

На правах рукописи



Усольцев Андрей Михайлович

**ПОВЫШЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СВАРНЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ С УСТАЛОСТНЫМИ ТРЕЩИНАМИ**

Специальность 05.23.11 – Проектирование и строительство дорог,
метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2021

Работа выполнена на кафедре «Мосты» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО СГУПС).

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
Бокарев Сергей Александрович

Официальные оппоненты:

Овчинников Игорь Георгиевич

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Транспортное строительство» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.»

Кондратов Валерий Владимирович

кандидат технических наук, доцент, заведующий отделом «Испытания мостов и конструкций» АО «НИИ мостов» (г. Санкт-Петербург)

Ведущая организация:

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (МИИТ)

Защита состоится «01» июля 2021 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Д 999.174.02 на базе федеральных государственных бюджетных образовательных учреждений высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» и «Томский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, д. 191, ауд. 224.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения» и на сайте www.stu.ru.

Отзывы на диссертацию и автореферат диссертации с указанием ФИО, почтового адреса, телефона, адреса электронной почты, наименования организации и должности, подписанные и заверенные печатью организации, в двух экземплярах просим направить в адрес диссертационного совета.

Автореферат разослан «30» апреля 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, доцент



Ланис Алексей Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. На сети железных дорог России эксплуатируют более пяти тысяч сварных и болтосварных пролетных строений. После ввода в обращение в 2010 г. инновационных вагонов с нагрузкой на ось 25 тс отмечен резкий рост количества сварных пролетных строений с усталостными трещинами. Число пролетных строений с трещинами увеличилось более чем в три раза. При этом в настоящее время не существует способов локализации усталостных трещин, позволяющих полностью восстановить несущую способность, повысить циклическую долговечность сварных конструкций и обеспечить нормативный срок службы пролетных строений в 70 лет.

Учитывая, что ОАО «РЖД» планирует введение к 2023 г. в обращение грузовых инновационных вагонов с осевыми нагрузками 27 тс, а к 2030 г. – 30 тс, особую актуальность приобретает разработка экспертно-аналитической оценки грузоподъемности сварных и болтосварных пролетных строений с усталостными повреждениями, а также разработка эффективных способов локализации усталостных трещин и методов профилактики их образования.

Степень разработанности проблемы. Исследованиям сварных металлических конструкций с усталостными трещинами посвящены работы К. Б. Бобылева, С. А. Бокарева, Б. М. Вериги, А. А. Дорошкевича, В. М. Картопольцева, В. В. Кондратова, В. М. Круглова, М. Г. Малыгина, В. К. Матвеева, Ю. Мураками, И. Г. Овчинникова, В. О. Осипова, В. Г. Петушкова, В. Д. Позднякова, В. А. Титовой, В. И. Труфякова, А. А. Чабоненко, Ю. Б. Шапиро, Б. А. Шишкина и др.

Способы усиления, ремонта и профилактики появления усталостных трещин в металлических сварных конструкциях разработаны Ю. Б. Шапиро, В. С. Банковым, А. А. Дорошкевичем, Р. И. Калиевым, В. И. Кирьяном, В. В. Кныш, В. В. Кондратовым, А. З. Кузменковым, В. Г. Петушковым, Г. Б. Пляцко, О. Пухнером, С. А. Соловей, В. А. Титовым, А. А. Чабаненко и др.

Цель диссертационного исследования – обеспечение нормативной циклической долговечности сварных металлических пролетных строений железнодорожных мостов с усталостными трещинами на основе совершенствования и внедрения в практику прогрессивных технологий пайки и индукционного нагрева для локализации усталостных трещин.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи исследования**:

1 Провести модернизацию методики оценки технического состояния искусственных сооружений (ИССО) для оперативного определения грузоподъемности металлических пролетных строений с повреждениями и оценки ремонтпригодности сооружения с ориентацией на автоматизацию планирования ремонтных работ.

2 Разработать алгоритм расчета паяных соединений элементов усиления стенки балки на прочность и выполнить численное моделирование элементов усиления на примере реальной конструкции.

3 Выполнить комплекс экспериментально-теоретических исследований для обоснования возможности применения пайки в целях обеспечения нормативной циклической долговечности сварных металлических пролетных строений железнодорожных мостов с усталостными трещинами.

4 Разработать конструктивно-технологические решения по профилактике образования и локализации усталостных трещин типа Т-9 и Т-10 в сварных пролетных строениях и критерии их применения.

Объектом исследования являются сварные и болтосварные пролетные строения железнодорожных мостов с усталостными трещинами.

Предметом исследования является циклическая долговечность сварных металлических пролетных строений после локализации усталостных трещин способами индукционной и МИГ-пайки.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1 Разработана методика экспертно-аналитической оценки грузоподъемности и ремонтпригодности металлических пролетных строений железнодорожных мостов по критериям грузоподъемности, ремонтпригодности и скорости деградации конструкции, ориентированная на планирование ремонтных работ. Разработана структура банка данных по неисправностям и программное обеспечение по планированию усиления сварных пролетных строений.

2 Разработан алгоритм расчета на прочность паяных соединений металлических конструкций, а из условия прочности паяного соединения на отрыв и срез установлена аналитическая зависимость между длиной усталостной трещины и диаметром накладки для ее локализации.

3 Впервые экспериментально и теоретически обоснована возможность применения индукционной пайки, МИГ-пайки и индукционного нагрева для профилактики образования и локализации усталостных трещин в сварных и болтосварных металлических пролетных строениях железнодорожных мостов.

4 Разработаны конструктивно-технологические решения по профилактике образования и локализации усталостных трещин типа Т-9 и Т-10 и критерий их применения. Предложен основанный на инновационных технологиях комплексный подход к обеспечению нормативной циклической долговечности сварных и болтосварных металлических пролетных строений железнодорожных мостов на всех этапах их жизненного цикла. Новизна решений подтверждена патентами на изобретения.

Теоретическая и практическая значимость. Для оперативного определения возможности пропуска железнодорожной нагрузки по пролетному строению с повреждениями разработана экспертно-аналитическая оценка по критерию грузоподъемности. Предложенный автором критерий скорости деградации конструкций позволяет оценить качество содержания сооружений в данных условиях эксплуатации. Разработанные конструктивно-технологические решения локализации усталостных трещин позволяют обеспечить нормативный срок службы сварных пролетных строений железнодорожных мостов. Результаты работ, выполненных в диссертационном исследовании, использованы при разработке Инструкции по усилению трещин типа Т-9 и Т-10 в стенках главных и продольных балок сварных металлических пролетных строений железнодорожных мостов, утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 01 ноября 2017 г. № 2247/р, Инструкции по оценке состояния и содержания искусственных сооружений ОАО «РЖД», утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 01 октября 2019 г. № 2162/р, и Методики ранжирования объектов искусственных сооружений и земляного полотна для оценки приоритетности их включения в капитальные виды ремонта, утвержденной распоряжением ОАО «РЖД» от 29 апреля 2020 г. № 948/р. Разработанные

конструктивно-технологические решения реализованы на опытном объекте – мосту через р. Ояш на 3433 ПК 9 путь 1 линии Новосибирск – Красноярск. В 2018 г. научно-исследовательская работа «Разработка инновационных технологий ремонта трещин Т9 и Т10 в элементах сварных мест пролетных строений железнодорожных мостов» получила первую премию ОАО «РЖД» в номинации «Выполнение научно-исследовательских работ, результаты которых внесли существенный вклад в работу ОАО «РЖД»». Разработанная структура банка данных и программное обеспечение по планированию капитального ремонта, реконструкции и усилению железнодорожных мостов легли в основу автоматизированной информационной системы и банка данных по железнодорожным мостам. Численное моделирование работы металлического сварного пролетного строения с усталостными трещинами позволило выбрать наиболее эффективные методы их локализации с применением пайки.

Методы исследования. Поставленные задачи решены в ходе теоретических и экспериментальных методов научного исследования. Теоретические методы исследования базируются на основных положениях численного моделирования. Эмпирические методы исследования включают в себя измерение, статистические способы обработки экспериментальных данных, сравнение результатов теоретических и экспериментальных исследований, математическую статистику, численное моделирование и прогнозирование.

Положения, выносимые на защиту:

1 Методика экспертно-аналитической оценки грузоподъемности и ремонтпригодности металлических пролетных строений железнодорожных мостов по критериям грузоподъемности, ремонтпригодности и скорости деградации сооружения. Структура банка данных по неисправностям и программное обеспечение по планированию ремонта, усиления и реконструкции сварных пролетных строений.

2 Алгоритм расчета на прочность паяных соединений металлических конструкций и аналитическая зависимость между длиной усталостной трещины и диаметром накладки для ее локализации.

3 Результаты экспериментальных исследований прочности и циклической долговечности образцов стали 10ХСНД, припоев, металлических образцов с усталостными трещинами, локализованными методами индукционной и МИГ-пайки.

4 Конструктивно-технологические решения по профилактике образования и локализации усталостных трещин типа Т-9 и Т-10 в сварных пролетных строениях железнодорожных мостов, основанные на методах индукционного нагрева, индукционной и МИГ-пайки. Комплексный подход к обеспечению нормативной циклической долговечности сварных пролетных строений железнодорожных мостов на всем протяжении жизненного цикла конструкций.

Степень достоверности и апробация работы обеспечена применением объективных методов научного исследования и теоретических основ, широко распространенных в науке и практике проектирования мостовых конструкций, основных положений теории прочности; подтверждается согласованностью результатов экспериментальных и теоретических исследований, применением аттестованного испытательного оборудования, сертифицированных и поверенных приборов и программного обеспечения.

Основные положения диссертационного исследования были доложены и обсуждены на конференциях: «Транссиб и научно-технический прогресс на железнодорожном транспорте» (г. Новосибирск, 1991 г.); «Вузы Сибири и Дальнего Востока – Транссибу» (г. Новосибирск, 2002 г.); VIII Международной конференции «Политранспортные системы» (г. Новосибирск, 2014 г.); «Сетевая школа по обмену опытом внедрения передовых методов, технологий реконструкции, капитального ремонта и содержания искусственных сооружений и земляного полотна на железных дорогах ОАО «РЖД», ЦП ОАО «РЖД»» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.); IX Международной научно-технической конференции «Политранспортные системы» (г. Новосибирск, 2016 г.); «Сетевая школа по обмену опытом внедрения передовых методов, технологий реконструкции, капитального ремонта и содержания искусственных сооружений и земляного полотна на железных дорогах ОАО «РЖД», ЦП ОАО «РЖД»» (г. Астрахань, 2018 г.); Всероссийской конференции «Исследование, проектирование, строительство и реконструкция, эксплуатация и мониторинг мостов» (г. Новосибирск, 2019 г.); «Сетевая школа по обмену опытом внедрения передовых методов, технологий реконструкции, капитального ремонта и содержания искусственных сооружений и земляного полотна на железных дорогах ОАО «РЖД», ЦП ОАО «РЖД»» (г. Челябинск, 2019 г.); XI Международной научно-технической конференции «Политранспортные системы» (г. Новосибирск, 2020 г.); Всероссийской научно-практической конференции (г. Пермь, ПНИУ, 2020 г.).

Личный вклад автора состоит в следующем:

- разработка методики экспертно-аналитической оценки грузоподъемности и ремонтпригодности сварных пролетных строений, предложение критерия скорости деградации сооружения, разработка структуры банка данных по неисправностям сварных и болтосварных пролетных строений и программного обеспечения по планированию ремонтных работ;

- разработка алгоритма расчета на прочность паяных соединений элементов локализации усталостных трещин;

- проведение экспериментальных исследований прочности и циклической долговечности образцов стали 10ХСНД, припоев, металлических образцов с усталостными трещинами, локализованными методами индукционной и МИГ-пайки;

- предложение комплексного подхода к обеспечению нормативной циклической долговечности сварных пролетных строений железнодорожных мостов, основанного на применении инновационных технологий на всех этапах жизненного цикла: проектирования, изготовления на заводе, надзора, текущего содержания, ремонта и капитального ремонта в процессе эксплуатации сварных металлических пролетных строений железнодорожных мостов; разработка конструктивно-технологических решений по профилактике образования и локализации усталостных трещин типа Т-9 и Т-10 и практическая реализация их на опытном объекте на мосту через р. Ояш на 3433 ПК 9 путь 1 линии Новосибирск – Красноярск;

- проведение натурных испытаний сварного металлического пролетного строения до и после усиления индукционной пайкой;

- разработка и практическая реализация мобильного комплекса по индукционному нагреву металла элементов конструкций сварных металлических пролетных строений.

Публикации и изобретения. По результатам исследования опубликовано 15 научных работ, из которых 10 публикаций – в ведущих научных рецензируемых изданиях, в том числе 9 – в изданиях, включенных в перечень ВАК при Минобрнауки РФ, и одна – в издании, индексируемом международной базой данных Scopus; четыре программы и одна база данных зарегистрированы в ОФАП МПС и в Едином реестре российских программ для ЭВМ и БД России. Получены семь патентов на изобретения и один патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав, заключения, списка литературы и двух приложений. Полный объем работы составляет 224 страницы, включает 127 рисунков, 27 таблиц и два приложения. Список литературы состоит из 197 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

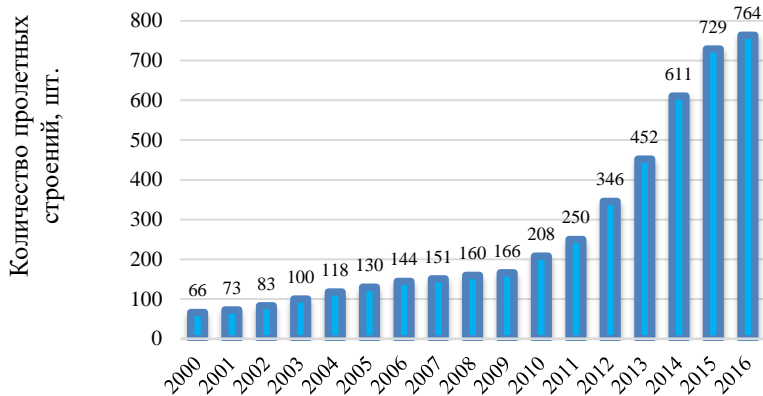
Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, степень ее разработанности, сформулирована цель и задачи диссертационной работы, приведены объект и предмет исследования, научная новизна, показаны теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов работы, указан личный вклад автора.

В **первой главе** дана характеристика конструкций сварных и болтосварных металлических пролетных строений железнодорожных мостов. На сегодняшний день сварные и болтосварные пролетные строения – это основной вид металлических пролетных строений железнодорожных мостов, на сети железных дорог их эксплуатируется более пяти тысяч.

В последние годы отмечена тенденция значительного роста усталостных трещин в элементах этих пролетных строений. На рисунке 1, а приведен график изменения количества трещин в сварных пролетных строениях мостов, эксплуатируемых в ОАО «РЖД». Самыми распространенными оказались трещины типа Т-9 и Т-10, при их развитии снижается не только долговечность, но и несущая способность пролетного строения. В отдельных случаях величины их развития достигли границ предотказного состояния. Пример такой усталостной трещины типа Т-9 приведен на рисунке 1, б.

Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния элементов с усталостными трещинами проводились: Ю. Б. Шапиро, В. В. Кондратовым (НИИ мостов, г. Санкт-Петербург) и В. К. Матвеевым (МИИТ, г. Москва), ими было доказано влияние на образование усталостных трещин вибраций элементов решетки и главных балок; А. А. Дорошкевичем (ВНИИЖТ, г. Москва) было установлено, что деформация стенки главной (продольной) балки в ее верхнем отсеке имеет S-образную форму изгиба в поперечном направлении; В. Д. Позняковым (Институт электросварки им. Е. О. Патона, г. Киев) было выявлено, что накопление усталостных повреждений способствует охрупчиванию металла, а В. И. Кирьяном и В. В. Кнышем было установлено влияние остаточных напряжений на образование усталостных трещин и продление усталостной долговечности сварной конструкции при выполнении высокочастотной механической проковки.

а)



б)



Рисунок 1 – Динамика роста и общий вид усталостных трещин:

- а – динамика роста усталостных трещин в сварных пролетных строениях по годам;
 б – общий вид трещины типа Т-9 в продольной балке пролетного строения моста через р. Бирюса

Анализ выполненных исследований показал, что образование усталостных трещин в металлических пролетных строениях зависит от целого ряда факторов: остаточных сварочных напряжений, величина которых может быть близка к пределу текучести стали; дефектов сварки (подрезов, непроваров, наплывов, шлаковых включений и др.); зазоров между «сухариками» ребер жесткости и полок балки, приводящих к S-образному изгибу стенки балки; климатических условий эксплуатации (экстремально низких отрицательных температур зимой).

Нормативные документы ОАО «РЖД» предлагают различные способы ремонта и усиления сварных пролетных строений. Концы усталостных трещин в основном металле длиной более 20 мм засверливают сверлом диаметром от 18 до 20 мм, располагая центр отверстия на половине диаметра сверла за концом трещины. В отверстия вставляют высокопрочные болты для создания объемного напряженного состояния, препятствующего дальнейшему развитию трещины и закрытию отверстия в стенке. На относительно непродолжительное время трещину удается локализовать, но, как правило, выполняемого ремонта оказывается недостаточно, чтобы полностью остановить процесс трещинообразования и обеспечить восстановление потребительских свойств конструкции на весь нормативный срок эксплуатации (70 лет).

В последние годы в промышленности стали применять индукционный нагрев, индукционную пайку и МИГ-пайку. Пайка – быстрый, точный и контролируемый процесс. Паяные соединения, как и сварные, достаточно прочны, устойчивы к ударам и вибрации. Паяное соединение может быть даже более прочным, чем металл соединяемых конструктивных элементов. Но в отличие от сварки при пайке сохраняется целостность металла, который не плавится.

Автором было сделано предположение, что перспективным способом усиления сварных пролетных строений и профилактики образования усталостных трещин является индукционная и МИГ-пайка, а также локальный индукционный нагрев.

Комплексный подход к обеспечению долговечности сварных пролетных строений не может быть реализован без переработки программного обеспечения по оценке технического состояния, планированию работ текущего содержания, ремонта и реконструкции.

Во **второй главе** приведено описание новой технологической модели текущего содержания, ремонта, усиления и реконструкции искусственных сооружений на сети железных дорог ОАО «РЖД».

Для обеспечения работы по новой технологической модели в рамках АСУ ИССО разработан программный комплекс по планированию работ текущего содержания и капитального ремонта искусственных сооружений в дистанциях ИССО на основе фактического технического состояния. В основу заложена оценка технического состояния искусственных сооружений, разработанная СГУПС при участии автора. Для составления плана ремонтных работ автором предложен критерий оптимального решения, являющийся совокупностью методов условной максимизации и линейной свертки, путем выбора основного критерия (обобщенной оценки технического состояния) и замены остальных критериев соответствующими весовыми коэффициентами.

Часто при обнаружении усталостных повреждений возникает необходимость оперативно решить задачу пропуска подвижного состава. Для этого случая автором разработана экспертно-аналитическая оценка грузоподъемности.

Критерий грузоподъемности пролетного строения $K_{гр}$ определяют как отношение класса элемента K к классу нагрузки III категории K_{III} :

$$K_{гр} = 100 K / K_{III}, \quad (1)$$

где 100 – выравнивающий коэффициент.

Приблизительно, без расчетов грузоподъемности элементов моста, критерий грузоподъемности элементов сооружения $K_{гр}$ можно получить, зная проектную нагрузку. Расчетным путем для металлических пролетных строений были определены гарантированные величины критерия грузоподъемности в зависимости от проектных нагрузок и расчетной длины. Учет фактического состояния пролетного строения выполняют путем умножения значения критерия грузоподъемности на коэффициент δ_i , значение которого зависит от наихудшей категории по грузоподъемности среди неисправностей, обнаруженных на пролетном строении.

Критерий тяжести нагрузки $K_{тн}$ определяют как отношение класса обращающейся нагрузки K_0 к классу нагрузки III категории K_{III} с выравнивающим коэффициентом 100:

$$K_{тн} = 100 K_0 / K_{III}. \quad (2)$$

Если $K_{гр} \geq 100$, то вне зависимости от параметров линии влияния α и λ по сооружению возможен пропуск любой из обращающихся нагрузок.

Для сварных пролетных строений железнодорожных мостов был доработан каталог неисправностей. В каталог были добавлены критерии развития трещин, характеризующие предотказное состояние пролетного строения. Также был сформирован каталог ремонтных работ по ремонту усталостных трещин с применением индукционной и МИГ-пайки, а также индукционного нагрева.

Далее во второй главе даны описания типов паяных соединений, выполняемых при помощи индукционной и МИГ-пайки. В СП 35.13330.2011 и СП 16.13330.2011 отсутствуют правила расчета паяных соединений на прочность. Для проверки паяных соединений и элементов локализации усталостных трещин в стенке балки на прочность автором разработан алгоритм расчета.

Расчет на прочность паяных соединений выполняют по аналогии со сварными и клеевыми соединениями, заменяя площади сварных и клеевых швов на площади

пайки, а соответствующие расчетные сопротивления металла сварных швов на сопротивления разрыву паяных соединений. Как правило, в нормативной литературе и в паспортах заводов-изготовителей у припоев и присадочных проволок (паяных соединений) отсутствуют расчетные сопротивления, поэтому применяют временные сопротивления разрыву соединения с коэффициентом надежности γ_u , равным 1,3.

Для обеспечения прочности паяного соединения должны быть выполнены условия на отрыв

$$\sigma_{\text{эКВ}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \leq (m / \gamma_u) \cdot R_m \quad (3)$$

и на срез накладок

$$\tau = \frac{QS_z}{I_z b} \leq (m / \gamma_u) \cdot R_{wz}. \quad (4)$$

Исходя из условий (3) и (4) определяют усилия по формулам (5) и (6), воспринимаемые паяными соединениями (прослойкой припоя или паяным швом в зависимости от типа паяного соединения) накладок к стенке балки, компенсирующими ее повреждение усталостной трещиной:

$$F_{\text{эКВ}} = \sigma_{\text{эКВ}} b (L_{\text{тр}} + 2\pi d), \quad (5)$$

$$F_{\tau} = \tau b (L_{\text{тр}} + 2\pi d). \quad (6)$$

Из условия обеспечения прочности паяного соединения на отрыв и срез по формулам (7)–(10) таблицы 1 определяют минимально допустимый диаметр «грибовидной» накладки для локализации усталостной трещины типа Т-9 или Т-10, определяющий площадь пайки или длину паяного шва при определенной величине катета шва K_f .

Таблица 1 – Формулы для определения диаметра накладок усиления

Минимальный диаметр накладки по эквивалентным напряжениям	Минимальный диаметр накладки по касательным напряжениям
Определение диаметра накладки при индукционной пайке	
$D_{\text{эКВ}} = \sqrt{\frac{\gamma_u F_{\text{эКВ}}}{2m\pi R_m} + d^2} \quad (7)$	$D_{\tau} = \sqrt{\frac{\gamma_u F_{\tau}}{m\pi R_{wz}} + d^2} \quad (8)$
Определение диаметра накладки при МИГ-пайке	
$D_{\text{эКВ}} = d + \frac{\gamma_u F_{\text{эКВ}}}{2m\pi R_m K_f}, \quad (9)$	$D_{\tau} = d + \frac{\gamma_u F_{\tau}}{4m\pi R_{wz} K_f}, \quad (10)$
где K_f – катет или биссектриса паяного шва; R_m – временное сопротивление отрыву, МПа	где R_{wz} – временное сопротивление срезу, МПа

В рамках теоретических исследований в расчетном комплексе Midas Civil была разработана модель пролетного строения. Конечно-элементная модель металлического пролетного строения представляет собой совокупность балочных, плитных и объемных конечных элементов. Пояса и стенки главных балок моделировались объемными конечными элементами, ребра жесткости – плитными элементами, связи – балочными элементами. Геометрические характеристики пролетного строения соответствуют данным проекта.

Модули упругости припоев E определялись по формуле

$$E = C \cdot \rho \cdot \ln(T_{\text{пл}} / T_0) / (3\alpha), \quad (11)$$

где C – теплоемкость материала припоя, кДж/(кг·К);

ρ – плотность припоя, кг/м³;

$T_{\text{пл}}$ – температура плавления в Кельвинах, К;

T_0 – температура определения модуля упругости в Кельвинах (при плюс 20 °С);

α – температурный коэффициент линейного расширения.

В месте предполагаемого образования трещин типа Т-9 и постановки элементов усиления сделано сгущение сетки для более точного определения напряжений в этих зонах. Общий вид модели и фрагмент паяного шва показан на рисунке 2.

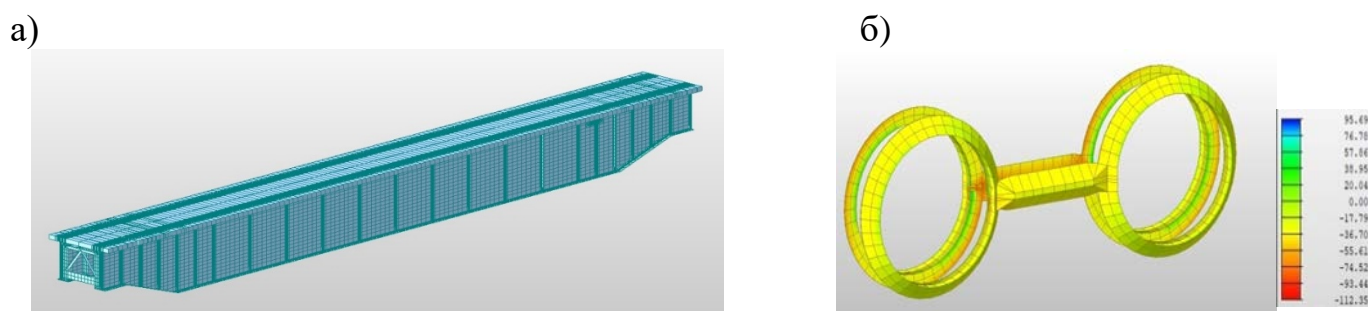


Рисунок 2 – Модель пролетного строения:

а – общий вид модели пролетного строения в Midas Civil;

б – напряжения по границе спаивания

Сравнение напряжений в припое по контакту с основным металлом, полученных по результатам моделирования в Midas Civil, с допустимыми сопротивлениями паяных соединений на отрыв и срез показали, что минимальные диаметры накладок усиления, рассчитанные по формулам (7)–(10), обеспечивают прочность паяного соединения.

В **третьей главе** приведены программа и результаты лабораторных исследований образцов, выполненных индукционной и МИГ-пайкой, с целью обоснования возможности применения паяных соединений для локализации усталостных трещин в сварных металлических пролетных строениях. Программа испытаний включала подбор оптимальной температуры пайки конструкционной стали, прочностные испытания образцов для выбора припоя, прочностные и циклические испытания образцов с усталостными трещинами, локализованными с применением паяных соединений.

В начале главы дано описание оборудования и разработанного под руководством автора комплекса индукционного нагрева.

Первая задача, которая решалась в рамках лабораторных исследований, заключалась в выборе оптимальной температуры нагрева мостовых низколегированных сталей, при которой не происходит существенных (больше 10 %) изменений их механических характеристик (временного сопротивления и предела текучести). Цилиндрические «гагаринские» тип IV по ГОСТ 1497–84 образцы нагревали до различных температур и после их остывания проводили стандартные испытания на прочность.

Проведенные испытания показали, что нагрев конструкционной стали 10ХСНД до температуры плюс 900 °С не ведет к существенному изменению ее прочностных

характеристик. Нагрев стали до температуры плюс 1200 °С и более приводит к исчезновению площадки текучести и увеличению временного сопротивления разрыву. Исчезновение площадки текучести ведет к увеличению вероятности образования усталостных трещин в процессе эксплуатации. Диаграммы деформаций контрольных образцов приведены на рисунке 3. Оптимальной температурой нагрева основного металла конструкции сварных пролетных строений при индукционной пайке является диапазон от плюс 700 °С до плюс 900 °С.

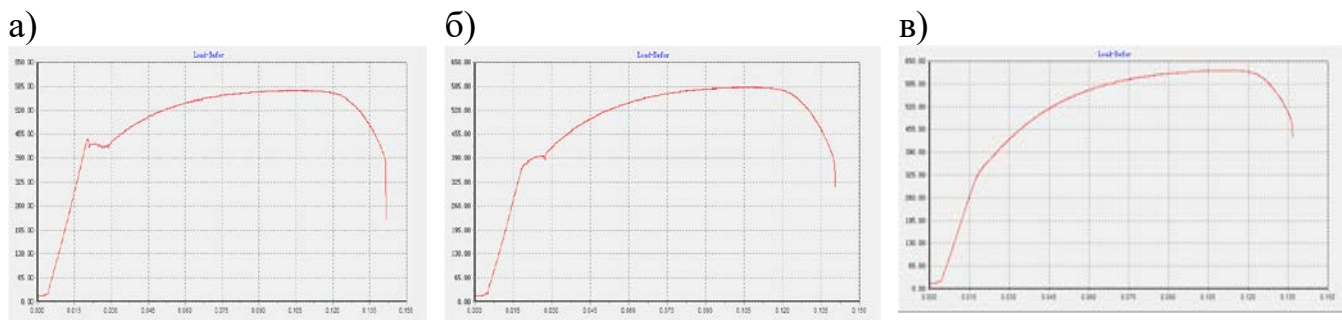


Рисунок 3 – Диаграммы деформаций:

- а – без нагрева, $\sigma_T = 427,5$ МПа, $\sigma_B = 569,4$ МПа;
 б – нагрев до плюс 900 °С, $\sigma_T = 416,7$ МПа, $\sigma_B = 571,8$ МПа;
 в – нагрев до плюс 1200 °С, $\sigma_T = 363$ МПа, $\sigma_B = 622$ МПа

На следующем этапе лабораторных исследований осуществлялся подбор припоя для соединений металла мостовых конструкций с конструкциями усиления, обеспечивающего прочность паяного соединения не менее 300 МПа на разрыв при индукционной пайке в диапазоне температур от плюс 700 °С до плюс 900 °С. Для испытаний были отобраны припои с температурой плавления и прочностью паяного соединения, по данным заводов-изготовителей, близкими к требуемым значениям: ПСр-45, Castolin EcoBraz 38244, Castolin EcoBraz 38240, Castolin EcoBraz 38225, Castolin 18XFC, МНМц, Л-63, ЛНКОМц.

Для испытаний на прочность были изготовлены металлические цилиндрические образцы диаметром 12 мм, длиной 180 мм из стали СтЗсп. Цилиндрические образцы спаивали между собой способом индукционной пайки при помощи припоя. Процесс изготовления и вид образцов до и после испытаний на прочность приведен на рисунке 4. Для каждого типа припоя изготавливали по пять контрольных образцов.

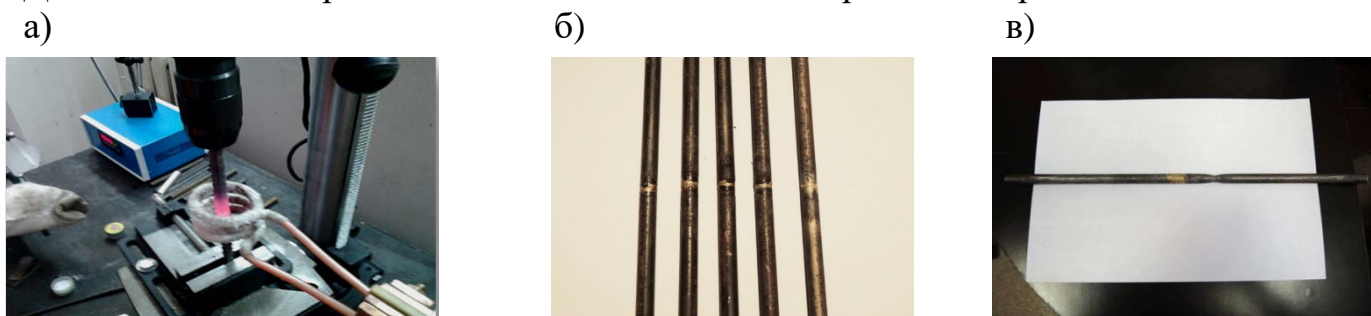


Рисунок 4 – Вид цилиндрических образцов:

- а – индукционная пайка образцов;
 б – вид паяных образцов;
 в – вид образца после испытаний

Испытание на прочность паяного соединения производили на универсальной разрывной машине TIME WDW-300E до момента разрушения образца. Контроль процесса обработки данных производится через интерфейс анализа данных.

По прочности соединения наилучшие характеристики показали припои: ПСР-45, 18XFC, Л-63, EcoBraz 38244. Припои 18XFC, Л-63 (медно-цинковые) имеют более высокие прочностные характеристики, однако температура плавления этих припоев выше серебряных (около плюс 900 °С). Диаграммы деформирования паяных образцов приведены на рисунке 5. Учитывая все вышеизложенное, для разработки способов по усилению сварных пролетных строений методом индукционной пайки можно рекомендовать припои ПСР-45 и EcoBraz 38244, они имеют приблизительно одинаковый химический состав, припой ПСР-45 – российского производства, а EcoBraz 38244 – производства фирмы Castolin (Франция).

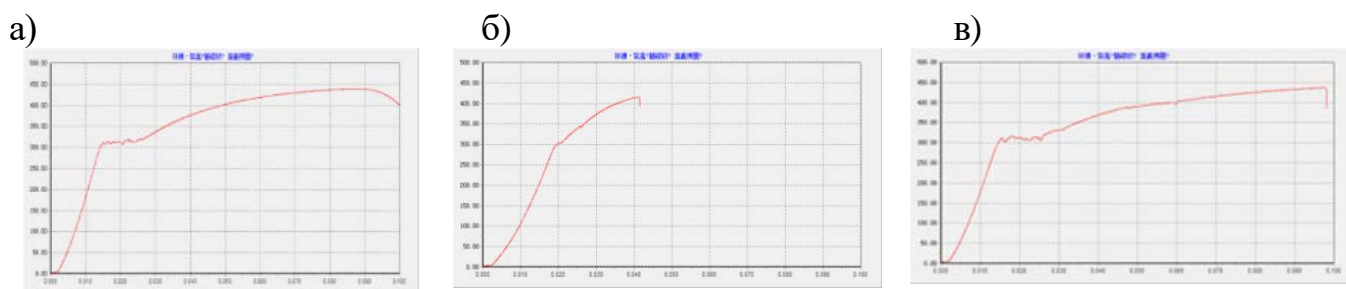


Рисунок 5 – Диаграммы деформирования паяных образцов:

- а – ПСР-45, $T_{пл}$ = от плюс 665°С до плюс 730 °С,
паспортная σ_B = 300 МПа, фактическая σ_B = 440 МПа;
- б – Л-63, $T_{пл}$ = от плюс 860 °С до плюс 960 °С,
паспортная σ_B = 310 МПа, фактическая σ_B = 412 МПа;
- в – 18XFC, $T_{пл}$ = от плюс 870 °С до плюс 895 °С,
паспортная σ_B = 480 МПа, фактическая σ_B = 438 МПа

При исследовании балочных образцов принят следующий порядок проведения испытаний: «выращивание» усталостной трещины; усиление трещины круглыми «грибовидными» паяными накладками; испытание усиленных образцов на прочность.

Для проведения испытаний образцов, усиленных с применением индукционной пайки, изготовлено пять образцов из металлических двутавровых балок из стали СтЗсп с пределом текучести 255 МПа. В двутавровых балках в середине сечения вырезана нижняя полка и сделан искусственный концентратор напряжений в виде надпила шириной и глубиной 1 мм. Выращивание усталостной трещины в образцах выполняли способом циклического нагружения на универсальной испытательной машине ГРМ-2А. Максимальная нагрузка – 3,8 т, коэффициент асимметрии цикла – 0,8. Контроль процесса образования и роста усталостной трещины осуществляли тремя способами: визуально при помощи лупы с 4-кратным увеличением, инструментально при помощи тепловизора Fluke Ti400 и с помощью капиллярного метода контроля комплектом фирмы SHERWIN.

Усиление образцов методом индукционной пайки выполняли в следующей последовательности: в устье усталостной трещины в стенке балочного образца сверлили отверстие диаметром 20 мм; поверхность стенки балки в месте пайки зачищали при помощи угловой шлифовальной машины и обезжировали бензином «Калоша»; на полученное отверстие методом индукционной пайки устанавливали

круглые «грибовидные» накладки. Для пайки используем припой ПСР-45 и флюс ПВ-209. Температура пайки – от плюс 800 °С до плюс 850 °С.

Общий вид образца, усиленного методом индукционной пайки, показан на рисунке 6.

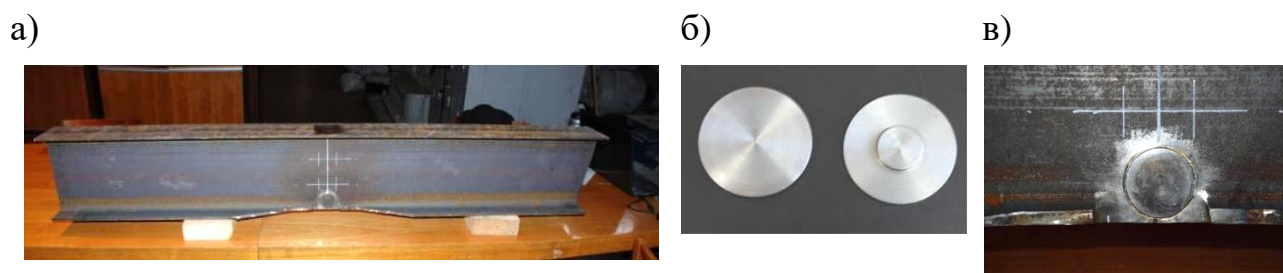


Рисунок 6 – Общий вид усиленного балочного образца:

а – общий вид образца;

б – вид накладки;

в – фрагмент усиления

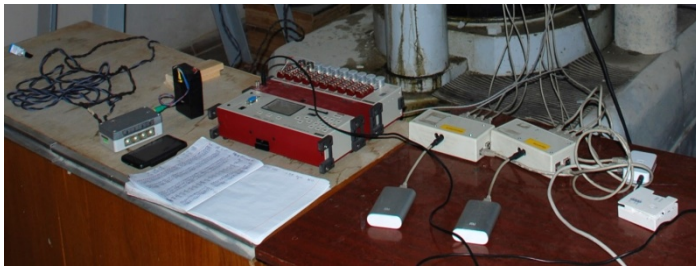
Испытание усиленных балочных образцов на прочность осуществляли нагружением на прессе ДРБМ-300. Нагрузку фиксировали с помощью специального датчика усилия ДОГ-3 (месдозы) и по шкале прессы ДРБМ-300.

Для определения прогибов и деформаций использовали восемь цифровых индикаторов часового типа ИЧЦ-10 (ИЧ). Для сбора данных с цифровых индикаторов часового типа ИЧЦ-10 применяли комплексы автоматизированного сбора информации DISYS. Для контроля деформаций в верхнем поясе балки дополнительно к ИЧЦ-10 использовали два тензодатчика ТДМ электронного измерительного комплекса «Тензор-МС» (сертификаты Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии RU.C.27.007.A № 31740 и RU.C.34.007.A № 32603). Контроль деформаций в нижнем поясе осуществляли двумя датчиками перемещений HI-2-50 многоканального измерительного комплекса TDS-150 (Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd., Япония). Общие виды измерительных блоков и приборов показаны на рисунке 7.

Разрушение усиленных образцов происходило в результате нарастания деформаций, после того как разрушалось сцепление круглой накладки усиления с металлом стенки балки при нагрузке 12,5 тс. Разрушение неусиленных образцов без трещины происходило в результате роста пластических деформаций при нагрузке 8,5 тс. Напряжения по нижней грани образца в месте выреза полки в этот момент были близки к временному сопротивлению стали (425 МПа). Разрушение образцов с трещиной было скоротечным и происходило по сечению с трещиной при нагрузке около 6,5 тс. График зависимости напряжений по нижней грани образца в месте выреза полки от нагрузки приведен на рисунке 8.

Из полученных данных сделан основной вывод, что конструкция усиления круглыми «грибовидными» накладками, установленными методом индукционной пайки, показала свою высокую эффективность. Разрушение усиленных образцов не носит резкого, лавинообразного характера, а является результатом плавного разрушения паяного соединения по зоне спая по мере нарастания нагрузки.

а)



б)

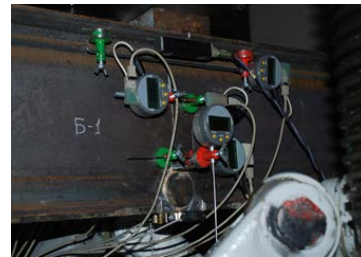


Рисунок 7 – Размещение измерительных приборов:
 а – измерительные блоки комплексов «Тензор-МС», TDS-150, DISYS (слева на право);
 б – размещение измерительных приборов

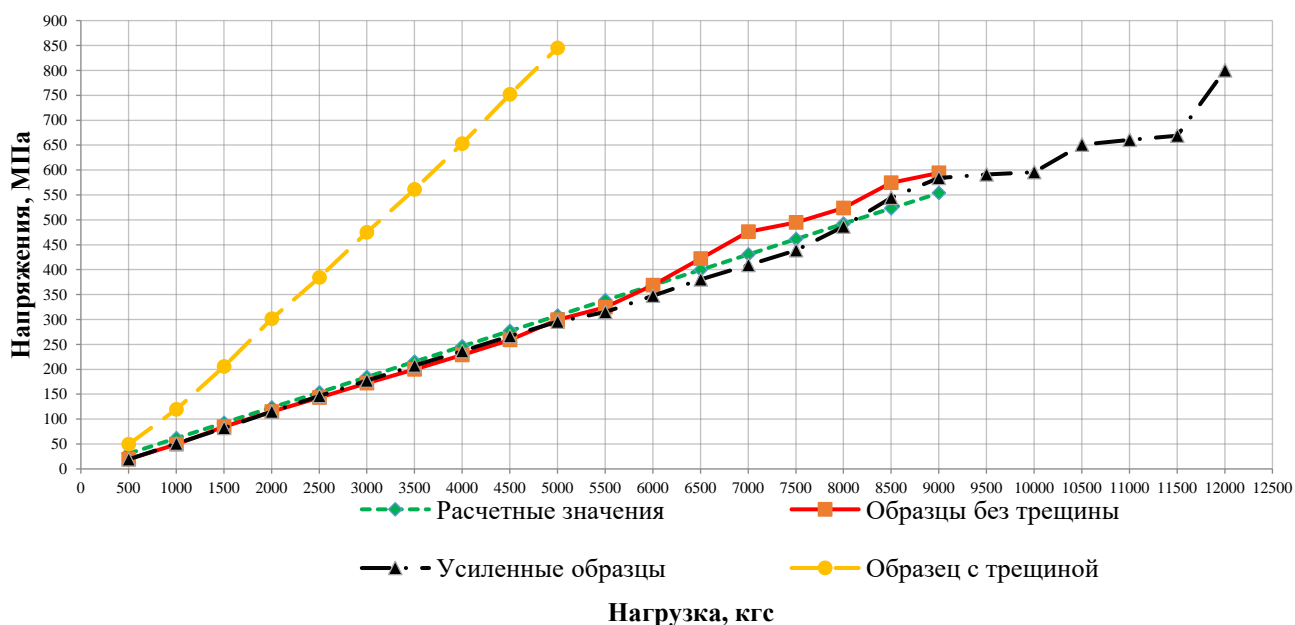


Рисунок 8 – Зависимость напряжений от нагрузки

С целью подтверждения долговечности соединений, выполненных индукционной и МИГ-пайкой при работе в условиях переменного нагружения, был выполнен комплекс лабораторных исследований выносливости паяных соединений.

Для испытаний на выносливость образцов, усиленных индукционной пайкой, по аналогии с испытаниями на прочность, были изготовлены контрольные балочные образцы. Образцы представляли собой сварные металлические двутавровые балки с усиленной ребрами жесткости стенкой и вырезанным в середине пролета нижним поясом. Габаритные размеры балок 300×1600 мм, сталь СтЗсп с пределом текучести 255 МПа. В балочных образцах в середине пролета был сделан искусственный концентратор напряжений в виде пропила шириной 1 мм и глубиной 5 мм. Схема и общий вид балочного образца приведены на рисунке 9.

Для выращивания усталостной трещины в образце был организован следующий режим загрузки: максимальная нагрузка – 7,0 т, максимальные напряжения на нижней грани стенки балки составили 182,0 МПа, коэффициент асимметрии цикла равен 0,43.

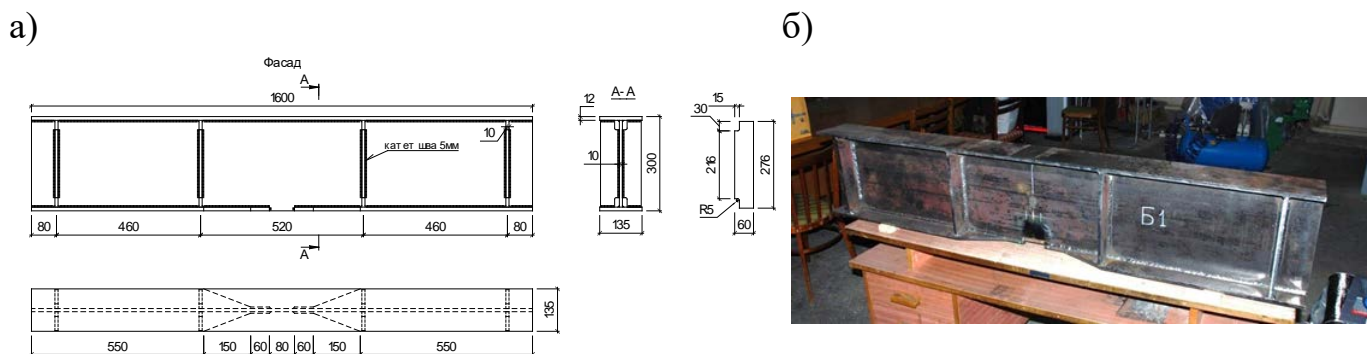


Рисунок 9 – Схема и общий вид образца для испытания на выносливость:

- а – схема образца;
б – общий вид образца

Испытания проводились на универсальной испытательной машине ГРМ-2А способом циклического нагружения (рисунок 10). Контроль деформаций осуществлялся на нижней грани балки (в месте выреза пояса) и на расстоянии 90 мм от нижней грани. Для контроля деформаций применялись тензодатчики ТДМ электронного измерительного комплекса «Тензор-МС». Для выращивания в образце усталостных трещин длиной около 20 мм потребовалось порядка 155 тысяч циклов.

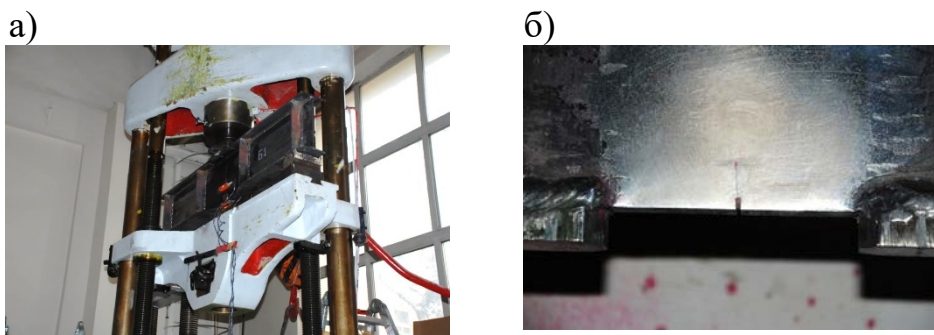


Рисунок 10 – Общий вид испытательной машины и фрагмент образца с трещиной:

- а – циклическое нагружение образца;
б – вид усталостной трещины

Балочные образцы с усталостными трещинами были усилены постановкой круглых «грибовидных» накладок методом индукционной пайки по описанной выше схеме. После усиления были произведены испытания на циклическую долговечность. При этом нагрузка прикладывалась такая, чтобы напряжения по нижней грани, исходя из условий работы реальной конструкции, были не более 110–120 МПа. Максимальная нагрузка на образец составляла 4,2 т, коэффициент асимметрии цикла – 0,6. Эффективность усиления определялась количеством циклов до разрушения элемента усиления. В данном случае фиксировалось отсоединение накладки от стенки балки. При наработке $2 \cdot 10^6$ циклов (нормативная циклическая долговечность по РД 50-686-89) расстройство соединения не последовало, что свидетельствует об эффективной работе паяного соединения на циклическую долговечность. При этом в зоне концентрации максимальных напряжений, в местах выреза нижнего пояса по концам сварных швов после $1 \cdot 10^6$ циклов образовались усталостные трещины. К моменту завершения испытаний усталостные трещины в стенке вырастали до 20 мм. Общий вид образца и вид соединения после $2 \cdot 10^6$ циклов показан на рисунке 11.



Рисунок 11 – Общий вид балочного образца после испытаний:
 а – образец с усталостной трещиной, локализованной постановкой
 двухсторонних «грибовидных» накладок;
 б – вид соединения после 2 млн циклов нагружения

По результатам испытаний соединений, выполненных индукционной пайкой, сделан вывод, что эти соединения обеспечивают базовую циклическую долговечность металлических конструкций пролетных строений $2 \cdot 10^6$ циклов.

МИГ-пайка является одной из новейших и прогрессивных технологий. Пайка выполняется с помощью сварочного полуавтомата в среде инертного газа и принципиально отличается от сварки тем, что для пайки используют проволоку, температура плавления которой меньше температуры плавления металла соединяемых элементов и соединение происходит за счет диффузии припоя (присадочной проволоки) с соединяемыми элементами.

Цель еще одного лабораторного исследования состояла в определении циклической долговечности соединений, выполненных МИГ-пайкой, при работе в изгибаемых элементах. Для исследования при помощи полуавтоматической сварки из стали 15ХСНД были изготовлены образцы, имитирующие фрагмент стенки балки пролетного строения. Образец представлял собой металлический лист толщиной 12 мм с приваренными с двух сторон ребрами жесткости толщиной 10 мм.

Для создания циклического нагружения в СибНИИ мостов СГУПС было разработано устройство, состоящее из электровибрационной установки на основе трехфазного асинхронного двигателя с блоком регулировки частоты и нагрузочного устройства, представляющего собой систему стандартных подвесных грузов. Общий вид устройства показан на рисунке 12, а. Частотный преобразователь позволяет изменять частоту вращения двигателя в диапазоне от 0 до 25 Гц. Частоту колебаний элемента и напряжения в горизонтальном листе образца, в местах обрыва ребер жесткости получали путем обработки графиков деформаций, зафиксированных при помощи тензодатчиков ТДМ-Ω и электронного измерительного комплекса «Тензор-МС». С целью имитации работы стенки балки пролетного строения был выбран пульсирующий цикл (коэффициент асимметрии цикла равен нулю) с амплитудой напряжений по концу ребра жесткости 110 МПа. Среднее количество циклов нагружения до образования усталостной трещины в исходном образце составило $2,45 \cdot 10^5$ циклов. Далее устанавливался режим резонанса и проводилось «дорастивание» трещины до величины 30–35 мм в каждую сторону от ребра жесткости. Полученные образцы с усталостными трещинами были усилены в соответствии с разработанными конструктивными решениями методом МИГ-пайки.

При испытаниях разрушение паяного соединения происходило в два этапа. Сначала на участке между накладками усиления по паяному шву образовывалась трещина (рисунок 12, б). При этом работоспособность паяного соединения и конструкции еще долго полностью сохранялась. Затем, после накопления усталостных повреждений в паяном шве прикрепления накладок, происходил быстрый отрыв накладок (рисунок 12, в). Средняя наработка до разрушения соединения, выполненного МИГ-пайкой, превышала $2 \cdot 10^6$ циклов.

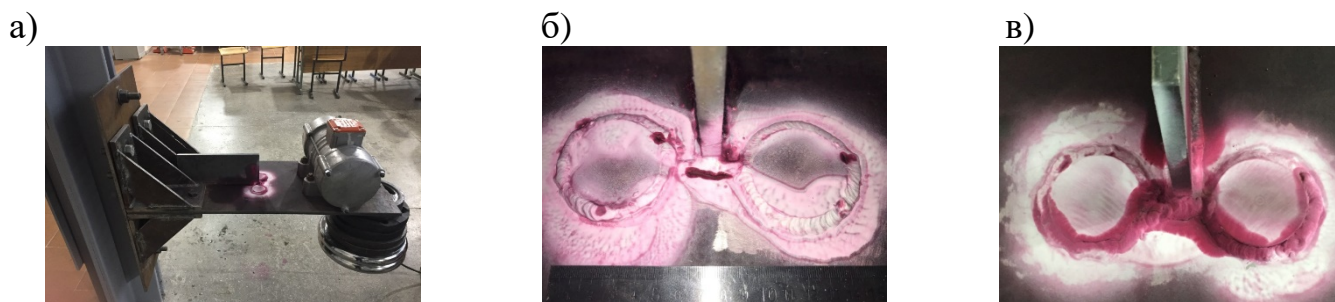


Рисунок 12 – Испытание усиленного МИГ-пайкой образца на выносливость:

- а – электровибрационная установка;
- б – трещина по паяному шву между накладками;
- в – отрыв накладок

По результатам испытаний сделан вывод, что выносливость соединений, выполненных при помощи МИГ-пайки, значительно превышает выносливость исходных образцов. МИГ-пайка может быть рекомендована для усиления стенок балок с усталостными трещинами; соединения, выполненные при помощи МИГ-пайки, обеспечивают нормативную циклическую долговечность металлических конструкций $2 \cdot 10^6$ циклов (см. РД 50-686-89).

В четвертой главе разработаны основные положения комплексного подхода к обеспечению циклической долговечности сварных и болтосварных пролетных строений железнодорожных мостов на основе применения инновационных технологий на всех этапах жизненного цикла: проектирования; изготовления на заводе; надзора, текущего содержания, ремонта и капитального ремонта в процессе эксплуатации. Приведено описание способов профилактики образования усталостных трещин и их локализации, которые основаны на методах индукционного нагрева, индукционной и МИГ-пайки, разработанных автором и адаптированных для конкретных типов сварных пролетных строений.

Описаны профилактические мероприятия:

- по снятию остаточных напряжений с помощью индукционного нагрева околошовной зоны с применением индукторов с магнитодиэлектриками;
- снятию остаточных напряжений в трещиноопасных местах локальной низкочастотной виброобработкой на резонансной частоте;
- профилактике образования трещин типа Т-9 и Т-10 высокочастотной механической проковкой зоны от 50 до 70 мм у концов сварных швов прикрепления ребер жесткости к стенке балки;
- обеспечению плотного примыкания ребер жесткости к поясам балок путем постановки на ребра жесткости методом индукционной или МИГ-пайки конструкции из уголкового коротышей и высокопрочных болтов.

Даны описания разработанных автором методов ремонта и локализации трещин в зависимости от их длины:

- торможения трещины методом локального индукционного прогрева металла на пути развития трещины с последующей, по мере остывания до температуры плюс 400°С, высокочастотной механической проковкой;
- постанковка методом пайки плоских и «грибовидных» накладок усиления;
- ремонт конструкции с трещиной в сварном шве прикрепления ребра жесткости постанковкой «косынок» усиления.

Основные способы ремонта конструкций с усталостными трещинами типа Т-9, Т-10 и Т-12 показаны на рисунке 13.

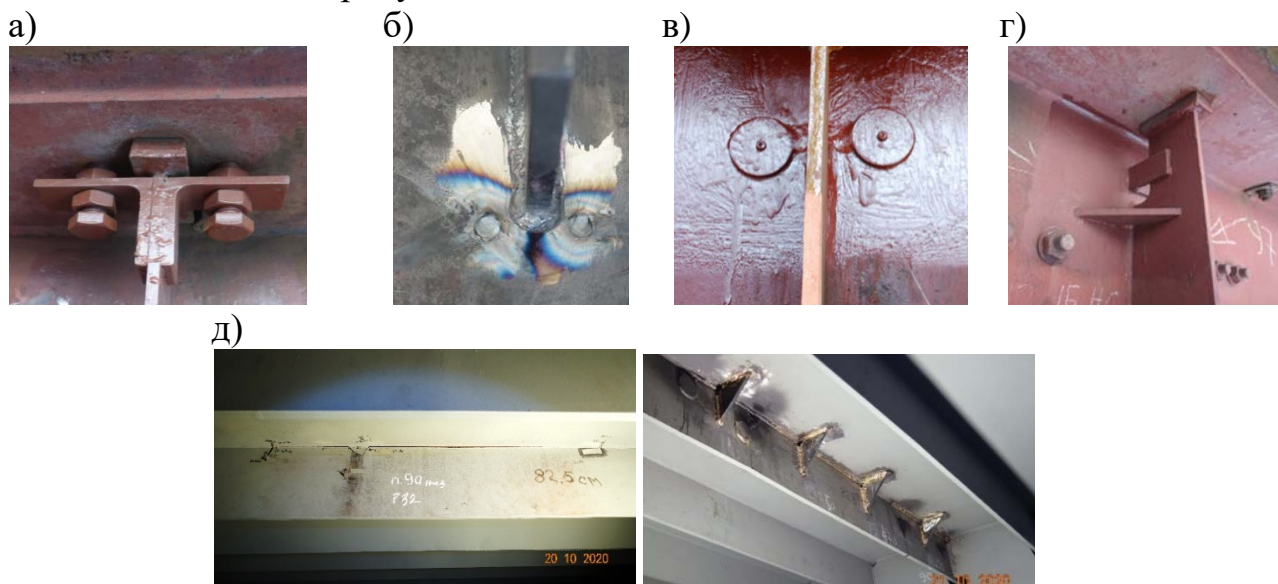


Рисунок 13 – Способы профилактики и локализации усталостных трещин:

- а – постанковка уголковых коротышей;
- б – локальный индукционный нагрев с проковкой;
- в – постанковка круглых «грибовидных» накладок;
- г – постанковка «косынок»;
- д – ремонт сварного шва ребра жесткости МИГ-пайкой с усилением шва постанковкой косынок

Разработанные автором решения по локализации усталостных трещин были апробированы при ремонте сварного пролетного строения металлического моста через р. Ояш, расположенного на 3433 км ПК 9 линии Новосибирск – Красноярск. Пролетное строение металлическое сварное, выполнено применительно к типовому проекту Ленгипротрансмоста 1971 г. инв. № 821/4. За время эксплуатации пролетное строение накопило повреждения в виде 10 усталостных трещин трех типов: Т-9, Т-12, Т-18.

Специалистами СГУПС в июле 2016 г. под руководством автора были выполнены работы по локализации усталостных трещин в стенках балок пролетного строения. Вид усталостных трещин до и после локализации приведен в таблице 2.

Испытания пролетного строения до и после ремонта выполнялись под наиболее тяжелой из обрабатываемых нагрузок, включающих сплотки магистральных электропоездов 2ЭС10 «Гранит», что полностью отвечает СП 79.13330.2012. Эффективность усиления оценивали по величине деформаций стенки балки под нагрузкой. При испытаниях фиксировали вертикальные перемещения верхнего пояса балки и горизонтальные

перемещения стенки балки в области ребра жесткости и напряжения в стенке балки под выкружкой ребра жесткости и на вероятном направлении развития трещины. Для испытаний были выбраны сечения в створе ребер жесткости № 2 и 18.

Таблица 2 – Обнаруженные повреждения и конструкция их усиления

Обнаруженное повреждение	Конструкция после усиления (ремонта)
Левая балка, ребро жесткости № 13. Трещина типа Т-12	
	
Левая балка, ребро жесткости № 18. Трещина типа Т-9, L = 90 мм	
	
Трещина типа Т-18 в стенке домкратной балки на устое № 0	
	

Теоретические значения контролируемых параметров определены по модели, разработанной в программном комплексе Midas Civil. Схема расстановки испытательных приборов в сечении показана на рисунке 14.

а)



б)



Рисунок 14 – Расстановка приборов до и после усиления:

а – установка приборов до усиления;

б – установка приборов после усиления

Сравнение величин деформаций и напряжений в элементах до и после усиления и ремонта показывает высокую эффективность усиления. В отдельных случаях выполненное усиление на порядок снижает величины напряжений и перемещений стенки. Пролетное строение после усиления обеспечивает пропуск проектной нагрузки С14 без ограничений. При усилении восстановлены все потребительские свойства конструкции и обеспечен ее нормативный срок службы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Разработана методика экспертно-аналитической оценки грузоподъемности металлических пролетных строений железнодорожных мостов по критерию грузоподъемности, которая позволяет в оперативном режиме назначить условия безопасного пропуска обращающейся железнодорожной нагрузки по пролетным строениям с усталостными трещинами. Установлена связь значения критерия грузоподъемности пролетных строений с проектными нагрузками 1907 г., 1925 г., Н7 и Н8, С14.

Разработана унифицированная балльная оценка по критерию ремонтпригодности, предназначенная для ранжирования искусственных сооружений при планировании работ текущего содержания и ремонта.

Введен критерий скорости деградации конструкций, используемый для оптимизации плана ремонтных работ и оценки качества содержания искусственных сооружений.

Результаты исследования внесены в *Инструкцию по оценке состояния и содержания искусственных сооружений ОАО «РЖД»* и *Методику ранжирования объектов искусственных сооружений и земляного полотна для оценки приоритетности их включения в капитальные виды ремонта.*

2 В результате теоретических исследований разработан алгоритм расчета на прочность паяных соединений металлических конструкций, а из условия прочности паяного соединения на отрыв и срез установлена аналитическая зависимость между длиной усталостной трещины и диаметром накладки для ее локализации. Конечно-элементным моделированием паяных соединений в комплексе Midas Civil установлено, что предложенные зависимости достаточно точно отражают работу паяных соединений и могут применяться при проектировании элементов локализации усталостных трещин с помощью индукционной и МИГ-пайки.

3 Установлено, что соединения, выполненные индукционной и МИГ-пайкой, обладают достаточной прочностью (300 МПа и более) и высокой циклической долговечностью (до $2 \cdot 10^6$ циклов). На основе комплекса лабораторных исследований доказана перспективность применения индукционной и МИГ-пайки для локализации усталостных трещин типа Т-9 и Т-10 в стенках главных и продольных балок сварных и болтосварных пролетных строений железнодорожных мостов.

4 Разработаны конструктивно-технологические решения, основанные на методах индукционного нагрева, индукционной и МИГ-пайки, позволяющие полностью восстановить несущую способность и обеспечить нормативную циклическую долговечность сварных пролетных строений с усталостными трещинами, и критерий их применения. Конструктивно-технологические решения включены в *Инструкцию по усилению трещин типа Т-9 и Т-10 в стенках главных и продольных балок сварных металлических пролетных строений железнодорожных мостов.*

На основе выполненных экспериментально-теоретических исследований предложен комплексный подход к обеспечению нормативной циклической долговечности и безопасности эксплуатации сварных и болтосварных металлических пролетных строений, основанный на применении инновационных технологий на всех этапах жизненного цикла: проектирования; изготовления на заводе; надзора, текущего содержания и ремонта в процессе эксплуатации.

Дальнейшие научные исследования будут направлены на выявление закономерностей роста усталостных трещин, определению граничных значений перехода от стабильной к нестабильной фазе роста трещин и на разработку новых конструкций с применением паяных и паяно-сварных соединений.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в ведущих научных рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России

1 Бокарев, С. А. Влияние тяжеловесного движения на искусственные сооружения / С. А. Бокарев, Ю. Н. Мурованный, А. М. Усольцев // Железнодорожный транспорт. – 2016. – № 4. – С. 25–28.

2 Бокарев, С. А. Применение индукционной пайки в металлических пролетных строениях / С. А. Бокарев, А. М. Усольцев // Путь и путевое хозяйство : науч.-техн. журнал. – 2017. – № 7. – С. 15–20.

3 Бокарев, С. А. Условия обеспечения движения тяжеловесных поездов по искусственным сооружениям / С. А. Бокарев, Ю. Н. Мурованный, С. С. Прибытков, А. М. Усольцев // Железнодорожный транспорт. – 2017. – № 7. – С. 64–67.

4 Бокарев, С. А. Обеспечение пропуска тяжеловесных поездов по металлическим мостам / С. А. Бокарев, А. М. Усольцев, К. О. Жунев // Путь и путевое хозяйство : науч.-техн. журнал. – 2019. – № 4. – С. 26–29.

5 Бокарев, С. А. Лабораторные исследования работы мостовых конструкций, усиленных индукционной пайкой / С. А. Бокарев, А. М. Усольцев // Транспортные сооружения. – 2019. – Т. 6, № 2. – С. 12.

6 Бокарев, С. А. Предупреждение появления усталостных трещин в сварных металлических пролетных строениях / С. А. Бокарев, А. М. Усольцев, А. И. Служаев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2019. – Т. 21, № 4. – С. 181–193.

7 Усольцев, А. М. Исследование влияния индукционного нагрева на прочностные характеристики стали 10ХСНД // Транспортные сооружения. – 2019. – № 3. – DOI: 10.15862/41SATS319. – URL: <https://t-s.today/PDF/41SATS319.pdf> (дата обращения: 15.10.2020).

8 Усольцев, А. М. Обеспечение долговечности сварных пролетных строений мостов при тяжеловесном и длинносоставном движении / А. М. Усольцев, Е. Г. Попова, М. Ю. Маликов // Путь и путевое хозяйство : науч.-техн. журнал. – 2020. – № 12. – С. 22–27.

9 Усольцев, А. М. Комплексный подход к обеспечению долговечности сварных пролетных строений железнодорожных мостов / А. М. Усольцев, Е. Г. Попова, М. Ю. Маликов // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2020. – № 3. – С. 46–50.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных Scopus

10 Bokarev, S. A. Stress-Strain Behavior of Welded Joints in Railway Girders / S. A. Bokarev, K. O. Zhunev, A. M. Usol'tsev // Magazine of Civil Engineering. – 2018. – № 84(8). – P. 119–129. – DOI: 10.18720/MCE.84.12.

Публикации в журналах, научных сборниках и других научных изданиях

11 Бокарев, С. А. Автоматизированная система управления содержанием искусственных сооружений / С. А. Бокарев, А. М. Усольцев, А. Х. Астрахан, Н. М. Седова // Совершенствование искусственных сооружений на железных дорогах, Новосибирск, 1989 г. – С. 5–8.

12 Бокарев, С. А. Автоматизированная система управления содержанием искусственных сооружений, эксплуатируемых на железных дорогах МПС / С. А. Бокарев, А. М. Усольцев, Ю. М. Широков // ТРАНССИБ и научно-технический прогресс на железнодорожном транспорте: тез. докл. науч.-техн. конференции. – Новосибирск, 1991. – Ч. 2. – С. 76–77.

13 Бокарев, С. А. Технологическая модель управления техническим состоянием искусственных сооружений в дистанции пути / С. А. Бокарев, А. М. Усольцев // Вузы Сибири и Дальнего Востока – Транссибу : тез. рег. науч.-практ. конференции (г. Новосибирск, 27–29 ноября 2002 г.). – 2002. – С. 166–178.

14 Бокарев, С. А. О необходимости и методах ремонта стальных сварных пролетных строений железнодорожных мостов с трещинами типа Т9 и Т10 / С. А. Бокарев, А. М. Усольцев // Политранспортные системы : материалы VIII Междунар. науч.-техн. конференции. – 2015. – С. 120–125.

15 Маликов, М. Ю. Применение паяных соединений в металлических мостах / М. Ю. Маликов, Л. Ю. Соловьев, А. М. Усольцев // Материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Пермь: Изд-во ПНИУ, 2020. – С. 157–162.

Патенты на регистрацию изобретений и полезных моделей

16 Патент на изобретение № 2562622 Российская Федерация, МПК E01D 22/00 (2006.01). Способ усиления имеющего трещину металлического элемента пролетных строений мостов: № 2013155819/03 : заявл. 16.12.2013 : опубл. 13.08.2015 / Бокарев С. А., Усольцев А. М., Мурованный Ю. Н. : заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО СГУПС. – 5 с.

17 Патент на изобретение № 2633936 Российская Федерация, МПК E01D 22/00 (2006.01). Способ усиления имеющего трещину металлического элемента пролетных строений мостов : № 2016130133 : заявл. 22.07.2016 : опубл. 19.10.2017 / Бокарев С. А., Усольцев А. М., Мурованный Ю. Н. : патентообладатели ОАО «РЖД». – 5 с.

18 Патент на изобретение № 2642758 Российская Федерация, МПК E01D 22/00 (2006.01). Способ усиления имеющего трещину металлического тонкостенного элемента пролетных строений мостов : № 2016130131 : заявл. 22.07.2016 : опубл. 25.01.2018 / Бокарев С. А., Усольцев А. М., Служаев А. И. : патентообладатель ОАО «РЖД». – 7 с.

19 Патент на изобретение № 2656645 Российская Федерация, МПК E01D 22/00 (2006.01). Способ торможения и предотвращения образования усталостных трещин : № 2016130130 : заявл. 22.07.2016 : опубл. 06.06.2018 / Бокарев С. А., Усольцев А. М., Попова Е. Г. : патентообладатели ОАО «РЖД». – 8 с.

20 Патент на изобретение № 2675120 Российская Федерация, МПК E01D 22/00 (2006.01). Способ усиления балки пролетного строения моста : № 2018100682 : заявл. 10.01.2018 : опубл. 17.12.2018 / Бокарев С. А., Усольцев А. М. : патентообладатели ФГБОУ ВО СГУПС. – 6 с.

21 Патент на изобретение № 2700133 Российская Федерация, МПК E01D 22/00 (2006.01). Способ усиления имеющего трещину в сварном шве металлического

элемента пролетного строения моста: № 2018120841 : заявл. 05.07.2018 : опубл. 12.09.2019 / Усольцев А. М., Бокарев С. А., Усольцев А. М., Попова Е. Г., Служаев А. И., Маликов М. Ю. : патентообладатели ОАО «РЖД». – 6 с.

22 Патент на изобретение № 2695912 Российская Федерация, МПК E01D 22/00 (2006.01). Способ виброобработки конструкции для изменения напряженно-деформационного и структурного состояния ее материала : № 2018135931 : заявл. 10.10.2018 : опубл. 29.07.2019 / Усольцев А. М., Бокарев С. А., Усольцев А. М., Попова Е. Г., Маликов М. Ю. : патентообладатели ФГБОУ ВО СГУПС. – 7 с.

23 Патент на полезную модель № 174678. Датчик деформаций : № 2017100389: заявл. 09.01.2017 : опубл. 25.10.2017 / Бардаев П. П., Бокарев С. А., Мурованный Ю. Н., Усольцев А. М. : патентообладатели ФГБОУ ВО СГУПС, АО «СибНИТ». – 6 с.

Свидетельства на регистрацию программных продуктов и баз данных

24 Автоматизированная система управления содержанием ИССО в дистанции пути / С. А. Бокарев, Ю. Н. Мурованный, А. М. Усольцев, Д. Н. Цветков, А. Н. Яшнов. № 508 в ОФАП МПС России от 23.06.99.

25 Автоматизированная система управления содержанием ИССО в управлении дороги / С. А. Бокарев, Ю. Н. Мурованный, А. М. Усольцев, Д. Н. Цветков, А. Н. Яшнов. № 507 в ОФАП МПС России от 23.06.99.

26 Автоматизированная система управления содержанием ИССО в ЦП / С. А. Бокарев, Ю. Н. Мурованный, А. М. Усольцев, Д. Н. Цветков, А. Н. Яшнов. № 536 в ОФАП МПС России от 23.06.99.

27 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017663592. Классификация и условия пропуска поездной нагрузки v3.5 : № 2017660458 : заявл. 18.10.2017 : опубл. 07.12.2017 / С. А. Бокарев, А. М. Усольцев, С. С. Прибытков, Ю. Н. Мурованный : правообладатель ФГБОУ ВО СГУПС.

28 Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2020620818. Каталог неисправностей искусственных сооружений : № 2020620665 : заявл. 24.04.2020 : опубл. 21.05.2020 / К. О. Жунев, Ю. Н. Мурованный, С. С. Прибытков, А. М. Усольцев, А. Н. Яшнов : правообладатель ФГБОУ ВО СГУПС.

Усольцев Андрей Михайлович

ПОВЫШЕНИЕ ЦИКЛИЧЕСКОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СВАРНЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ С УСТАЛОСТНЫМИ ТРЕЩИНАМИ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Специальность 05.23.11 – Проектирование и строительство дорог,
метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей
(технические науки)

Подписано в печать «19» апреля 2021 г.
1,0 печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 3629

Издательство ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»
630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191. Тел./факс (383) 328-03-81. E-mail: bvu@stu.ru