает, что данная тема изучена недостаточно и вопрос усиления изгибаемых деревянных элементов является актуальной задачей.

Цель исследования: Разработка методов усиления изгибаемых деревянных элементов полимерными композитами и методики их расчета.

Задачи исследований:

1. Изучение отечественного и зарубежного опыта усиления изгибаемых деревянных элементов.
2. Экспериментально-теоретическое исследование изгибаемых деревянных элементов, усиленных продольным армированием полимерными композитными материалами.
3. Разработка и исследование методов локального усиления изгибаемых элементов с дефектами в растянутой зоне.
4. Оценка влияния усиления приопорных зон наклонно вклеенными стержнями из композитной арматуры на сдвиговую прочность балок.
5. Исследование работы вклеенных стеклопластиковых стержней в качестве связей сдвига конструкций составного сечения, в том числе с дефектами в виде продольных трещин.
6. Численные исследования изгибаемых деревянных элементов, усиленных полимерными композиционными материалами.
7. Разработка рекомендаций по проектированию усиления изгибаемых деревянных конструкций продольным и поперечным армированием полимерными композитами, в том числе локальное усиление растянутых зон.
8. Обоснование методики расчета составных деревянных элементов с наклонно вклеенными связями сдвига из композитной арматуры.

9. Разработка рекомендаций по производству работ по усилению изгибаемых деревянных элементов полимерными композитами.

Объект исследования: изгибаемые деревянные элементы, усиленные полимерными композитами.

Предмет исследования: несущая способность и деформативность изгибаемых деревянных элементов с продольным и наклонным армированием полимерными композитами.

Научная новизна исследования:

1. Определена прочность клеевого шва при поперечном вклеивании стержней из композитных материалов.

2. Выполнена оценка НДС изгибаемых деревянных конструкций, армированных полимерными композитами, по результатам численных и экспериментальных исследований.

3. Разработана методика усиления деревянных конструкций путем продольного армирования участков с максимальными нормальными напряжениями от изгиба полимерными композитными материалами, в том числе локальным армированием.

4. Предложена методика локального армирования изгибаемых элементов с пороками, дефектами и ослаблениями в растянутых зонах.

5. Исследована зависимость концентрации напряжений на краях анкеровки полимерного композита от его характеристик и длины анкеровки.

6. Разработаны рекомендации по проектированию усиления изгибаемых ДК путём армирования полимерными композитами и указания при производстве работ по усилению.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

- разработаны методы усиления изгибаемых деревянных конструкций полимерными композитами;

- предложена методика расчета армированных деревянных конструкций, включая локальное армирование в зонах максимальных напряжений и на участках с дефектами;

- получены результаты численных и экспериментальных исследований, которые позволяют оценить влияние способа усиления и вида армирующего материала на прочность и жесткость усиливаемого элемента;

- полученные результаты исследования расширяют область применения полимерных композитов в строительстве из древесины и позволяют проектировать усиление изгибаемых деревянных элементов как в новых, так и в реконструируемых зданиях и сооружениях.

Методология и методы исследования. Работа выполнена на основе численных и экспериментальных исследований. Методологической основой для диссертационной работы послужили исследования отечественных и зарубежных ученых в области армированных деревянных конструкций стальной арматурой, строительной механики, численных методов расчета и испытания строительных конструкций. Численные исследования проводились на основе метода конечных элементов с использованием программного комплекса «ANSYS», экспериментальные исследования осуществлялись с использованием традиционных и современных средств измерения. Полученные результаты исследований обрабатывались статистическими методами обработки информации с применением программных комплексов.

Личный вклад автора заключается в следующем:

- выбор и обоснование актуальности темы исследования;
- постановка цели исследования и формирование задач для ее реализации;
- обзор и анализ отечественных и зарубежных достижений в области усиления деревянных конструкций;
- разработка и обоснование способов армирования и методики расчета армированных изгибаемых деревянных элементов;
- разработка программы и проведение численных и экспериментальных исследований, усиленных изгибаемых деревянных элементов;
- сопоставление полученных результатов численных и экспериментальных исследований;
- разработка рекомендаций для проектирования и производства работ по усилению изгибаемых деревянных конструкций.

На защиту выносятся:

1. Разработанные методы повышения прочности и жесткости изгибаемых деревянных конструкций полимерными композитами.
2. Методика расчета усиления деревянных конструкций продольным и наклонным армированием.

3. Результаты исследования напряженно-деформированного состояния усиленных деревянных конструкций.

4. Методика и результаты численного моделирования и расчета совместной работы изгибаемого деревянного элемента и полимерного композита.

5. Методика и результаты экспериментальных исследований деревянных конструкций, армированных полимерными композитами, в том числе и балок составного сечения.

Степень достоверности проведенных исследований обеспечена:

- общепринятыми гипотезами и допущениями строительной механики и теории упругости;
- корректностью принятой расчетной модели для численных исследований;
- сходимостью результатов расчетов по предложенной методике с проведенными численными и экспериментальными исследованиями.

Практическое значение работы заключается в том, что автором были разработаны методы повышения несущей способности и жесткости новых и эксплуатируемых изгибаемых деревянных конструкций, разработана методика расчета и проведения испытаний, армированных изгибаемых деревянных элементов. Результаты исследований вошли в проект СП «Конструкции деревянные. Правила ремонта и усиления полимерными композитами» и проект изменений СП 64.13330.2017 «СНиП II-25-80 Деревянные конструкции».

Внедрение результатов. Разработанные методы усиления деревянных конструкций и методика расчета были использованы при изготовлении деревянных балок перекрытий для малоэтажного строительства, при усилении балок перекрытия гостиничного комплекса в Московской области, при реконструкции перекрытия здания в г. Одесса, Украина.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены и доложены:

1. Научно технические конференции с международным участием «Деревянные конструкции: разработка, исследование, применение» при ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, г. Москва, 2015 и 2016 гг.

2. XIX, XX, XXI Международный симпозиум «Современные строительные конструкции из металла и древесины» при Одесской государственной академии строительства и архитектуры, г. Одесса, Украина (2015-2017 гг.)

3. Международная научно-практическая конференция «Инновации в деревянном строительстве» при СПбГАСУ и ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, г. Санкт-Петербург, 2018г.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 5 научных статей, в том числе 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ. Общее число печатных листов – 1,64; выполненных автором – 0,76. Получен 1 патент на изобретение и 1 патент на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и 3 приложений. Объем работы составляет 186 страниц машинописного текста, содержит 113 рисунков и 8 таблиц.

Содержание диссертации соответствует пунктам 3, 8 Паспорта специальности 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследований, приведены основные положения, которые выносятся на защиту, обоснована их научная новизна и практическое значение.

В первой главе рассмотрены основные способы усиления деревянных конструкций, проанализированы их преимущества и недостатки. Установлено, что армирование – это наиболее эффективный способ усиления изгибаемой деревянной конструкции, который позволяет сохранить внешний вид усиливаемого элемента, что важно при реконструкции зданий исторического и культурного значения. Вопросам армирования деревянных конструкций посвящены труды Бондина В.Ф., Колпакова С.В., Кулиша В.И., Линькова И.М., Найчука А.Я., Накашидзе Б.В., Погорельцева А.А., Рощиной С.И., Стоянова В.В., Турковского С.Б., Щуко В.Ю., Borri A., Corradi M., Fischer A., Granholm H., Meier U. и многих других ученых. Обзор позволил сделать вывод, что наиболее распространенные способы армирования основаны на использовании стальных стержней в качестве арматуры и являются достаточно трудозатратными, ориентированными на применение на этапе производства конструкции. К актуальным проблемам развития армированных ДК следует отнести:

- 1) комплексное усиление путем продольного и поперечного армирования;
- 2) усиление конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений;

- 3) коррозионная стойкость усиленных конструкций к химически агрессивным воздействиям окружающей среды и условий эксплуатации;
- 4) радиопрозрачность и повышенные диэлектрические характеристики;
- 5) повышение сдвиговой прочности конструкции;
- 6) снижение трудоёмкости и материалоёмкости работ по усилению.

Для решения этих проблем целесообразно использовать композитные материалы на основе угле-, арамидо-, стекловолокна. В практике строительства из древесины известны примеры усиления конструкций полимерными композитами, но объем реализованных проектов и исследований в области ДК существенно уступает железобетонными и металлическими конструкциями. Опыт показывает, что наибольший эффект достигается при усилении изгибаемых элементов, но вопросы усиления остаются недостаточно изученными. Отсутствие нормативной базы в области усиления ДК полимерными композитами как в России, так и за рубежом, сдерживает развитие этой области ДК. На основе анализа современного состояния вопроса были сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

Вторая глава посвящена теоретическим исследованиям армированных изгибаемых деревянных конструкций. Приведены особенности работы древесины как конструкционного материала, установлен ряд допущений, принимаемых при расчете армированного деревянного элемента, а именно: одинаковый модуль упругости древесины при сжатии и растяжении, совместность деформаций древесины и армирующего материала, сечения конструкции плоские до деформации остаются плоскими и после деформации, отсутствие сил трения в швах сплачивания. Расчет армированных ДК ведется по приведенным геометрическим характеристикам и с учетом только упругой работы древесины и арматуры. Предложены схемы армирования и дан алгоритм вычисления приведенных геометрических характеристик сечений армированных конструкций.

В главе приведен порядок расчета изгибаемых деревянных элементов, усиленного продольным армированием по всей длине для новых и эксплуатируемых конструкций. Армирование снижает уровни действующих в древесине напряжений только от той части нагрузок, которая приложена после усиления конструкции. Для таких конструкций сумма напряжений и деформаций, действующих до усиления (σ_0, τ_0, f_0) и возникающих от дополнительной нагрузки после усиления (σ_y, τ_y, f_y), должна удовлетворять условиям 1-3.

$$\sigma_0 + \sigma_y \leq R_{изг} \quad (1) \quad \tau_0 + \tau_y \leq R_{ск} \quad (2) \quad f_0 + f_y \leq f_{пр} \quad (3)$$

где $R_{изг}$ – расчетное сопротивление древесины изгибу; $R_{ск}$ – расчетное сопротивление древесины скалыванию; $f_{пр}$ – предельные допустимые прогибы конструкции.

По первой группе предельных состояний проверяется прочность изгибаемых деревянных элементов, усиленных продольным армированием по всей длине:

а) на действие нормальных напряжений в сжатой и растянутой зонах:

$$\sigma_d^c = \frac{M}{W_{пр}^c} \leq R_{изг} \quad (4) \quad \sigma_d^p = \frac{M}{W_{пр}^p} \leq R_{изг} \quad (5)$$

где M – расчетный изгибающий момент; $W_{пр}^c$ – приведенный момент сопротивления сжатой зоны; $W_{пр}^p$ – приведенный момент сопротивления растянутой зоны;

б) на действие касательных напряжений в древесине:

$$\tau_d^{ск} = \frac{Q \cdot S_{пр}}{I_{пр} \cdot b} \leq R_{ск}, \quad (6)$$

где Q – значение поперечной силы; $S_{пр}$ – приведенный статический момент сдвигаемой части сечения; $I_{пр}$ – приведенный момент инерции; b – расчетная ширина сечения деревянного элемента;

в) на действие нормальных напряжений в полимерном композите:

$$\sigma_k = n \cdot \frac{M}{W_{пр}} \leq R_k, \quad (7)$$

где n – коэффициент приведения; R_k – расчетное сопротивление полимерного композита растяжению.

г) на действие касательных напряжений в клеевом шве «древесина-композит»:

$$\tau_k^{ск} = \frac{Q \cdot S_{пр}^k}{I_{пр} \cdot b_k} \leq R_{м.ск}, \quad (8)$$

где $S_{пр}^k$ – приведенный статический момент композита относительно нейтральной оси; b_k – ширина (периметр) клеевого шва «древесина-композит», воспринимающего усилия сдвига; $R_{м.ск}$ – расчетное сопротивление древесины местному скалыванию вдоль волокон для клеевых соединений.

В целях снижения материалоемкости предложен вариант армирования конструкции только в местах действия максимальных нормальных напряжений. Принципиальная схема такого армирования приведена на рисунке 1. На рисунке значение σ_1 соответствует максимальному значению нормальных напряжений в

древесине до усиления, значение σ_2 – максимальному значению нормальных напряжений после усиления.

Длина армируемой зоны – это сумма длины участка $l_{\max\sigma}$, на котором напряжения в древесине до усиления (σ_1) превышают значения напряжений в древесине после усиления (σ_2), и длин участков анкерования композита ($l_{\text{анк}}$). Минимальная длина анкерования определяется из условия прочности древесины на местное скалывание вдоль волокон:

$$l_{\text{анк}} = \frac{\sigma_k \cdot F_k}{R_{\text{м.ск}} \cdot b_k} \quad (9)$$

где F_k – площадь поперечного сечения композита.

На участке с переменным уровнем нормальных напряжений по длине необходимо выполнять проверку на прочность клеевого шва «древесина-композит»:

$$\tau_x^{\text{ск}} = \frac{(M_2 - M_1) \cdot S_{\text{пр}}^k}{I_{\text{пр}} \cdot F_{\text{ск}}} \leq R_{\text{м.ск}}, \quad (10)$$

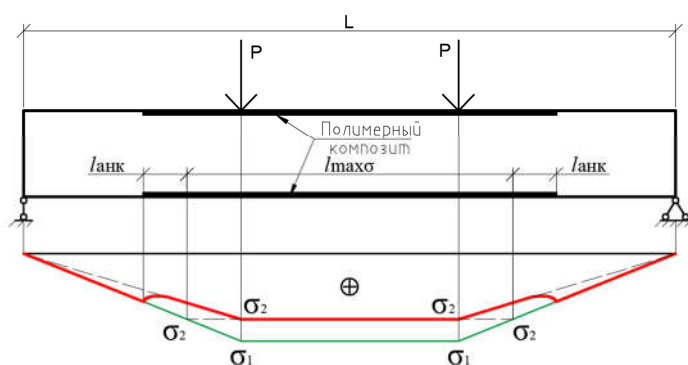


Рисунок 1 – Схема продольного армирования на участке действия максимальных напряжений

растянутой зоне приведена на рисунке 2.

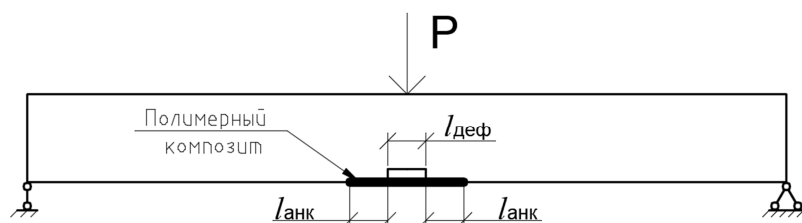


Рисунок 2 – Принципиальная схема усиления участка с дефектом

армирования определяется суммой длины дефекта $l_{\text{деф}}$ и длин участков анкерования $l_{\text{анк}}$ композита.

К характерным для изгибаемых ДК дефектам относится наличие в растянутой зоне совпадающих по сечению зубчатых шипов, врезок, прорезей, пороков. Эти дефекты можно устранить путем локального армирования с применением полимерных композитов. Схема усиления балки с дефектом в

При локальном усилении ослабленного участка несущую способность и жесткость конструкции возможно лишь восстановить до исходных проектных значений. Длина

В условиях эксплуатации часто отказы балок происходят по причине снижения сдвиговой прочности из-за усушечных трещин в древесине и расслоений по клеевым швам. В конструкциях из цельной древесины продольные трещины в основном имеют усушечный характер, являются сердцевинными, объясняются цилиндрической анизотропией строения древесины и разницей влажностных деформаций. При образовании такой трещины балка работает, как составной элемент без связей. Так, трещина в середине высоты сечения снижает прочность балки в два раза, жесткость – в четыре.

Для устранения дефекта конструкции с продольными трещинами необходимо восстановить несущую способность постановкой связей сдвига. В настоящее время для этого используют соединения на наклонно вклеенных стальных стержнях, обычно из арматуры А400-А500. В работе вместо стальных стержней используются полимерно-композитные. Это расширяет область применения таких соединений на несущие конструкции в зданиях с агрессивной к стали средой. В главе приведен алгоритм расчета несущей способности одного вклеенного стержня на сдвиг T согласно СП64.13330.2017 применительно к композитным стержням, а также даны предложения по выбору схемы расстановки стержней.

$$T = R_{cp} \pi d_{отв} l_p k_d k_c k_\sigma \cos \alpha \leq R_k F_k \cos \alpha, \quad (11)$$

где R_{cp} – расчетное сопротивление клеевого шва на выдергивание; $d_{отв}$ – диаметр отверстия; l_p – минимальная длина заделки вклеенного стержня в сдвигаемой части; k_d – коэффициент, учитывающий зависимость расчетного сопротивления клеевого шва на продавливание от диаметра стержня; k_c – коэффициент неравномерности распределения касательных напряжений по длине вклеенного стержня; k_σ – коэффициент зависящий от знака нормальных напряжений в зоне расстановки стержней; R_k – расчетное сопротивление композитной арматуры растяжению; F_k – площадь сечения арматурного стержня; α – угол наклона стержня.

Проверка на прочность балки составного сечения производится с учетом коэффициента влияния податливости клеевого соединения k_w :

$$\frac{M}{W_{расч} k_w} \leq R_n, \quad (12)$$

Кроме того, исходя из результатов проведенных исследований, опыта проектирования и эксплуатации, наклонное армирование рекомендовано

применять в качестве аварийных связей сдвига в балках на участках действия максимальных поперечных сил.

Третья глава посвящена численным исследованиям напряженно-деформированного состояния армированных изгибаемых деревянных элементов в программном комплексе «ANSYS». Результаты расчетов сравнивались с теоретическими предпосылками второй главы и показали высокую сходимость.

Моделирование и решение задачи проводилось в «ANSYS Workbench». Для исследований были приняты балки размерами 100×350×3200 мм, загруженные сосредоточенными нагрузками в третях пролета.

Моделирование объемной конструкции произведено в стандартной надстройке DesignModeler, после чего полученная геометрия была импортирована в надстройку Static Structural, где телам были присвоены характеристики материалов и заданы граничные условия. Для древесины основные характеристики принимались в соответствии с СП 64.13330.2017. Характеристики полимерных композитов приняты согласно действующим ГОСТам и ТУ на производство материала. В исследованиях клеевое соединение смоделировано как абсолютно жесткое, а контакт деревянных элементов между собой (в составных балках) задан с отсутствием воздействия сил трения.

В главе приводятся результаты сравнительных расчетов деревянных конструкций, армированных стеклопластиковыми стержнями и углепластиковыми ламелями. Компьютерным моделированием подтверждены теоретические предпосылки о влиянии величины модуля упругости армирующего материала на эффективность усиления. При усилении ламелями сечением 1.4×50 мм каждая с модулем упругости 230 ГПа, по две в сжатой и растянутой зонах, прогибы конструкции снизились на 34%. Усиление аналогичной конструкции стержнями из стеклопластика диаметром 20мм с модулем упругости 50 ГПа, по два в каждой зоне, позволяет снизить прогибы на 21%.

Моделирование работы балки, армированной углепластиком на участках действия максимальных нормальных напряжений, позволило изучить НДС в зоне «обрыва» арматуры. При недостаточной длине анкеровки в древесине концентрируются значительные нормальные напряжения, превышающие напряжения в зоне максимального момента. Исследования позволили установить зависимость значения локальных нормальных напряжений в древесине на краях арматуры от длины анкеровки. Результаты расчета приведены в виде графика на рисунке 3. Требуемая длина ламели, определенная согласно теоретическим

предпосылкам, позволила избежать в зоне концентрации превышения значений максимальных напряжений в балке (рисунок 4).

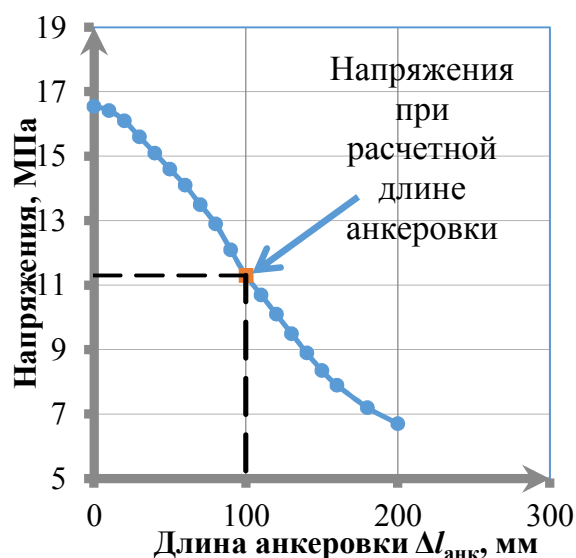


Рисунок 3 - Зависимость напряжений в древесине от длины анкеровки

Дефект, ослабляющий сечение со стороны растянутых волокон в зоне чистого изгиба моделировался врезкой длиной 100 мм и глубиной 30 мм. В таком элементе по сравнению с балкой без повреждений, при действии расчетной нагрузки отмечено увеличение максимальных нормальных напряжений. В балке без дефекта в зоне чистого изгиба напряжения равнялись 13 МПа, после создания дефекта в сжатой зоне напряжения составили 14,3 МПа, а в растянутой зоне – 26 МПа, что вдвое больше расчетных значений (рисунок 5а).

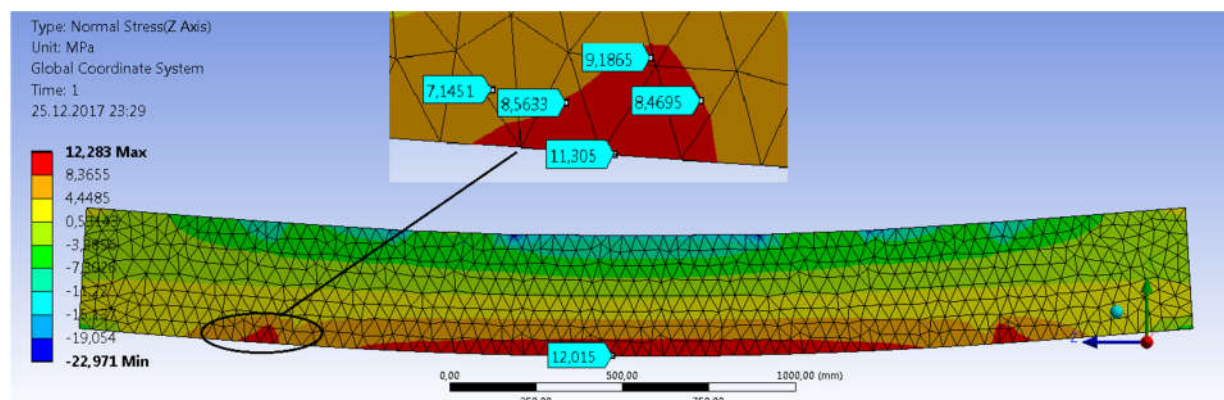
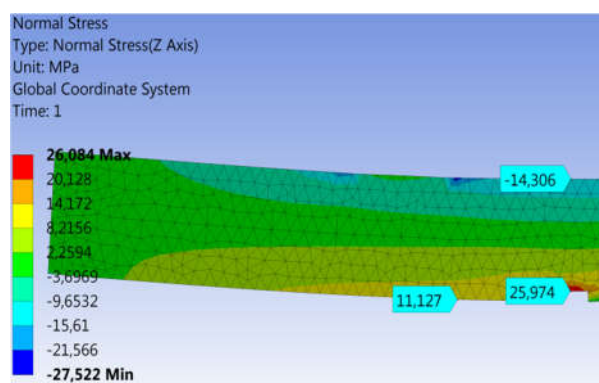
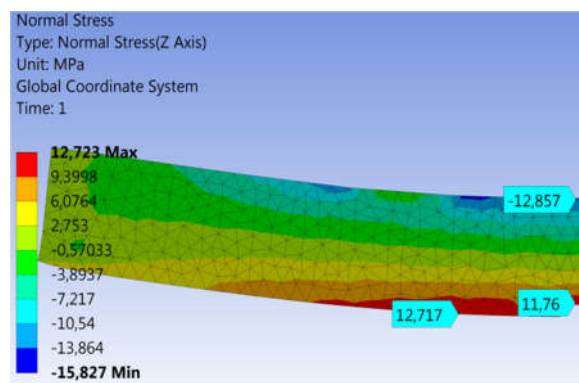


Рисунок 4 – Изополя нормальных напряжений в древесине балки

а)



б)

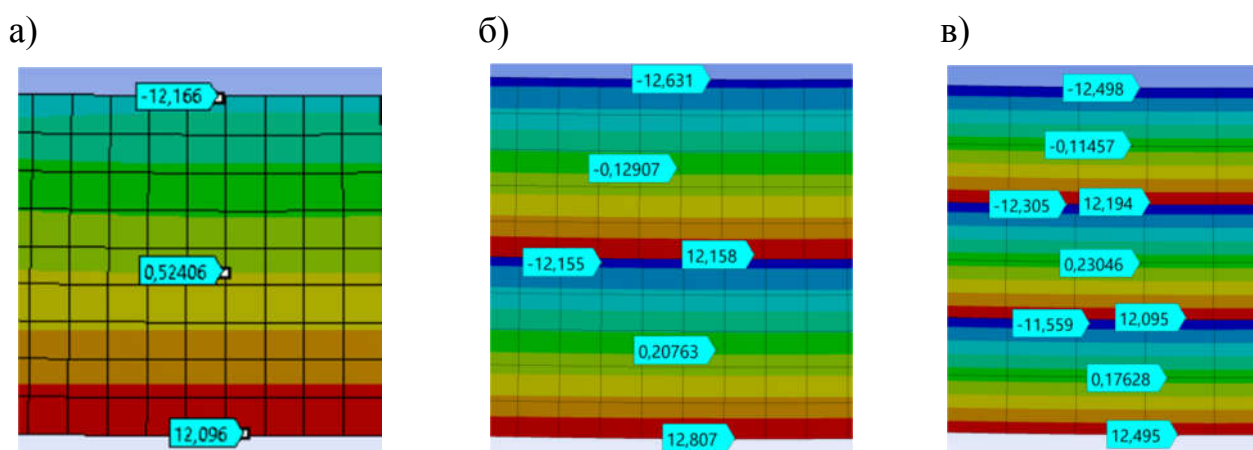


а – без усиления; б – усиленная

Рисунок 5 – Напряжения в древесине балки с дефектом

Максимальные прогибы конструкции с дефектом составили 9.9 мм, что на 8% превышает прогибы целой балки. Также исследована концентрация растягивающих напряжений, направленных поперек волокон, вокруг участка с дефектом, величина которых достигала 1.19 МПа, что значительно превышает расчётное сопротивление растяжению поперек волокон. Коэффициент концентрации составил $\alpha_k=12$, такая концентрация приводит к разрушению конструкции по причине раскалывания древесины поперек волокон. При численных исследованиях рассмотрены три варианта усиления – горизонтальное и вертикальное расположение ламелей из углепластика и усиление тканью на основе углеволокна. Постановка композита в зоне дефекта снизила нормальные напряжения вдоль и поперек волокон древесины (рисунок 5б) и прогибы до расчетных значений.

Исследования эффективности работы стеклопластиковых стержней в качестве связей сдвига заключались в сравнительной оценке НДС балки цельного сечения, балок составного сечения из двух и трех элементов без связей и со связями. При отсутствии связей сдвига в составной балке, ее ветви работают как отдельные элементы, что значительно снижает прочность и жесткость конструкции. На рисунке 6 приведены изополя нормальных напряжений в зоне чистого изгиба при примерно одинаковых уровнях нормальных напряжений вдоль волокон: для цельной балки при нагрузке 50 кН, для составных балок из двух и трех элементов без связей при нагрузках 25 кН и 16.1 кН соответственно.

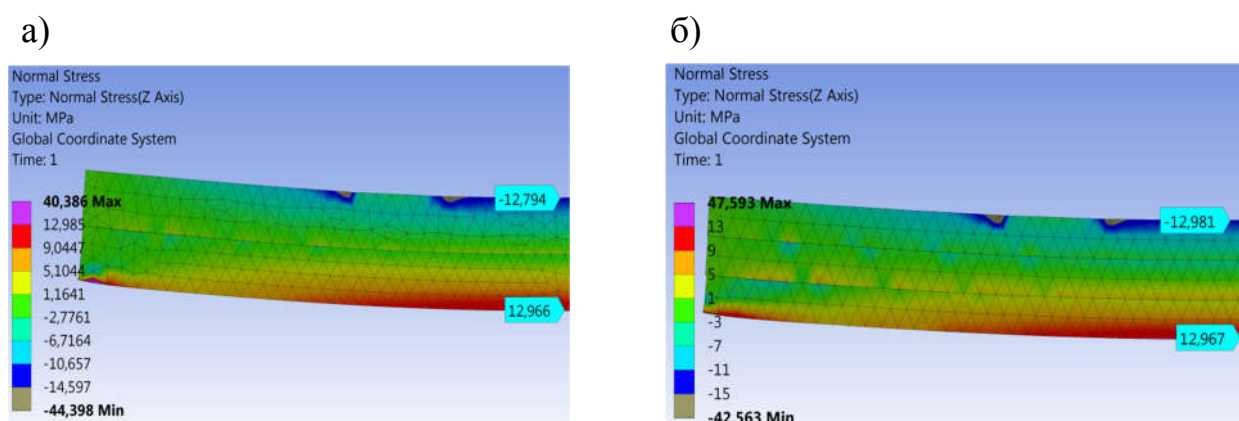


а – цельная балка; б – балка из двух элементов; в – балка из трех элементов

Рисунок 6 – Изополя нормальных напряжений в балках, МПа

Следующий этап исследования заключался в моделировании тех же балок с наклонными связями из стеклопластиковых стержней диаметром 20 мм. В каждой половине балок моделировалось по 4 стержня, установленных симметрично относительно середины пролета. После установки связей составной элемент стал

работать, как конструкция сплошного сечения. При нагрузке 47.5 кН, что составляет 95% от расчетной нагрузки для цельной балки, максимальные нормальные напряжения сжатия и растяжения в крайних фибрах составного сечения балки с наклонно вклеенными связями не превышали расчетного сопротивления древесины (13 МПа), нейтральная линия проходит через центр сечения (рисунок 7). При одинаковых размерах поперечного сечения, составные балки без связей сдвига обладают малой жесткостью по сравнению с цельными. Постановка связей в балку из двух и трех элементов позволила повысить жесткость конструкции в 4 и 8 раз соответственно.



а – балка из двух элементов; б – балка из трех элементов

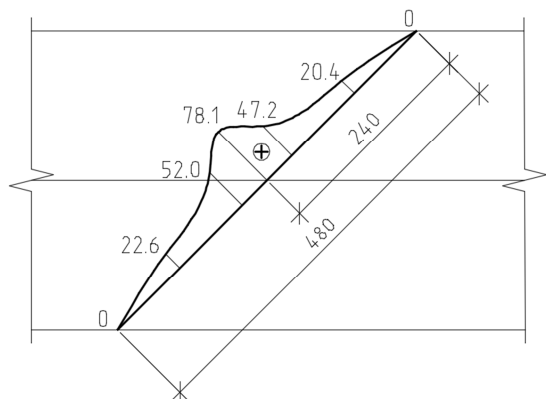
Рисунок 7 – Изополя нормальных напряжений в балках со связями сдвига

В ходе исследований изучена работа стержня в качестве связи сдвига. Установлено, что максимальные значения растягивающих напряжений в стержне приходятся на сечение в местах контакта деревянных элементов между собой, тогда как на верхней и нижней гранях балки напряжения стремятся к нулю, эпюра напряжений приведена на рисунке 8. Результаты исследований показывают, что составная балка незначительно уступает по жесткости балке цельного сечения, что обусловлено незначительной податливостью клеевого шва наклонных связей из композитных материалов.

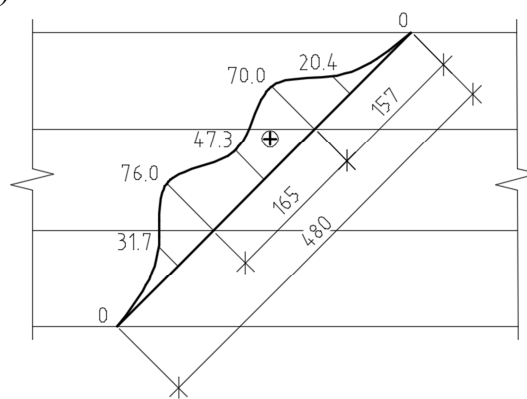
Численные исследования включали расчет балок пролетом (3...12)м с целью определить коэффициент $k_{ж}$, для учета податливости соединения при проверке балки по второй группе предельных состояний. На основании полученных результатов, величина коэффициента $k_{ж}$ независимо от пролета для двух- и трехветвевых составных конструкций со связями из стеклопластиковой арматуры может быть принята равной 0.85, для четырехветвевых – 0.75. Наклонное армирование также рекомендуется применять в качестве аварийных связей в цельных конструкциях без дефектов, для предотвращения негативных

последствий от продольных трещин, которые могут появиться в древесине в процессе их эксплуатации из-за нарушений требований к изготовлению, транспортировке, монтажу и температурно-влажностным условиям эксплуатации.

а)



б)



а – в балке из двух элементов; б – в балке из трех элементов

Рисунок 8 – Эпюры нормальных напряжений в связях сдвига

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям и проверке сходимости результатов с данными теоретических и численных исследований. Для оценки возможности замены арматурной стали на стеклопластик проведена серия испытаний клеенных стержней на продавливание. Во всех случаях разрушение происходило от среза (скалывания) древесины поперек волокон. Результаты свидетельствуют о том, что прочностные и деформационные свойства клеевого соединения стержней из стеклопластика с древесиной не уступают показателям для стальной арматуры и они могут быть использованы для армирования деревянных конструкций и в качестве наклонно клеенных связей сдвига.

Для натурных испытаний были приняты балки из древесины II сорта размерами 100×420×3500 мм и 100×350×3500 мм. Испытание проводилось по схеме чистого изгиба с нагрузками в третях или четвертях пролета, обеспечивающей требуемое соотношение максимальных касательных и нормальных напряжений. Оснастка состояла из силовой платформы, закрепленной на ней П-образной рамы, под которой в середине пролета располагался гидравлический домкрат. Усилия от домкрата через стальную траверсу распределялись на балку через две точки приложения нагрузки.

Для чистоты эксперимента и оценки эффективности усиления методикой эксперимента было предусмотрено испытание в несколько этапов. На первом этапе испытывались балки без усиления в пределах расчетной нагрузки, затем балки усиливались. На последнем этапе балки доводились до разрушения.

Три балки сечением 100×420 мм были усилены продольным армированием стержнями из стеклопластика – в растянутой и сжатой зонах клеивалось по одному стержню диаметром 20 мм. Расчетная нагрузка для усиленной балки составила 112 кН, что на 20% больше чем для неусиленной. Нагружение проводилось приложением двух сосредоточенных сил в четвертях пролета. Смещенные к опорам силы позволили оценить работу конструкции в приопорной зоне под действием повышенной поперечной силы. Во всех балках прогибы показали линейную зависимость от нагрузки.

Прогибы в усиленных балках уменьшились в среднем на 14.4%. Все балки имели хрупкий характер разрушения, в двух случаях разрушение происходило от скалывания древесины по границе паза для арматуры (рисунок 9), в третьем случае разрушение произошло от скалывания растянутого стержня относительно навивки и одновременного разрыва нижних ламелей балки. Среднее значение разрушающей нагрузки – 267.6 кН, что в 2.35 раз выше расчетной нагрузки для усиленной балки и в 2.8 раз больше, чем для балки без усиления. Характер разрушения подтвердил необходимость установки наклонных стержней в приопорных зонах для повышения сдвиговой прочности.



Рисунок 9 – Скалывание древесины

Для исследования эффективности продольного армирования участков с максимальными нормальными напряжениями была выбрана балка размерами $100 \times 350 \times 3500$ мм, аналогично численным исследованиям, загруженная по схеме чистого изгиба двумя сосредоточенными силами в третях пролета. Армирование принято симметричным – в растянутой и сжатой зоне конструкции было клеено по две

углепластиковые ламели марки FibArm HS 14/50, сечение ламели – 1.4×50 мм. Для повышения сдвиговой прочности в зонах действия максимальных касательных напряжений балка была усилена наклонным армированием стеклопластиковыми стержнями диаметром 20 мм. Расчетная нагрузка для армированной балки составляла 64.8 кН, что на 33% больше чем для неусиленной.

Усиленная балка была доведена до разрушения, которое носило хрупкий характер и произошло от скалывания на опоре с одновременным разрывом

растянутых волокон за пределами анкеровки углепластика (рисунок 10). Разрушающая нагрузка составила 207.3 кН, что в 3.2 раза выше расчетного значения. Прогибы в середине пролета уменьшились на 10%, на всех ступенях нагружения, вплоть до разрушения зависимость прогибов от нагрузки носила линейный характер. Данный способ армирования позволил добиться существенной экономии полимерных композитных материалов. Израсходовано 6920 мм углепластиковой ламели (четыре отрезка по 1730 мм), вместо 12 800 мм в случае армирования по всей длине. Стоимость одного погонного метра такой ламели составляет 2200 рублей, экономия достигает 12 936 рублей.

а)



б)



а – скалывание на опоре; б – разрыв волокон

Рисунок 10 – Разрушение армированной балки

а)



б)



а – общий вид дефекта; б – усиление углепластиком

Рисунок 11 – Усиление балки в зоне дефекта

Исследования локального армирования проводились на балках с искусственными дефектами в виде врезки либо прорези в растянутой грани в зоне чистого изгиба. Рассмотрены три варианта усиления – углепластиковыми ламелями, тканью на основе углеродных волокон и стеклопластиковой арматурой.

В балке, усиленной углепластиком, дефект представлял собой врезку глубиной 35 мм (рисунок 11). Нагрузка прикладывалась в третях пролета. Ослабление в середине пролета привело к снижению несущей способности на

24%, расчетная нагрузка составляла 40.4 кН, прогибы увеличились на 12%. После усиления балка испытывалась до разрушения.

При нагрузке 112 кН в зоне чистого изгиба произошел разрыв волокон древесины в растянутой зоне на расстоянии ~30мм от нижней грани, по зубчатому шипу, за зоной анкеровки углепластика. Ламель из углепластика и клеевое соединение с нижней доской остались без разрушений, остался без повреждений и участок над дефектом, что свидетельствует о снижении концентрации напряжений в данной зоне.

Разрушение от разрыва волокон свидетельствует о том, что несущая способность балки определяется не зоной дефекта, усиленной локальным армированием, а прочностью древесины. Разрушающая нагрузка превысила расчетную более чем в 2.2 раза. Прогибы конструкции после усиления уменьшились на 9.1%, что свидетельствует о фактически полном восстановлении жесткости балки.

По аналогичной схеме проведены испытания балки с локальным усилением композитом на основе углеродной ткани. В испытании глубина дефекта составила 20 мм. Участок был усилен шестью слоями ткани, наклеенными послойно, с пропиткой клеем каждого слоя. Длина анкеровки составила 180 мм в каждую сторону от краев врезки. На рисунке 12 приведен график зависимости прогибов от нагрузки, которая на всех этапах исследования сохраняла прямо пропорциональный характер.

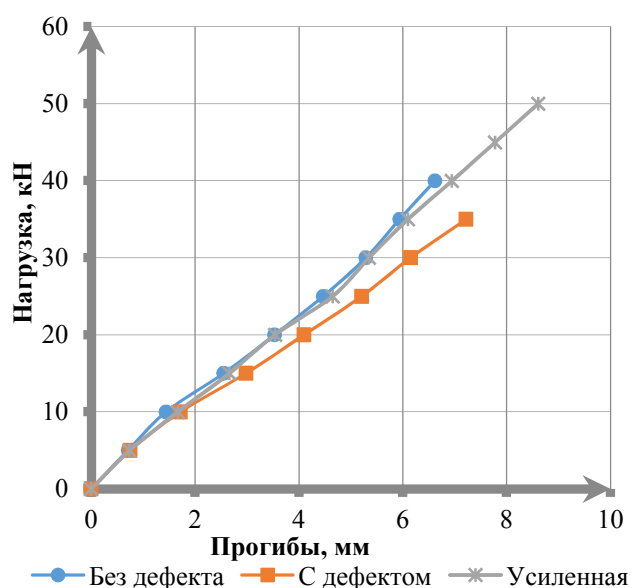


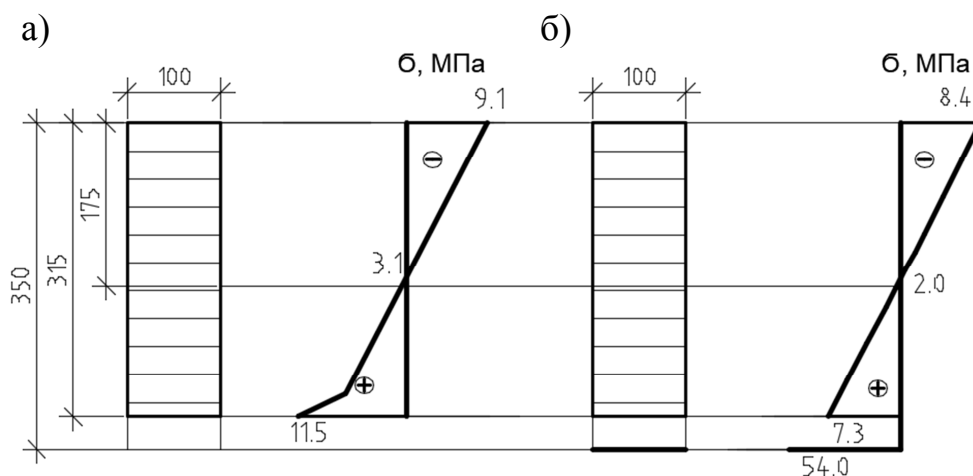
Рисунок 12 – График зависимости прогибов от нагрузки

Дефект на 20% увеличил деформативность конструкции. Усиление позволило практически полностью восстановить жесткость балки.

Нормальные напряжения в крайних растянутых волокнах ослабленного сечения до и после усиления балки при нагрузке 35 кН составили 12.7 и 7.3 МПа соответственно (рисунок 13).

Часто при проектировании возникает задача устройства различного рода врезок и отверстий большого диаметра под инженерные сети.

Исследования балки, усиленной продольным армированием стеклопластиковыми стержнями были направлены на изучение возможности применения такого метода усиления при устройстве врезок (отверстий) под оборудование и при усилении существующих конструкций с дефектами значительной глубины.



а – до усиления; б – после усиления

Рисунок 13 – Эпюры нормальных напряжений в ослабленном сечении балки

Для испытания была принята балка размерами 100×420×3500 мм. Нагружение производилось двумя сосредоточенными в четвертях пролета силами. Расчетная нагрузка на балку составляла 93.7 кН. На первом этапе испытания не усиленную конструкцию нагружали до 80 кН, с определением прогибов.



Рисунок 14 – Участок конструкции с искусственным дефектом

Второй этап предусматривалклеивание в растянутую и сжатую зоны балки по одному стержню из стеклопластика диаметром 20мм, после чего конструкцию нагружали ступенями до 100 кН с определением прогибов.

Перед проведением третьего этапа в растянутой зоне в середине пролета был создан искусственный дефект глубиной 100 мм, что составляет 25% высоты сечения. Дефект выполнен в виде пропила в древесине без нарушения целостности стержня (рисунок 14). На третьем этапе эксперимента балка доведена до разрушения при нагрузке составила 212 кН, что превысило расчетное значение нагрузки для балки без усиления в 2.26 раз. На данном этапе

прогибы приблизились к значениям прогибов неусиленной балки, но не превысили их.

Разрушение носило хрупкий характер и происходило в две стадии, на первой при нагрузке 212 кН произошло скалывание нижних волокон древесины у опоры и падение нагрузки до 153 кН, а на второй при повышении нагрузки до 191 кН, произошел разрыв нижних волокон в зоне чистого изгиба.

При испытаниях составной балки исследовалась работа стеклопластиковой арматуры в качестве связей сдвига в составных элементах. Для испытания использовалась балка размерами 100×350×3500 мм, нагрузка прикладывалась двумя сосредоточенными силами в третях пролета. Методика проведения эксперимента предусматривала три этапа.

На первом балка нагружалась в пределах расчетной нагрузки с определением прогибов. На втором этапе моделировался составной элемент без связей, балка была распилена по нейтральной оси на два равных элемента (рисунок 15). Для того чтобы минимизировать влияние сил трения по контакту сплачивания в шов укладывались 2 слоя полиэтиленовой ленты с прослойкой солидола.



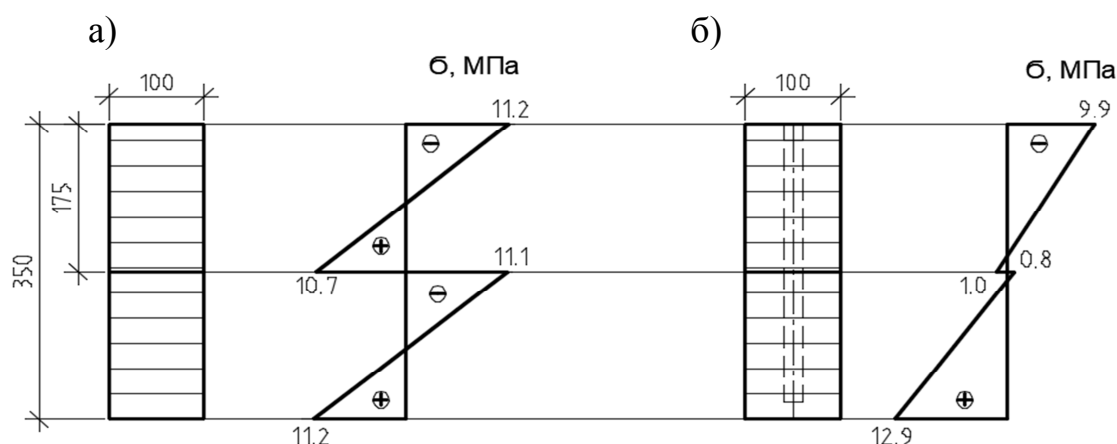
Рисунок 15 – Подготовка
ко второму этапу

Конструкция нагружалась до 20 кН ступенями по 2 кН. Расчетная нагрузка для такой балки составляла 24.4 кН. При нагрузке 20 кН деформации сдвига на торцах балки достигали 3.5 мм. Прогибы составили 12 мм, что в четыре раза превысило прогибы цельной балки при аналогичной нагрузке.

Для третьего этапа балка составного сечения объединялась наклонно вклеенными стеклопластиковыми стержнями периодического профиля диаметром 20 мм. Стержни вклеивались на эпоксидном клее под углом 45° в предварительно просверленные отверстия диаметром 25 мм. Длина стержня составила 450 мм. Расчетная нагрузка для такой балки составляла 45.3 кН. Балка была доведена до разрушения, которое произошло на стадии повышения нагрузки при значении ~105 кН, носило хрупкий характер и произошло от разрыва волокон в растянутой зоне. Значение разрушающей нагрузки больше расчетной в 2.32 раза. На рисунке 16 приведены эпюры нормальных напряжений в середине

пролета при нагрузке 20 кН для балки без связей и при нагрузке 40 кН для балки с наклонными связями, полученные по результатам обработки данных тензометрии.

В балке со связями нормальные напряжения в середине сечения по швам сплачивания приблизились к нулевым значениям, что свидетельствует о работе конструкции, как единого цельного элемента. Сравнительный график зависимости прогибов в пределах расчетной нагрузки на разных этапах испытания приведен на рисунке 17.



а – в балке без связей (II этап); б) в балке после установки связей (III этап)

Рисунок 16 – Эпюры нормальных напряжений в балке составной балке

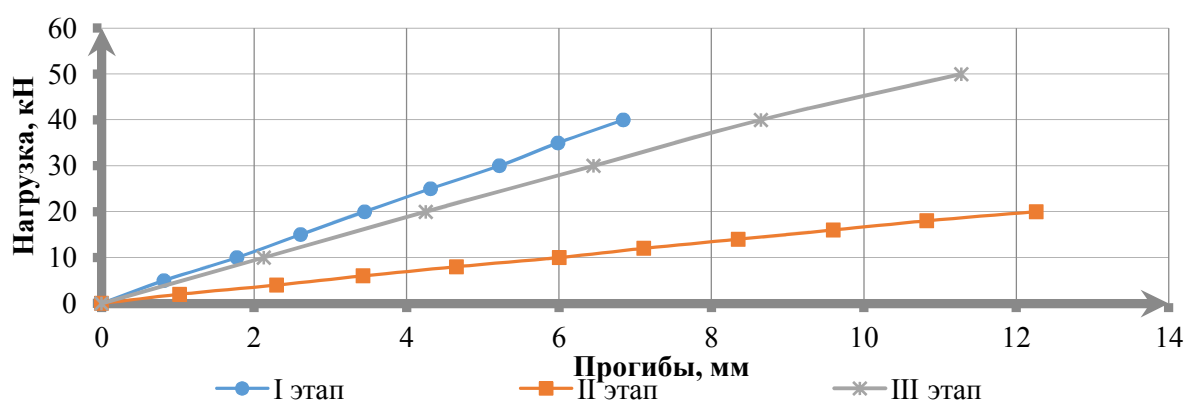


Рисунок 17 – График зависимости прогибов конструкции от нагрузки

После установки наклонных связей прогибы в составном элементе значительно уменьшились и сохраняли пропорциональную зависимость от нагрузки. Сдвиг ветвей составной балки на опорах по шву сплачивания уменьшился в 20 раз и практически не наблюдался, при расчетной нагрузке составлял 0.5 мм. Подтверждена возможность восстановления прочности и жесткости балок с продольными сквозными трещинами. Результаты эксперимента показали высокую сходимость с результатами численных исследований и подтвердили корректность компьютерного моделирования и предложенной методики расчета.

В пятой главе даны рекомендации по проектированию и производству работ по усилению изгибаемых деревянных элементов полимерными композитами. Описаны общие положения по анализу работы конструкции и выбору рационального метода усиления, выделены аспекты, на которые следует обращать внимание при обследовании зданий.

Приведены требования, предъявляемые к древесине усиливаемой конструкции. На основании расчетов и экспериментов даны комментарии о целесообразности применения конкретного типа полимерного композита в том или ином случае, выделены характерные особенности материалов. Описаны особенности клеевого соединения древесины и армирующего материала, приведены основные составы клеевых смесей, используемых при армировании деревянных конструкций.

Глава включает в себя рекомендации по расчету усиливаемых элементов, приведены упрощенные формулы определения приведенных геометрических характеристик элементов прямоугольного сечения при симметричном армировании. Параграф, посвященный конструированию, включает в себя требования по расположению полимерного композита в элементе, рекомендации по подбору оптимального количества армирующего материала. Даны предложения по повышению сдвиговой прочности конструкции в опорных зонах. Уделено внимание разработке указаний по обеспечению био- и огнезащиты конструкции. Описаны конструктивные и химические меры по защите конструкции от поражения гнилью и насекомыми-вредителями. Для обеспечения требуемой степени огнестойкости усиленных конструкции разработан ряд конструктивных мер для защиты полимерного композита и клеевого соединения от воздействия огня. Разработанные меры предусматривают сохранность внешнего вида конструкции, что позволяет применять их при реконструкции зданий исторического и культурного наследия.

На основе анализа отечественных и зарубежных источников и личного опыта, полученного в ходе изготовления конструкций, составлены рекомендации по производству работ по усилению новых и эксплуатируемых конструкций.

Даны рекомендации по первичному контролю конструкции, подготовке конструкции к клеиванию арматуры, температурно-влажностным условиям производства работы, приготовлению клеевой смеси, нанесению смеси на усиливаемый элемент и выдержке элемента для набора клеевым соединением достаточной прочности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ отечественных и зарубежных исследований в области усиления деревянных конструкций полимерными композитами показал, что данная область является недостаточно изученной во всем мире, а объем проводимых исследований недостаточен для создания полноценного нормативного документа и руководства для проектирования усиления.

2. Исследования носили комплексный характер и включали экспериментальные и численные исследования, результаты которых показали хорошую сходимости и соответствие теоретическим предпосылкам.

3. Приведена методика расчета усиления изгибаемых деревянных элементов продольным армированием. Проведен численный анализ влияния типа полимерного композита на эффективность усиления.

4. Разработана методика расчета конструкций, армированных на части длины – на участке с максимальными нормальными напряжениями.

5. Исследовано НДС конструкций в области анкеровки полимерного композита, установлено влияние длины анкеровки на концентрацию напряжений в древесине.

6. По результатам комплексных исследований разработана методика восстановления несущей способности и жесткости изгибаемых элементов с дефектами или пороками в растянутой зоне.

7. Сравнительные испытания стандартных образцов показали, что прочностные и деформационные свойства клеевого соединения стержней из стеклопластика с древесиной не уступают показателям для стальной арматуры и они могут быть использованы для армирования деревянных конструкций и в качестве наклонно вклеенных связей сдвига.

8. Исследована работа стеклопластикового стержня в качестве связи сдвига в составном деревянном элементе, разработана и экспериментально подтверждена методика расчета и конструирования деревянных балок составного сечения с такими связями.

9. По результатам численных исследований определен коэффициент $k_{ж}$, учитывающий влияние податливости соединения наклонно вклеенных стеклопластиковых связей сдвига на общую жесткость составной конструкции.

10. Разработаны рекомендации по проектированию и производству работ по усилению деревянных конструкций, включая меры по обеспечению долговечности.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Погорельцев А.А. Усиление деревянных балок с трещинами наклонным армированием стеклопластиковой арматурой / А.А. Погорельцев, **В.О. Стоянов** // Строительная механика и расчет сооружений. – 2018. – №1. – С. 60-65.
2. **Стоянов В.О.** Исследования балки, армированной полимерными композитами на участках с максимальными нормальными и касательными напряжениями / **В.О. Стоянов**, А.А. Погорельцев // Строительная механика и расчет сооружений. – 2018. – №3. – С. 70-74.

Публикации в других изданиях:

3. Погорельцев А.А. Высокомодульные материалы, используемые в массивных клеодошчатых конструкциях / А.А. Погорельцев, С.Б. Турковский, **В.О. Стоянов** // Современные строительные конструкции из металла и древесины: сб. научных трудов. – Одесса. – 2015. – С.106-109.
4. **Стоянов В.О.** Массивные КДК – некоторые особенности их конструирования и реконструкции / В.О. Стоянов // Современные строительные конструкции из металла и древесины: сб. научных трудов. – Одесса. – 2016. – С.161-164.
5. **Стоянов В.О.** Массивная клеодошчатая балка с конструктивными особенностями / В.О. Стоянов, А.С. Подгорный, Ш.Ж. Жгалли, В.В. Стоянов // Современные строительные конструкции из металла, древесины и пластмасс: сб. научных трудов. – Одесса. – 2017. – С.105-113.

Патенты:

1. Патент UA на изобретение №87286 C2 МПК(2009) E04C 3/12. Деревянная балка / В.В. Стоянов, **В.О. Стоянов**, В.В. Дорожкин, О.М. Горгола, А.В. Дорожкин. – Опубл. 10.07.2009, Бюл. №13, 2009г.
2. Патент UA на полезную модель №18593 U МПК(2006) E04C 3/00. Деревянная балка / В.В. Стоянов, **В.О. Стоянов**, В.В. Дорожкин, О.М. Горгола, А.В. Дорожкин. – Опубл. 15.11.2006, Бюл. №11, 2006г.