

На правах рукописи



Фёдоров Александр Михайлович

**УСИЛЕНИЕ НАХОДЯЩИХСЯ ПОД
НАГРУЗКОЙ СТАЛЬНЫХ ОДНОПРОЛЁТНЫХ
БАЛОК С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПОЗИТНЫХ
МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 2.1.1. Строительные конструкции,
здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2023

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Егоров Владимир Викторович;
доктор технических наук, профессор
Абу-Хасан Махмуд Самиевич

Официальные оппоненты: **Туснин Александр Романович**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Московский государственный строительный
университет», кафедра металлических
и деревянных конструкций, заведующий;

Салахутдинов Марат Айдарович
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Казанский государственный
архитектурно-строительный университет»,
кафедра металлических конструкций
и испытания сооружений, доцент.

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Томский государственный
архитектурно-строительный университет».**

Защита состоится «25» мая 2023 года в 13:30 часов на заседании диссертационного совета 24.2.380.01 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д.4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория №220 главного корпуса). Тел./Факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <https://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/fyodorov-aleksandr-mihaylovich>

Автореферат разослан «10» апреля 2023 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



В. М. Попов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Несущая способность строительных конструкций может измениться в процессе эксплуатации здания или сооружения и оказаться недостаточной для обеспечения её безопасной работы. Причинами недостаточной несущей способности стальных конструкций могут быть: а) повреждения, возникшие в процессе эксплуатации; б) дефекты, возникшие на этапе изготовления, транспортировки, монтажа; в) изменение условий эксплуатации; г) ошибки, допущенные на этапе проектирования.

Усиление стальных балок и их элементов предполагает после устранения повреждений выполнение работ по монтажу дополнительных стальных элементов с применением болтовых или сварных соединений. В описанном случае с целью обеспечения безопасности на период производства работ должны быть остановлены все технологические процессы, выполняемые в помещениях. Полная остановка производственного процесса в зданиях и сооружениях с круглосуточным режимом работы зачастую невозможна, что значительно ограничивает возможность усиления стальных балок с применением традиционных решений.

В последние десятилетия в Российской Федерации активно ведутся разработки новых типов полимерных композитных материалов. Разработаны новые виды стеклопластиков и углепластиков, совершенствуются нормативные методики расчёта строительных конструкций с применением полимерных композитных материалов, а также расширяется область их применения в строительстве. Полимерные армированные волокнами композитные материалы применяются как для усиления железобетонных, стальных, каменных и деревянных конструкций, так и для возведения новых конструкций, полностью выполненных из них.

Данная работа посвящена исследованию несущей способности и деформативности усиленных стальных балок, в том числе под нагрузкой, элементами, выполненными из полимерных волокнисто-армированных композитных материалов, с целью продления срока их эксплуатации.

Степень разработанности темы исследования

Элементы, выполненные из композитных материалов, преимущественно применяются для повышения несущей способности строительных конструкций, в том числе стальных конструкций. Вклад в исследование этого вопроса внесли учёные: Мухамедиев Т.А., Кузеванов Д.В., Иванов С.И., Фаликман В.Р., Шилин А.А., Картузов Д.В., Пшеничный В.А., Туснин А.Р., Данилов А.И., Демьяненко А.И., Ушков В.А., Симаков О.А., Осипов П.В., Трекин Н.Н., Кодыш Э.Н., Yoresta F.S., Buyukozturk O., Dawood M., Prabhu G.G., Peiris N.A., Zhang Z., Sayed-Ahmed E.Y., Ulger T., Altaee M., Colombi P., Basseti A., Nussbaumer A., Lu Y., Li W., Li S., Li X., Zhu T и др.

Балки, выполненные из нескольких разнородных материалов, представляют собой комбинированные балки. Современным нормативным документом, в котором дано определение, а также методика расчёта комбинированных балок является СП 266.1325800.2016 «Сталежелезобетонные конструкции». В 2014 г. введён в действие СП 164.1325800.2014 «Усиление железобетонных конструкций композитными материалами», впоследствии в 2017 г. разработаны СТО 38276489.002-2017 «Усиление каменных и армокаменных конструкций композитными материалами» и СТО 38276489.003-2017 «Усиление стальных конструкций композитными материалами», в которых изложены методики расчёта строительных конструкций, выполненных с усилением композитными материалами.

В 2014 г. введён в действие ГОСТ 33119-2014 «Конструкции полимерные композитные для пешеходных мостов и путепроводов», определяющий порядок проектирования и расчёта несущих и ограждающих конструкций, выполненных полностью из полимерных композитных материалов. В отраслевом документе ОДМ 218.2.058-2019 «Рекомендации по применению композиционных материалов в конструкциях мостовых сооружений и пешеходных мостов», разработанном Федеральным дорожным агентством (Росавтодор), уточнены и доработаны положения расчёта конструкций, выполненных полностью из полимерных волокнисто-армированных композитов.

Цель исследования – экспериментально-теоретическое обоснование целесообразности усиления стальных однопролётных балок элементами, выполненными из полимерных волокнисто-армированных композитов, с совершенствованием методики расчёта.

Задачи исследования:

1. Выполнить анализ известных технических решений комбинированных балок с оценкой возможностей применения полимерных волокнисто-армированных композитных материалов для усиления стенок стальных однопролётных балок.

2. Провести экспериментальные исследования работы стальных однопролётных балок, стенка которых усилена композитными элементами с целью повышения её устойчивости, а также оценить их влияние на величину критической нагрузки потери устойчивости.

3. На основе выполненного анализа и результатов экспериментальных исследований разработать новое конструктивное решение однопролётной стальной балки, стенка которой усилена композитными элементами с целью повышения её устойчивости.

4. Исследовать особенности напряжённо-деформированного состояния разработанного технического решения стальной балки с применением аналитического и численных методов.

5. Выполнить оценку технико-экономической эффективности по критерию себестоимости на примере изготовления двух вариантов усиления стальной стенки двутавровой балки: с применением системы продольных и поперечных рёбер, а также с применением композитных элементов.

Научно-техническая гипотеза: применение элементов, выполненных из композитных материалов, приводит к росту устойчивости усиливаемой ими стенки стальной балки за счёт их совместного взаимодействия.

Объект исследования: стальная однопролётная балка, усиленная элементами, выполненными из полимерного волокнисто-армированного композитного материала.

Предмет исследования: напряжённо-деформированное состояние стальной однопролётной балки, стенка которой усилена элементами из полимерных волокнисто-армированных композитных материалов.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК – 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения, по пунктам: 5 – «Обоснование технических решений по реконструкции, усилению и восстановлению элементов и конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений» и 8 – «Разработка новых и совершенствование рациональных типов несущих и ограждающих конструкций, конструктивных решений зданий и сооружений с учётом протекающих в них процессов, природно-климатических условий, механической, пожарной и экологической безопасности».

Научная новизна:

1. Исследована возможность применения полимерных волокнисто-армированных композитных материалов, разработанных на территории Российской Федерации, для выполнения усиления стальных однопролётных балок с целью повышения устойчивости их стенок.

2. По полученным экспериментальным данным определено влияние выбранного варианта усиления стенки стальной балки композитными элементами: вертикальными рёбрами, прямоугольными пластинами, – на величину критической нагрузки потери устойчивости, при которой измеряемая боковая деформация стенки достигает своего предельного допустимого значения.

3. С применением аналитического и численного методов расчёта определена рациональная форма плоскостных композитных элементов, используемых для усиления стальной стенки однопролётной балки с приложенной равномерно-распределённой нагрузкой.

4. Определено влияние параметров толщины и высоты усиливающих стальную стенку балки композитных пластин на величину критической нагрузки, при которой происходит её потеря устойчивости с развитием боковой деформации.

5. Разработано формульное выражение, позволяющее на начальном этапе проектирования определить предварительное значение требуемой толщины композитных пластин, применяемых для усиления стальной стенки балки.

Теоретическая значимость:

1. Доказана целесообразность применения элементов, выполненных из полимерных волокнисто-армированных композитных материалов, для усиления стенки стальной однопролётной балки в зданиях или сооружениях, имеющих круглосуточный режим работы.

2. Применительно к тематике диссертации эффективно использованы современные численные методы и информативные экспериментальные методы исследования потери устойчивости стенки стальной балки, выполненной как без усиления, так и с усилением композитными элементами.

3. Изложены положения аналитического решения задачи по определению рациональной формы плоскостных композитных элементов, применяемых для усиления стенок стальных однопролётных балок, нагруженных равномерно-распределённой нагрузкой.

4. Изучены закономерности влияния геометрических параметров плоскостных композитных элементов на величину критической нагрузки потери устойчивости усиливаемой стенки стальной балки с применением численных методов расчёта.

Практическая значимость:

1. Разработано новое конструктивное решение однопролётной комбинированной балки, выполненной из стального двутавра, стенка которого усилена симметрично с обеих сторон плоскостными композитными элементами особой формы.

2. Создана методика расчёта по определению предварительного значения толщины плоскостного композитного элемента, применяемого для усиления стальной стенки однопролётной балки.

3. Представлена оценка сравнения технико-экономической эффективности предложенного метода усиления стальной стенки однопролётной балки композитными пластинами в сравнении с альтернативным методом усиления, предполагающим монтаж системы продольных и поперечных стальных рёбер.

Методология и методы исследования основывается на применении общепринятых теоретических и эмпирических методах научного познания, классических положениях механики твёрдого деформируемого тела, применении вычислительного программного комплекса Ansys для расчёта строительных конструкций на основе метода конечных элементов, использовании теории расчёта конструкций разнородной упругости, нормированных положениях расчёта конструкций из композитных материалов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментальных исследований потери устойчивости стальных балок, выполненными как без усиления, так и с усилением композитными элементами.

2. Результаты разработки конструктивного решения однопролётной комбинированной балки, выполненной из стального двутавра, стенка которого усилена плоскостными композитными элементами особой формы.

3. Результаты анализа влияния изменения геометрических параметров плоскостных композитных элементов на значение критической нагрузки, при которой происходит потеря устойчивости усиленной стальной стенки комбинированной балки.

4. Результаты оценки технико-экономической эффективности двух вариантов усиления стальной стенки однопролётной балки: стальными рёбрами, композитными плоскостными элементами.

Степень достоверности результатов обеспечивается применением общепринятых понятий, гипотез и допущений механики твердого деформируемого тела; современного аналитического подхода анализа напряженно-деформированного состояния комбинированных конструкций с применением сертифицированного программного комплекса для расчёта строительных конструкций на основе метода конечных элементов Ansys; применением методик расчёта, установленных нормами проектирования стальных и композитных конструкций; использованием поверенного аттестованного измерительного оборудования; обеспечивается проведением физического эксперимента на примере однопролётной комбинированной балки с применением композитных материалов, удовлетворительной сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация результатов исследования.

Основные выводы и результаты диссертационного исследования представлялись на следующих конференциях, инженерных форумах:

1. III Бетанкуровский международный инженерный форум, СПб, Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I, 2021 г.;

2. VIII Международная научно-практическая интернет-конференция «Инновационные технологии в строительстве и геоэкологии», СПб., Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I, 2021 г.;

3. Международно-практическая конференция молодых учёных и обучающихся, посвящённая 115-летию Санкт-Петербургского государственного аграрного университета «Роль молодых учёных в решении актуальных задач АПК», СПб., Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, 2019 г.;

4. LXXXIX Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Транспорт: проблемы, идеи, перспективы», СПб., Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I, 2019 г.;

5. Внутрифакультетная научная конференция «Проблемы и достижения в области строительного инжиниринга», СПб., Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I, 2019 г.;

6. Конференция «Инновационные технологии в строительстве и геотехнологии», СПб., Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I, 2018 г.;

7. LXXVIII Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Транспорт: проблемы, идеи, перспективы», СПб., Петербургский государственный университет путей сообщения императора Александра I, 2018 г.

Публикации. Основные положения диссертации изложены в 15 научных работах, в том числе 7 работ опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК Российской Федерации, 3 из которых выполнены автором без соавторов, 2 патента на изобретение.

Структура и объём диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, библиографического списка из 176 источников, из них 31 зарубежные. Работа изложена на 236 страницах, содержит 88 рисунков, 25 таблиц, 5 приложений.

Во введении выполнен обзор нормативной документации, определяющей порядок применения композитных материалов для изготовления и усиления строительных конструкций, обосновывается актуальность исследования, сформулированы его цели и задачи, указана научная новизна, определена теоретическая и практическая значимость диссертационной работы.

В первой главе «Оценка возможностей применения композитных материалов для усиления стальных балок» выполнен сбор информации о видах композитных материалов, производимых на территории Российской Федерации, проанализированы положения нормативных документов, определяющих порядок проектирования и расчёта строительных конструкций с применением композитных материалов. Определены принципы проектирования комбинированных конструкций – стальных балок, усиленных композитными материалами. Сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе «Экспериментальное исследование напряжённо-деформированного состояния стальных балок с внешним усилением композитными элементами» представлены результаты выполненных испытаний 3 стальных балок, 2 из которых усилены полимерными волокнисто-армированными композитными элементами: уголками, пластинами. Для каждого

из вариантов расчёта выполнено построение и последующий расчёт модели численным методом, с применением программного вычислительного комплекса Ansys. Оценена точность полученных результатов выполненных расчётов с реальной работой испытанных балок.

В третьей главе «Исследование работы стальной балки с усиленной композитными пластинами стенкой» с применением аналитических и численных методов расчётов определены рациональные параметры композитных пластин, применяемых для симметричного усиления стальной стенки балки. Разработано техническое решение комбинированной балки, представляющей собой стальной двутавр, стенка которого усилена композитными пластинами особой формы, полученной по результатам выполненных расчётов. Разработано формульное выражение, позволяющее на начальном этапе проектирования определить предварительное значение толщины плоскостных композитных элементов, усиливающих стальную стенку балки.

В четвертой главе «Оценка технико-экономической эффективности применения плоскостных композитных элементов для усиления стенки стальной балки» выполнено сравнение параметра себестоимости изготовления двух вариантов усиления стенки стальной балки: с применением стальных рёбер, с применением плоскостных композитных элементов.

В заключении изложены основные итоги и выводы диссертационной работы, а также перспективы дальнейшей разработки темы исследования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Результаты экспериментальных исследований потери устойчивости стальных балок, выполненными как без усиления, так и с усилением композитными материалами. В процессе эксплуатации стальной балки может возникнуть необходимость её усиления с целью повышения устойчивости стенки. В обозначенном случае применение традиционных вариантов усиления предполагает остановку производственного процесса в здании или сооружении, имеющем круглосуточный режим работы, в связи с необходимостью производства сварочных работ, что не всегда возможно. В этом случае альтернативным вариантом усиления стальной стенки балки является применение элементов, выполненных из композитных материалов. В рамках экспериментального исследования для определения целесообразности применения композитных усиливающих элементов выполнены испытания трёх вариантов балок:

- стальная балка, выполненная без усиления;
- стальная балка, стенка которой в процессе нагружения усилена композитными вертикальными рёбрами из уголкового профиля;
- стальная балка, стенка которой усилена по всей площади композитными пластинами прямоугольной формы, смонтированными с её обеих сторон.

Для испытания принята стальная однопролётная балка составного сечения, соединение уголковых элементов пояса со стенкой балки выполнено с применением болтовых соединений, высота сечения балки – 400 мм. Верхний пояс балки нагружен в середине пролёта сосредоточенной силой. Общая схема испытательного стенда приведена на рисунке 1.

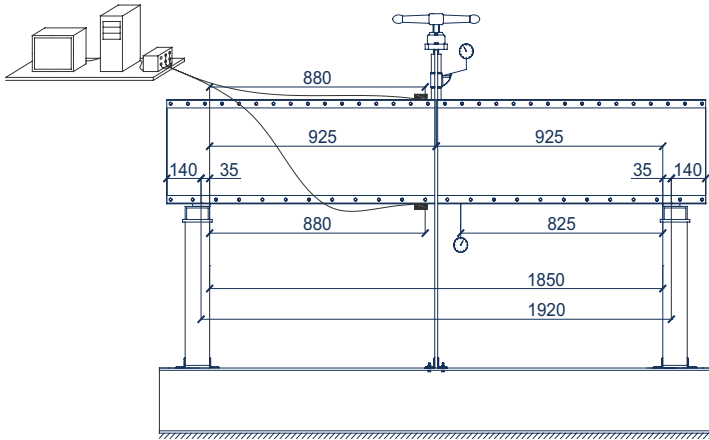


Рисунок 1. Схема испытательного стенда

Предметом исследования является изменение величины боковой деформации стенки балки в зависимости от значения действующей внешней нагрузки. При проведении испытаний за критическую нагрузку принято значение внешней силы, при которой величина боковой деформации, согласно ГОСТ 23118-2019 и РД 153-34.1-21.530-99, достигает следующего значения:

$$a > 0,003 \times H = 0,003 \times 400 \text{ мм} = 1,2 \text{ мм}. \quad (1)$$

При проведении всех испытаний измерены компоненты напряжённно-деформированного состояния балки: вертикальный прогиб нижнего пояса; действующих в верхнем и нижнем поясах напряжений; боковая деформация стенки на 3-х контролируемых участках - в месте приложения сосредоточенной нагрузки и в местах опирания балки на опорах. Измерения боковой деформации выполнены с применением индикаторов измерения часового типа, схема расположения которых представлена на рисунке 2. Измерение вертикального прогиба конструкции выполнено прогибомером 6-ПАО-0,01, для измерения действующих напряжений использованы тензорезисторы, подключённые к тензостанции МІС-036 с модулями МС-212. Перед проведением каждого из испытаний выполнено измерение начальной боковой деформации стальной стенки балки, эти значения учтены при построении графиков изменения боковой деформации стенки балки при росте нагрузки.

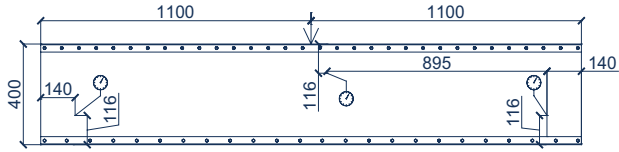


Рисунок 2. Схема расположения датчиков для измерения боковой деформации стенки балки во всех испытаниях

На рисунке 3 представлен общий вид стальной балки, результаты испытаний представлены на рисунке 4.



Рисунок 3. Общий вид стальной балки перед проведением испытания

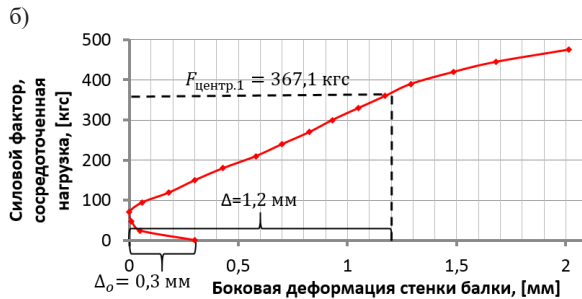
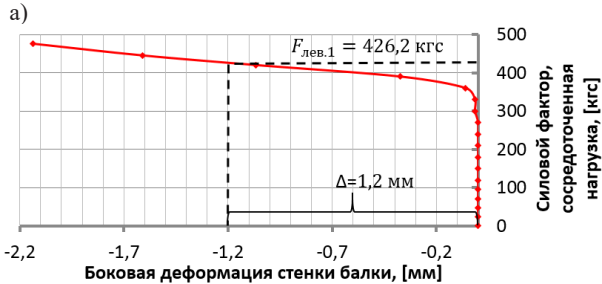


Рисунок 4, начало. График изменения боковой деформации стенки балки: а) над левой опорой; б) в месте приложения нагрузки;

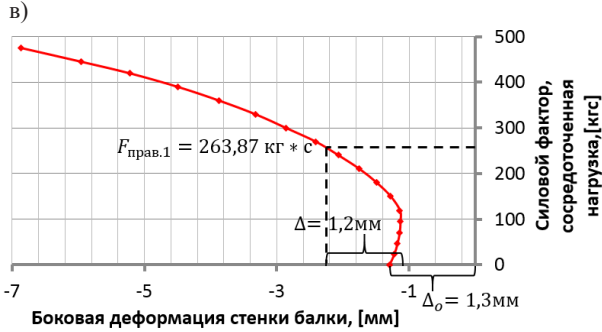


Рисунок 4, *окончание*. График изменения боковой деформации стенки балки: в) над правой опорой

При проведении испытания выполненной без усиления стальной балки определены значения расчётных нагрузок, при которых боковая деформация на контролируемых участках достигает своего предельного значения в 1,2 мм: $F_{\text{лев.}} = 426,2 \text{ кгс}$; $F_{\text{центр.}} = 367,1 \text{ кгс}$; $F_{\text{прав.}} = 263,87 \text{ кгс}$. Дополнительно выполнен численный расчёт испытанной балки с измеренной при проведении испытания начальной боковой деформацией стенки. Для этого построена модель стальной балки в программном комплексе Ansys, сравнение полученных результатов выполнено при значении нагрузки в $F = 263,87 \text{ кгс}$, при котором боковая деформация достигла предельного значения в 1,2 мм над правой опорой. На рисунке 5 представлена боковая деформация стенки по расчёту.

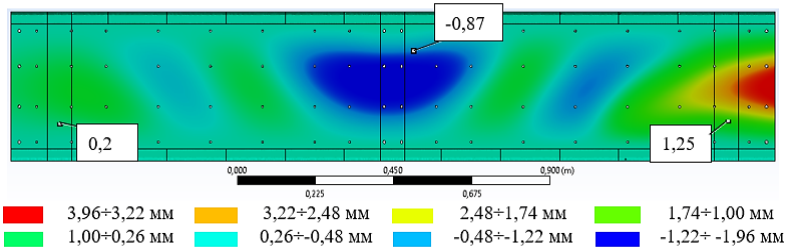


Рисунок 5. Боковая деформация стенки при нагрузке $F=263,87 \text{ кгс}$, [мм]

Результаты выполненного расчёта близки к фактическим значениям, измеренным при проведении эксперимента, разница между значениями боковой деформации на контролируемых участках составляет $4,1 \div 8,7 \%$.

На рисунке 6 представлен общий вид стальной балки, выполненной с усилением композитными уголками, при её максимальном нагружении. Усиление стенки стальной балки выполнялось по мере роста значения приложенной нагрузки. Нагружение производилось поэтапно, когда боковая

деформация на контролируемом участке стенки достигала предельного значения в 1,2 мм, производилось его усиление композитными уголками. Нагружение возобновлялось и продолжалось до момента, пока боковая деформация на следующем контролируемом участке стенки не достигала предельного допустимого значения в 1,2 мм. Усиление повторялось.

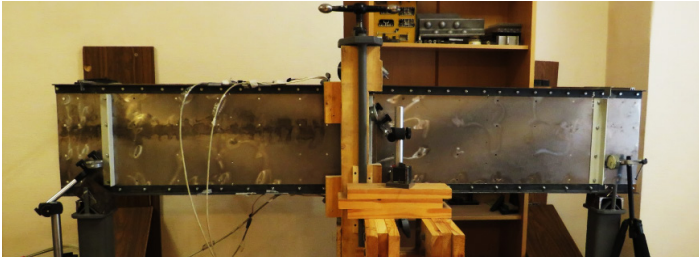


Рисунок 6. Общий вид балки со смонтированными композитными уголками

Усиление стенки балки выполнялось с применением стеклопластиковых уголков размером $40 \times 40 \times 4$ мм, изготовленных ООО «Новый профиль» с применением технологии пултрузии. Крепление уголков к усиливаемой стенке балки выполнено с применением болтовых соединений. Усиление выполнялось без снятия приложенной расчётной нагрузки.

Усиление каждого участка стенки выполнено в несколько этапов: а) изначально устраняется имеющая боковая деформация стенки путём установки временных стальных рёбер из уголков $32 \times 32 \times 3$ мм; б) монтируется вертикальное ребро из пары композитных уголков; в) демонтируются временные стальные рёбра. При снятии временных рёбер в стенке балки боковая деформация не появилась. Схема усиления показана на рисунке 7.



Рисунок 7. Последовательность усиления стальной стенки балки композитными уголками

Результаты испытаний представлены на рисунке 8. При проведении испытания усиленной композитными уголками стальной балки определены значения расчётной нагрузки, при которой произошла потеря устойчивости стенки балки: $F = 1284$ кгс. Дополнительно выполнен численный расчёт испытанной балки. Ввиду особенностей работы программного комплекса Ansys, для расчёта принята стальная балка, стенка которой усилена вертикальными рёбрами с самого начала нагружения. На рисунке 9 представлена боковая деформация стенки по расчёту.

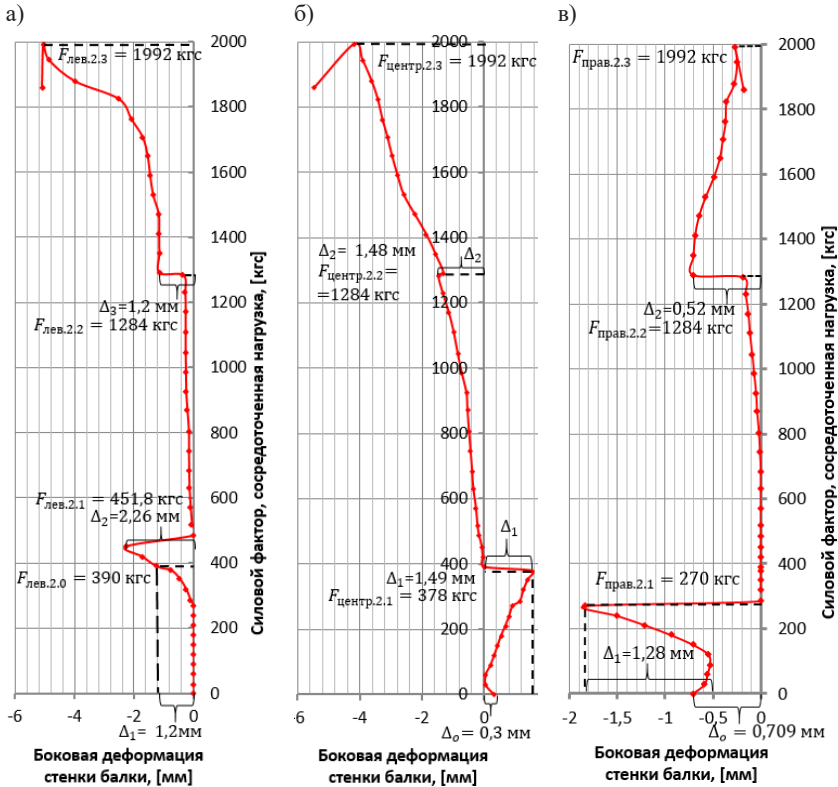


Рисунок 8. График изменения боковой деформации стенки балки: а) над левой опорой; б) в месте приложения нагрузки; в) над правой опорой

Усиление стенки балки композитными рёбрами привело к росту значения критической нагрузки, при которой происходит потеря устойчивости стенки балки, до 4,75 раза. Из-за различия работы испытанной балки, усиленной в процессе нагружения, и расчётной модели балки, в которой стенка

усилена с самого начала нагружения, зафиксировано существенное различие между значениями боковой деформации стенки на контролируемых участках.

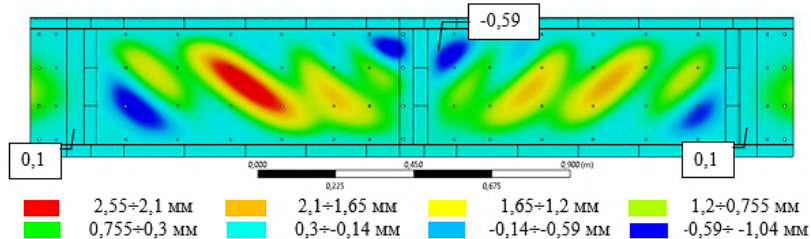


Рисунок 9. Боковая деформация стенки при нагрузке $F = 1284$ кгс, [мм]

На рисунке 10 представлен общий вид стальной балки, стенка которой усилена с обеих её сторон прямоугольными композитными пластинами. Усиление стенки балки выполнено перед началом нагружения конструкции. Для усиления применены композитные пластины из стеклотекстолита СТЭФ, изготовленного ООО «Росизолит» методом прессования. Размеры каждой пластины $2200 \times 330 \times 1,5$ мм, крепление пластин к стальной стенке балки выполнено с применением болтовых соединений.

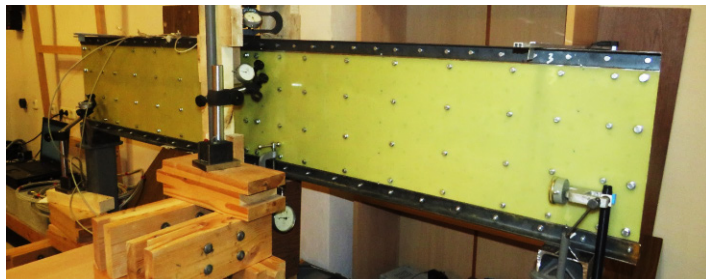


Рисунок 10. Общий вид стальной балки, усиленной композитными пластинами

Результаты испытаний представлены на рисунке 11. При проведении испытания стальной балки с усиленной композитными пластинами стенкой определены значения расчётных нагрузок, при которых боковая деформация на контролируемых участках достигает своего предельного значения в 1,2 мм: $F_{\text{лев.}} = 1699,3$ кгс; $F_{\text{центр.}} = 666,67$ кгс; $F_{\text{прав.}} = 982,1$ кгс. Дополнительно выполнен численный расчёт испытанной балки с измеренной при проведении испытания начальной боковой деформацией стенки. Для этого построена модель стальной балки в программном комплексе Ansys, сравнение полученных результатов выполнено при значении нагрузки в $F = 666,67$ кгс, при котором боковая деформация достигла предельного значения в 1,2 мм

под местом приложения нагрузки. На рисунке 12 представлена боковая деформация стенки по расчёту.

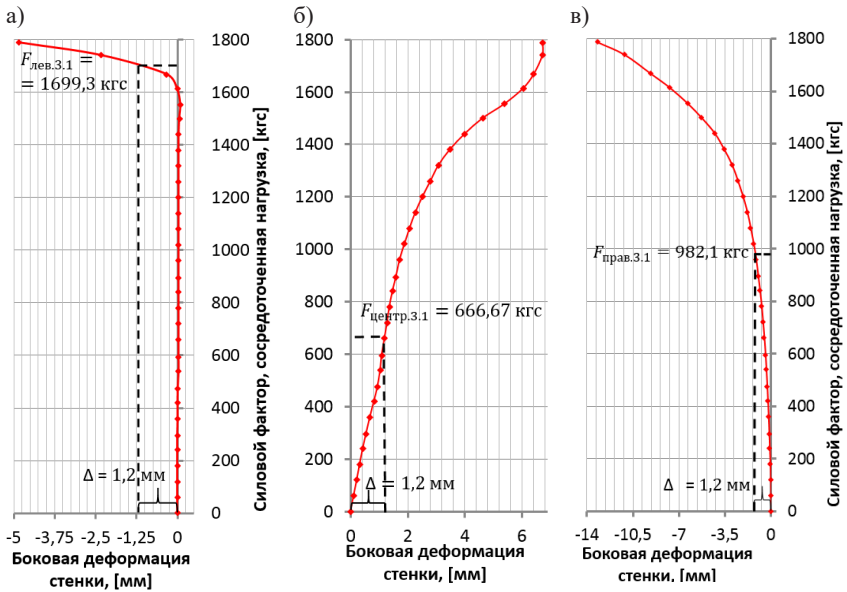


Рисунок 11. График изменения боковой деформации стенки балки:

а) над левой опорой; б) в месте приложения нагрузки; в) над правой опорой

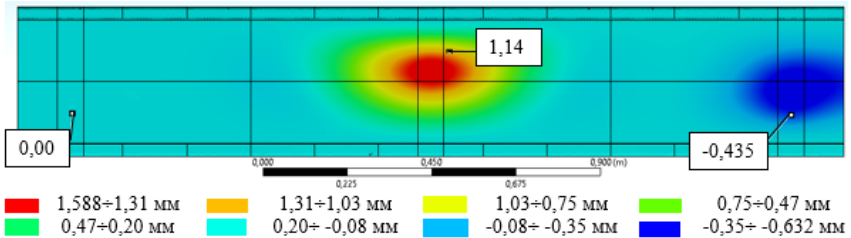


Рисунок 12. Боковая деформация стенки при нагрузке $F=666,67$ кгс, [мм]

Усиление стенки балки композитными пластинами привело к росту значения критической нагрузки, при которой происходит потеря устойчивости стенки балки, в $1,816 \div 3,987$ раза. Результаты выполненного расчёта близки к фактическим значениям, измеренным при проведении эксперимента, разница между значениями боковой деформации на контролируемых участках составляет $5 \div 16,5$ %.

Результаты всех выполненных испытаний приведены в таблице 1, в ней указаны значения нагрузок, при которых боковая деформация стенки достигла предельного допустимого значения в 1,2 мм, для каждого варианта балки.

Таблица 1. Результаты испытаний

Контролируемый участок	Вариант усиления		
	без усиления	композитные уголки	композитные пластины
Над правой опорой	263,87 кгс	1284 кгс	982,1 кгс
В середине пролёта	367,1 кгс	1284 кгс	666,67 кгс
Над левой опорой	426,2 кгс	1284 кгс	1699,3 кгс

Усиление стенки балки элементами, выполненными из композитных материалов, приводит к росту значения расчётной нагрузки, которой можно загрузить конструкцию. Применение вертикальных рёбер из композитных уголков более эффективно в случае нагружения балки сосредоточенной нагрузкой – в зонах действия расчётной нагрузки и опорных реакций. Использование композитных пластин рационально в случае нагружения балки равномерно-распределённой нагрузкой. Численный расчёт стальной балки, усиленной композитными пластинами, даёт более точный результат, чем в случае усиления стенки композитными уголками.

По этой причине для дальнейшего анализа принят вариант усиления стенки балки композитными пластинами, с целью оптимизации формы и параметров применяемых плоскостных композитных элементов с применением аналитических и численных методов расчёта.

2. Результаты разработки конструктивного решения однопролётной комбинированной балки, выполненной из стального двутавра, стенка которого усилена плоскостными композитными элементами особой формы. Локальное применение плоскостных элементов, выполненных из волокнисто-армированного полимерного композитного материала, позволяет повысить устойчивость усиливаемой стенки стальной балки. Для определения зон рационального применения плоскостных композитных элементов, согласно положениям СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции» произведён расчёт устойчивости выполненной без усиления стенки стальной однопролётной балки I-го класса. По результатам расчёта построен график распределения изолиний коэффициента использования по устойчивости стенки балки, приведённый на рисунке 13, значения коэффициента определены по формуле:

$$k_{\text{исп.}} = \sqrt{(\sigma_x / \sigma_{cr} + \sigma_{loc} / \sigma_{loc,cr})^2 + (\tau / \tau_{cr})^2} / \gamma_c. \quad (2)$$

Красными изолиниями на рисунке 13 показаны участки, где совместное действие компонентов напряжений оказывается больше критического допустимого значения. Укрепление стенки балки на указанных участках плоскостными композитными элементами приведёт к росту критической нагрузки потери устойчивости.



Рисунок 13. График распределения изополей коэффициента использования по устойчивости всей стенки балки

По результатам исследования разработано конструктивное решение однопролётной комбинированной балки (патент RU 2771153 C1), выполненной из стального двутавра, стенка которого усилена с двух сторон симметрично плоскостными композитными элементами особой формы, что представлено на рисунке 14.

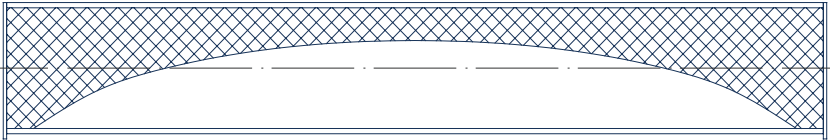


Рисунок 14. Разработанное конструктивное решение комбинированной балки, патент RU 2771153 C1

Особенность изобретения заключается в наличии особой криволинейной нижней границы плоскостных композитных элементов, повторяющей собой контур действия главных сжимающих напряжений в стенке балки.

3. Результаты анализа влияния изменения геометрических параметров плоскостных композитных элементов на значение критической нагрузки, при которой происходит потеря устойчивости усиленной стальной стенки комбинированной балки. Для разработанного технического решения выполнено исследование влияния параметров композитных пластин: толщина, высота – на величину критической нагрузки потери устойчивости усиливаемой стенки стальной балки. Исследование выполнено с построением и расчётом в программном вычислительном комплексе Ansys ряда моделей стальных балок, усиленных плоскостными композитными элементами с разными геометрическими параметрами. Исследование выполнено для 2 типов композитных материалов: стеклопластика ВПС-48 и углепластика ВКУ-35, имеющих разные модули упругости, свойства материалов представлены в таблицах 2 и 3.

Таблица 2. Физико-механические свойства углепластика ВКУ-35

№	Параметры жёсткости композита	Расчётное сопротивление композита
1	$E_{\text{раст.}}^{0^\circ} = 71 \text{ ГПа}; E_{\text{сж.}}^{0^\circ} = 62 \text{ ГПа}$	$R_{\text{раст.}}^{0^\circ} = 750 \text{ МПа}; R_{\text{сж.}}^{0^\circ} = 550 \text{ МПа}$
2	$E_{\text{раст.}}^{90^\circ} = 66 \text{ ГПа}; E_{\text{сж.}}^{90^\circ} = 61 \text{ ГПа}$	$R_{\text{раст.}}^{90^\circ} = 680 \text{ МПа}; R_{\text{сж.}}^{90^\circ} = 470 \text{ МПа}$
3	$\nu_{0^\circ} = 0,04; \nu_{90^\circ} = 0,05$	$R_{\text{межслойный сдвиг}} = 40 \div 44 \text{ МПа}$

Таблица 3. Физико-механические свойства углепластика ВПС-48

№	Параметры жёсткости композита	Расчётное сопротивление композита
1	$E_{\text{раст.}}^{0^\circ} = 29 \text{ ГПа}; E_{\text{сж.}}^{0^\circ} = 30 \text{ ГПа}$	$R_{\text{раст.}}^{0^\circ} = 450 \text{ МПа}; R_{\text{сж.}}^{0^\circ} = 630 \text{ МПа}$
2	$E_{\text{раст.}}^{90^\circ} = 28 \text{ ГПа}; E_{\text{сж.}}^{90^\circ} = 29 \text{ ГПа}$	$R_{\text{раст.}}^{90^\circ} = 425 \text{ МПа}; R_{\text{сж.}}^{90^\circ} = 500 \text{ МПа}$
3	$\nu_{xy} = 0,37$	$R_{\text{межслойный сдвиг}} = 71 \text{ МПа}$

На рисунке 15 показана взаимосвязь между ростом значения толщины плоскостного композитного элемента разработанной формы и ростом значения критической нагрузки потери устойчивости усиленной стенки балки. Указанная зависимость близка к линейной. Применение композитного материала с большим модулем упругости обеспечивает большой прирост значения критической нагрузки потери устойчивости.

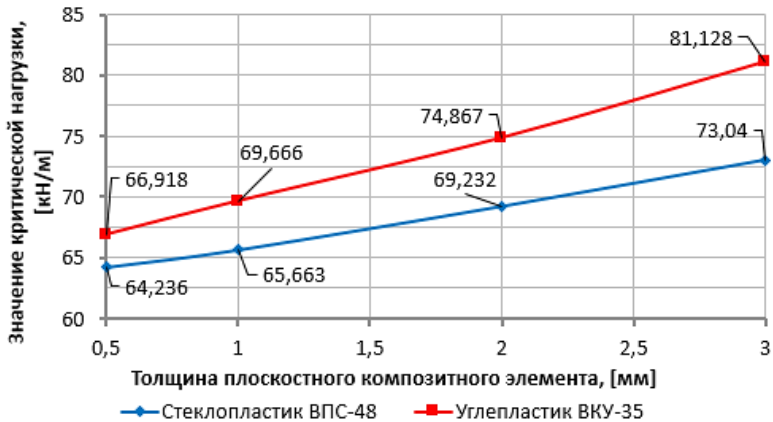


Рисунок 15. График функций изменения значения критической нагрузки от параметра толщины плоскостных композитных элементов

Второй анализируемый параметр композитных пластин разработанной формы представляет собой наименьшее расстояние между верхней и нижней гранями плоскостного композитного элемента, измеренное в середине пролёта усиливаемой конструкции. На рисунке 16 для случая усиления стенки балки углепластиком ВКУ-35 определена зависимость между увеличением параметра минимальной высоты плоскостного композитного элемента и изменением критической нагрузки потери устойчивости стенки балки. Указанная зависимость является линейной.



Рисунок 16. График функции изменения значения критической нагрузки от параметра минимальной высоты плоскостных композитных элементов

Оптимальным является применение композитных пластин, у которых соотношение минимальной и максимальной высот не превышает значения 0,5. Увеличение минимальной высоты композитного элемента приводит к смещению его нижней криволинейной грани к нижнему растянутому поясу. Усиление стенки балки прямоугольными плоскостными композитными элементами является частным случаем разработанного технического решения, когда минимальная высота плоскостного элемента равна высоте усиливаемой стенки стальной балки.

Наличие линейной зависимости между геометрическими параметрами плоскостных композитных элементов упрощает процесс проектирования, сокращает время на вычисление их оптимальных значений.

Дополнительно разработано формульное выражение (3), позволяющее на начальном этапе вариантного проектирования определить предварительные значения требуемой толщины композитных пластин, а также минимального расстояния, на котором они должны располагаться от поверхности усиливаемой стенки балки. На участке стенки балки, с которого начинается

развитие боковой деформации в момент потери устойчивости стенки, можно выделить стальную пластину. При потере устойчивости в ней действуют как сжимающие напряжения, так и напряжения, возникшие из-за выгиба стенки в момент её потери устойчивости.

Повышение сопротивления стенки балки потере устойчивости может быть обеспечено за счёт: 1) увеличения её толщины на величину $2 \cdot t_{cm1}$; 2) усиления стенки с двух сторон плоскостными композитными элементами толщиной t_k каждый. Значение требуемого сопротивления стенки балки за счёт увеличения её толщины можно определить согласно положениям свода правил СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции».

Основное условие использования композитных плоскостных элементов – при их применении в качестве элементов усиления должно быть обеспечено идентичное сопротивление напряжениям, при которых происходит потеря устойчивости стальной стенки, что и в случае повышения её сопротивления за счёт увеличения толщины стенки. Из равенства сопротивлений усиленных стенок возможно определить параметры требуемой толщины применяемых композитных пластин, а также расстояние, на котором их следует располагать относительно усиливаемой стенки:

$$\left\{ \begin{array}{l} (t_{cm}/2 + t_{cm1}) \times (t_{cm}^3/12 + 2 \times ((t_{cm1} \times E_{cm}/E_k)^3/12 + (t_{cm1} \times E_{cm}/E_k) \times \\ \times (0,5 \times t_{cm} + 0,5 \times t_k + \Delta_{min})^2) \times E_k/E_{cm}) / (t_{cm}^3/12 + 2 \times (t_{cm1}^3/12 + t_{cm1} \times \\ \times (0,5 \times t_{cm} + 0,5 \times t_{cm1})^2)) - (t_{cm1} \times E_{cm}/E_k + \Delta_{min} + 0,5 \times t_{cm}) = 0; \\ t_k \geq t_{cm1} \times E_{cm}/E_k. \end{array} \right. \quad (3)$$

Анализ результатов напряжённо-деформированного состояния стальной стенки балки, усиленной композитными пластинами, имеющих разные модули упругости, по предложенной методике расчёта показал, что основным параметром плоскостного элемента, определяющим устойчивость усиленной стенки балки, является значение его толщины. Композитный элемент со значением толщины, рассчитанной по методике (3), достаточно устанавливать вплотную к поверхности усиливаемой стальной стенки балки.

4. Результаты оценки технико-экономической эффективности двух вариантов усиления стальной стенки однопролётной балки: стальными рёбрами, композитными плоскостными элементами. Для оценки технико-экономической эффективности разработанного технического решения выполнен расчёт несущей способности и устойчивости стенки стальной балки I-го класса, с последующим проектированием двух возможных вариантов её усиления с применением: 1) системы стальных рёбер; 2) плоскостных композитных элементов. По результатам выполненных локальных

сметных расчётов определено, что итоговая стоимость усиления составляет: 1) в случае усиления стенки балки с применением стальных рёбер – 113097,61 руб.; 2) в случае усиления выполненными из стеклотекстолита СТЭФ композитными пластинами разработанной формы – 110570,53 руб.

По результатам выполненных расчётов устойчивости усиленной стенки определено, что при использовании плоскостных композитных элементов обеспечена избыточная устойчивость стальной стенки балки. Имеется возможность уменьшения толщины стенки балки при обеспечении её требуемой несущей способности и устойчивости, что позволяет дополнительно снизить себестоимость изготовления усиленной балки. Повышение устойчивости разработанным методом достигает своей наибольшей экономической эффективности в случае усиления стенок стальных балок II класса – балок с гибкими стенками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) При нарушении правил эксплуатации здания или сооружения в строительных конструкциях, в частности в стальных балках перекрытий, может произойти развитие имеющихся в них дефектов и повреждений, что приводит к необходимости их усиления. В зданиях и сооружениях с непрерывным режимом работы возможности усиления повреждённых конструкций значительно ограничены. В описанном случае одним из вариантов повышения несущей способности стальной балки является применение предварительно изготовленных композитных элементов: линейных профилированных элементов и плоскостных элементов – пластин.

2) На основе экспериментальных исследований установлено, что усиление стенки стальной однопролётной балки композитными элементами приводит к росту её устойчивости в случае усиления:

– вертикальными композитными рёбрами из уголкового профиля – в $3,29 \div 4,75$ раза, при этом боковая деформация стенки развивается скачкообразно, что отличается от деформации стальной балки без усиления;

– прямоугольными композитными пластинами – в $1,8 \div 3,98$ раза, при этом характер развития боковой деформации усиленной стенки не имеет изменений, в сравнении со стальной балкой без усиления.

3) Усиление стенки балки вертикальными рёбрами эффективно в случае действия сосредоточенных нагрузок, композитными пластинами – при действии равномерно-распределённых нагрузок.

4) Выполнено сравнение результатов численного расчёта усиленных композитными элементами стальных балок с данными, измеренными при проведении экспериментальных исследований, из которого следует, что большая точность результатов достигнута при расчёте модели усиленной композитными пластинами стальной балки, различие значений основного измеряемого параметра – боковой деформации стенки балки, составляет от 5% до 16,5%.

5) Разработано новое конструктивное решение комбинированной балки, состоящей из стального двутавра, стенка которого усилена с обеих сторон плоскостными композитными элементами особой формы. Нижняя криволинейная граница композитных пластин повторяет собой контур действия главных сжимающих напряжений, действующих в стальной стенке балки.

6) Аналитическим методом расчёта с применением формул, представленных в своде правил СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции», определена рациональная форма плоскостного композитного элемента. С применением численных методов расчёта в программном комплексе Ansys для ряда стальных балок, усиленных композитными пластинами особой формы, оценено влияние их параметров на устойчивость усиленной стенки. Изменение

значения критической нагрузки, при которой происходит потеря устойчивости усиленной стенки балки, прямо пропорционально изменению геометрических параметров композитных плоскостных элементов разработанной формы – их толщине и высоте.

7) Разработано формульное выражение, позволяющее на начальном этапе проектирования определить предварительное значение требуемой толщины композитного плоскостного элемента, а также расстояние, на котором он должен быть установлен. Композитные пластины со значением толщины, рассчитанным по приведённой методике, достаточно устанавливать вплотную к поверхности усиливаемой стальной стенки.

8) Выполнено технико-экономическое сравнение двух вариантов усиления стенки стальной однопролётной балки – установкой системы продольных и поперечных стальных рёбер, а также усилением плоскостными композитными элементами, из которого следует, что себестоимость обоих вариантов усиления сопоставима друг с другом, при этом своей наибольшей эффективности разработанное техническое решение достигает в случае усиления гибких стенок балок II класса.

Дальнейшее развитие идеи применения композитных полимерных материалов выполнения усиления или изготовления комбинированных конструкций заключается:

- в разработке конструктивных решений по усилению композитными материалами повреждённых стальных конструкций в условиях их ограниченной эксплуатации;

- в разработке конструктивных решений комбинированных сжатых стержней с применением композитных материалов;

- в совершенствовании методов построения расчётных моделей комбинированных конструкций в программных вычислительных комплексах.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных изданиях из перечня, размещённого на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии

1. Федоров А.М. Поиск рационального расположения стеклопластиковых уголков Pultra для повышения устойчивости стенки стальной двутавровой балки / А.М. Федоров // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2022. № 4(1052). С. 55–59.
2. Федоров А.М. Оценка эффективности повышения устойчивости стальной стенки двутавровой балки композитными пластинами особой формы / А.М. Федоров // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2022. № 4(1052). С. 25–29.
3. Федоров А.М. Анализ зон эффективного усиления стальной стенки гибридной балочной строительной конструкции композитными материалами / А.М. Федоров // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2021. № 5(1041). С. 52–57.
4. Егоров В.В. Поиск рациональной формы внутреннего типа усиления гибридной балочной строительной конструкции из композитного материала / В.В. Егоров, М.С. Абу-Хасан, А.М. Федоров // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2021. № 9(1045). С. 33–37.
5. Федоров А.М. Применение композитов для изготовления гибридных строительных конструкций / А.М. Федоров, Е.И. Никонова, А. Саратовцева, А.И. Чернявская // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2019. № 12(1024). С. 24–25.
6. Егоров В.В. Поиск рациональных форм усиливающих композитных элементов гибридных балочных строительных конструкций / В.В. Егоров, М.С. Абу-Хасан, А.М. Федоров // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2021. № 9(1045). С. 24–29.
7. Егоров В.В. Классификация соединений композитных и стальных пластин в гибридных конструкциях с внешним типом усиления композитными материалами / В.В. Егоров, М.С. Абу-Хасан, А.М. Федоров // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2021. № 8(1044). С. 32–34.

Патенты

8. Балка композиционной структуры: пат. 2771153 Рос. Федерация, N 2021131635; заявл. 27.10.2021; опубл. 27.04.2022, Бюл. N 12.
9. Балка композиционной структуры: пат. 2745288 Рос. Федерация, N 2020132581; заявл. 01.10.2020; опубл. 23.03.2021, Бюл. N 9.

Компьютерная верстка *М. В. Смирновой*

Подписано к печати 17.03.2023. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,5. Тираж 120 экз. Заказ 32.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.

