

На правах рукописи



Жунев Кирилл Олегович

**УСТАЛОСТНАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РЕБЕР
ЖЕСТКОСТИ В ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЯХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ
МОСТОВ**

Специальность 2.1.8 – «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов,
аэродромов, мостов и транспортных тоннелей»
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2021 г.

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

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Яшнов Андрей Николаевич

Официальные оппоненты: **Васильев Александр Ильич**
доктор технических наук, профессор, профессор
кафедры «Мосты, тоннели и строительные
конструкции» ФГБОУ ВО «Московский
автомобильно-дорожный государственный
технический университет»

Овчинников Илья Игоревич
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Транспортное строительство» ФГБОУ ВО
«Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А.»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ПГУПС)**

Защита состоится: «24» ноября 2021 г. в 15-00 на заседании диссертационного совета 99.2.054.02 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения» и «Томский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 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 «__» _____ 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 11 300 металлических пролетных строений. Половина из этих пролетных строений является болто-сварными, запроектированными под современную нагрузку С14. В таких конструкциях, как правило, прикрепление продольных и поперечных связей выполняют при помощи высокопрочных болтов, а прикрепление ребер жесткости к главным или продольным балкам и стыковые соединения – автоматической сваркой. Несмотря на выполнение требований современных норм проектирования и относительно непродолжительный период эксплуатации, эти металлоконструкции имеют высокую степень дефектности по наличию усталостных трещин в сварных швах и металле околошовной зоны ребер жесткости. В настоящий момент около 20 % всех болто-сварных пролетных строений эксплуатируют с усталостными трещинами. Наибольшее распространение получили усталостные трещины, начинающиеся у верхнего и нижнего концов шва прикрепления вертикальных ребер жесткости к стенкам и развивающиеся в металле стенки (тип Т-9, Т-10). Такие трещины, при существенном развитии, могут снижать несущую способность балки и являться инициатором хрупкого разрушения конструкции. За последние 5 лет количество усталостных трещин в болто-сварных пролетных строениях, эксплуатируемых на дорогах Сибирского региона, увеличилось в 2-3 раза. Эксплуатация пролетных строений, подверженных трещинообразованию, требует постоянного контроля за развитием трещин с целью своевременного принятия мер по их торможению или усилению соединения.

Известно, что усталостное разрушение металла происходит в результате действия переменных нагрузок, величина которых значительно меньше предельной статической нагрузки. Зарождение усталостных трещин, как правило, связывают с наличием субмикроскопических дефектов в металле, в том числе и в строении кристаллической решетки. Циклически повторяющееся нагружение элемента приводит к деградации материала, увеличению размеров микродефектов и их объединению в макроскопическую усталостную трещину. Очевидно, что ввод в обращение вагонов с повышенными осевыми нагрузками в рамках реализации стратегии развития железных дорог повысит скорость накопления усталостных повреждений в элементах металлических пролетных строений и увеличит вероятность образования усталостных трещин.

Для определения долговечности сварных соединений в пролетных строениях мостов применяют вероятностный метод расчета усталости сварных конструкций, разработанный в 90-х годах прошлого века. Стоит отметить, что расчетная долговечность некоторых сварных соединений получается в 2-3 раза выше фактической. Низкую достоверность определения усталостной долговечности также имеют сварные соединения вертикальных ребер жесткости в местах образования наиболее распространенных трещин Т-9 и Т-10.

Таким образом, **актуальность исследования** обусловлена необходимостью определения усталостной долговечности сварных соединений железнодорожных

металлических пролетных строений в связи с ростом количества усталостных трещин в этих конструкциях.

Степень разработанности проблемы. Научные аспекты работы были сформированы на основе изучения трудов отечественных и зарубежных ученых ведущих научно-исследовательских институтов и высших учебных заведений.

Исследованию усталостной долговечности металлических пролетных строений посвящены работы В. С. Агеева, К. Б. Бобылева, С. А. Бокарева, В. В. Болотина, А. И. Васильева, Г. А. Грудциной, А. А. Дорошкевича, П. П. Ефимова, В. М. Картопольцева, Ю. Г. Козьмина, В. В. Кондратова, В. О. Осипова, Ю. И. Романова, Е. П. Феоктистовой и др. За рубежом изучением усталостной долговечности металлических пролетных строений занимались М. Г. Мальгин (Украина), К. В. Медведев (Украина), М. Bowman (США), R. Dexter (США), D. Fasl (США), J. Fisher (США), С. Heinsen (США), J. Leander (Швеция), С. Roeder (США) и др.

Совершенствованием методов определения усталостной долговечности сварных соединений занимались как отечественные ученые: В. А. Винокуров, Р. В. Гольдштейн, В. П. Когаев, И. В. Кудрявцев, Ю. Н. Работнов, С. В. Серенсен и др., так и зарубежные: Н. А. Махутов (Украина), В. И. Труфяков (Украина), М. Al-Emrani (Швеция), Р. Dong (США), F. Erdogan (США), Р. Forrest (Великобритания), W. Fricke (Германия), G. Glinka (Канада), А. Hobbacker (Германия), E. Neimi (Финляндия), Р. Paris (США), D. Radaj (Германия) и др.

Известно, что в 1990-х годах специалистами таких институтов, как НИИЖТ (СГУПС), МИИТ, ИЭС им. Е. О. Патона, ВНИИЖТ, были проведены совместные исследования усталостной долговечности сварных соединений, в результате которых был разработан вероятностный метод определения усталостной долговечности сварных соединений в металлоконструкциях. Анализ исходных предпосылок, заложенных в основу расчетов, показал, что они имеют следующие недостатки: не были выполнены в полном объеме натурные исследования напряженного состояния в местах трещинообразования; существовало несоответствие между фактическим напряженным состоянием некоторых трещиноподобных соединений и напряженным состоянием лабораторных образцов при испытаниях (испытания, в основном, проводили при одноосном растяжении-сжатии).

Объект исследования – сварные соединения ребер жесткости разрезных болто-сварных пролетных строений железнодорожных мостов.

Предмет исследования – усталостная долговечность сварных соединений ребер жесткости болто-сварных пролетных строений железнодорожных мостов.

Цель исследования – повышение точности оценки усталостной долговечности сварных соединений в болто-сварных пролетных строениях железнодорожных мостов.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**.

1. Уточнить факторы, влияющие на трещинообразование в болто-сварных пролетных строениях, на основе анализа натуральных исследований напряженно-деформированного состояния сварных соединений, подверженных образованию

наиболее распространенных усталостных трещин, при воздействии подвижной обращающейся нагрузки.

2. Определить характеристики усталости сварных соединений, типичных для пролетных строений и находящихся в характерном для них напряженно-деформированном состоянии, по результатам лабораторных испытаний долговечности сварных образцов, проведенных в соответствии с разработанной программой испытаний.

3. Уточнить метод расчета усталостного ресурса и наработки болто-сварных пролетных строений железнодорожных мостов на основе исследований фактической работы и усталостной долговечности трещинопасных соединений и систематизации статистических данных о характеристиках поездо- и грузопотоков за время эксплуатации сооружений.

Научная новизна:

- уточнены конструктивные особенности болто-сварных пролетных строений и параметры их эксплуатации, влияющие на образование усталостных трещин в стенках балок около вертикальных ребер жесткости при воздействии подвижной нагрузки;

- получены характеристики усталости сварного крестообразного соединения, работающего на изгиб и находящегося в напряженно-деформированном состоянии, характерном для трещинопасных соединений вертикальных ребер жесткости в болто-сварных пролетных строениях;

- предложен стохастический метод оценки усталостной долговечности сварных соединений в болто-сварных пролетных строениях, учитывающий вероятность безотказной работы сварного соединения, его характерное напряженно-деформированное состояние, изменчивость схем поездов и грузопотоков в течение срока эксплуатации сооружения.

Теоретическая и практическая значимость работы. Создана система практических рекомендаций по определению напряжений в конструкции от совместного действия остаточных сварочных напряжений и внешних нагрузок. Предложен нетрадиционный подход оценки усталостной долговечности сварных соединений в болто-сварных пролетных строениях, учитывающий вероятность безотказной работы сварного соединения, его характерное напряженно-деформированное состояние, изменчивость схем поездов и грузопотоков в течение срока эксплуатации сооружения. Разработано программное обеспечение, позволяющее автоматизировать предложенный метод оценки усталостной долговечности сварных соединений. На основе уточненной оценки усталостной долговечности возможно рациональное планирование инвестиционных и текущих затрат на ремонт, реконструкцию или замену пролетных строений.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач в ходе научного исследования были применены теоретические и эмпирические методы научного познания. При уточнении метода оценки долговечности сварных соединений использованы основные положения теории надежности и теории усталостного разрушения. Для обработки экспериментальных данных, полученных в результате натурных и лабораторных исследований, были применены вероятностно-статистическая обработка и корреляционный анализ.

Для уточнения работы исследованных конструкций применяли численное моделирование. Такие эмпирические методы, как наблюдение, измерение, эксперимент, использовали при натурных испытаниях конструкций под обращающейся нагрузкой и лабораторных исследованиях долговечности сварных образцов.

Основные положения, выносимые на защиту:

- зависимости деформирования стенок балок около вертикальных ребер жесткости в болто-сварных пролетных строениях от типа мостового полотна, уровня езды и плотности опирания верхнего пояса на ребра жесткости;
- характеристики усталости сварных соединений, типичных для пролетных строений, полученные по результатам лабораторных испытаний изгибаемых сварных образцов в диапазоне максимальных напряжений от 30,0 до 110,0 МПа;
- уточненный метод оценки усталостной долговечности болто-сварных пролетных строений, учитывающий вероятность безотказной работы сварного соединения, его характерное напряженно-деформированное состояние, изменчивость схем поездов и грузопотоков в течение срока эксплуатации сооружения.

Достоверность полученных результатов обусловлена применением объективных методов научного исследования, широко распространенных в науке и в практике проектирования мостовых конструкций, сертифицированных и поверенных приборов и программного обеспечения, а также подтверждается согласованностью результатов экспериментальных и теоретических исследований.

Апробация основных результатов диссертационного исследования была выполнена на следующих конференциях:

- XV научно-техническая конференция студентов и аспирантов (г. Новосибирск, СГУПС, ноябрь 2016 г.);
- IX Международная научно-техническая конференция «Политранспортные системы» (г. Новосибирск, СГУПС, ноябрь 2016 г.);
- VIII Международная научно-техническая конференция «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (г. Иркутск, ИрГУПС, март 2017 г.);
- Международная научно-практическая конференция «Инновационные факторы развития транспорта. Теория и практика» (г. Новосибирск, СГУПС, октябрь 2017 г.);
- IX научно-практическая конференция «Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения» (г. Санкт-Петербург, СПбПУ, октябрь 2018 г.);
- Национальная научно-практическая конференция «Наука и практика в решении стратегических и тактических задач устойчивого развития России» (г. Санкт-Петербург, СПбЦСА, январь 2019 г.);
- Международная научно-практическая конференция «Транспорт: наука, образование, производство» (г. Ростов-на-Дону, РГУПС, апрель 2019 г.);
- Всероссийская научно-практическая конференция «Исследование, проектирование, строительство и реконструкция, эксплуатация и мониторинг мостов» (г. Новосибирск, СГУПС, ноябрь 2019 г.);

- VII Международная научно-практическая конференция «Мосты и тоннели: теория, исследования, практика» (г. Днепр, ДНУЖТ, октябрь 2020 г.);
- II Международная научно-практическая конференция «Проектирование, строительство и эксплуатация мостов, тоннелей и метрополитенов» (г. Москва, РУТ (МИИТ), апрель 2021 г.).

Внедрение результатов.

Результаты исследований использованы при разработке следующих нормативных документов:

- Инструкция по оценке остаточного усталостного ресурса сварных пролетных строений железнодорожных мостов, утвержденная в 2019 году ОАО «РЖД»;

- Инструкция по оценке остаточного ресурса металлических (решетчатых и сплошностенчатых) пролетных строений, пролетных строений из обычного железобетона и опор железнодорожных мостов, утвержденная в 2019 году ОАО «РЖД».

Публикации и изобретения. По теме исследования опубликовано четырнадцать работ, в том числе четыре публикации в ведущих научных рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки России и одна – в издании, входящем в международную базу данных Scopus, зарегистрирован патент на изобретение установки для механических испытаний образцов листовых материалов на усталость при изгибе, получено свидетельство о регистрации программного продукта по оценке усталостной долговечности соединений пролетных строений.

Личный вклад автора состоит в участии на всех этапах процесса научного исследования, непосредственном участии в получении исходных данных, планировании и проведении лабораторных и натурных экспериментов; в обработке и интерпретации экспериментальных данных; в подготовке основных публикаций по выполненной работе. Все результаты расчетов легли в основу программы, разработанной соискателем, предназначенной для оценки усталостной долговечности соединений пролетных строений.

Структуру работы составляют введение, четыре главы, заключение и список литературы. Полный объем работы составляет 173 страницы, 75 рисунков, 17 таблиц и 4 приложения. Список литературы включает 164 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведены общие сведения о конструкции и техническом состоянии эксплуатируемых типовых болто-сварных пролетных строений железнодорожных мостов, выполнен анализ существующих методов оценки усталостной долговечности сварных соединений, представлены отечественные и зарубежные результаты экспериментальных исследований долговечности болто-сварных пролетных строений, показана необходимость уточнения существующего метода оценки усталостной долговечности сварных соединений в пролетных строениях мостов.

Около пяти тысяч металлических пролетных строений, эксплуатируемых на сети железных дорог России, являются болто-сварными. В настоящее время разработано более 10 типовых проектов этих конструкций, наиболее распространенные из которых приведены на рисунке 1. Несмотря на большое разнообразие конструкций болто-сварных пролетных строений, подавляющее большинство подвержено преждевременному образованию усталостных трещин в сварных швах элементов, работающих на местную нагрузку. Наиболее распространенные усталостные трещины образуются по концам сварных швов вертикальных ребер жесткости и развиваются в металле стенки балки (рисунок 2). Такие трещины, при существенном развитии, могут снижать несущую способность сечения и являться инициатором хрупкого разрушения конструкции.

Анализ технического состояния болто-сварных пролетных строений за несколько лет позволил определить динамику изменения количества болто-сварных пролетных строений с усталостными трещинами (рисунок 3) и продолжительность эксплуатации до образования первой трещины (рисунок 4, а). Кроме того, рассмотрение истории ввода в эксплуатацию таких пролетных строений позволяет выделить два периода с наибольшей интенсивностью: 1975-1990 г.г. и 2000-2015 г.г. (рисунок 4, б).

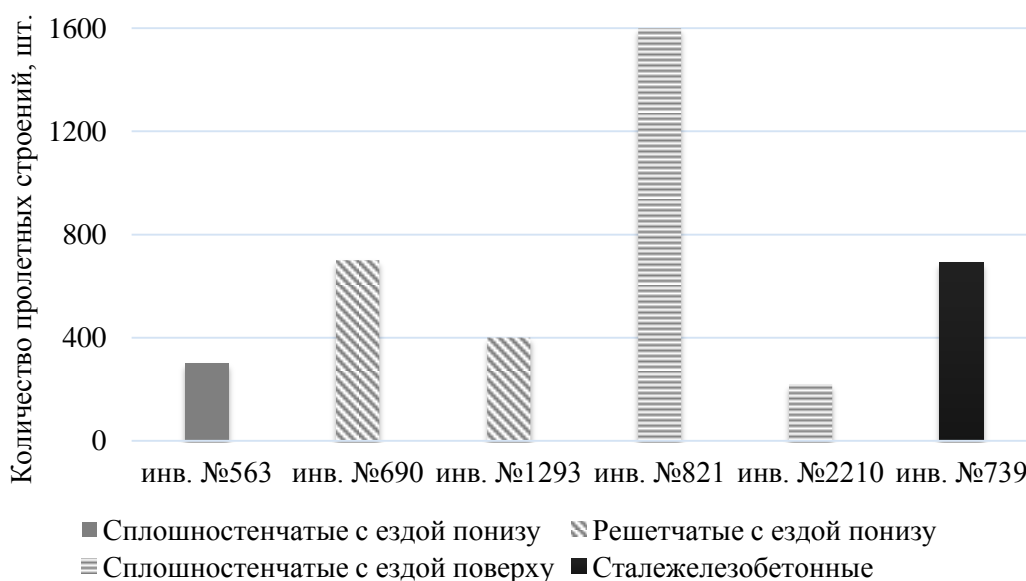


Рисунок 1 – Наиболее распространенные типовые проекты болто-сварных пролетных строений

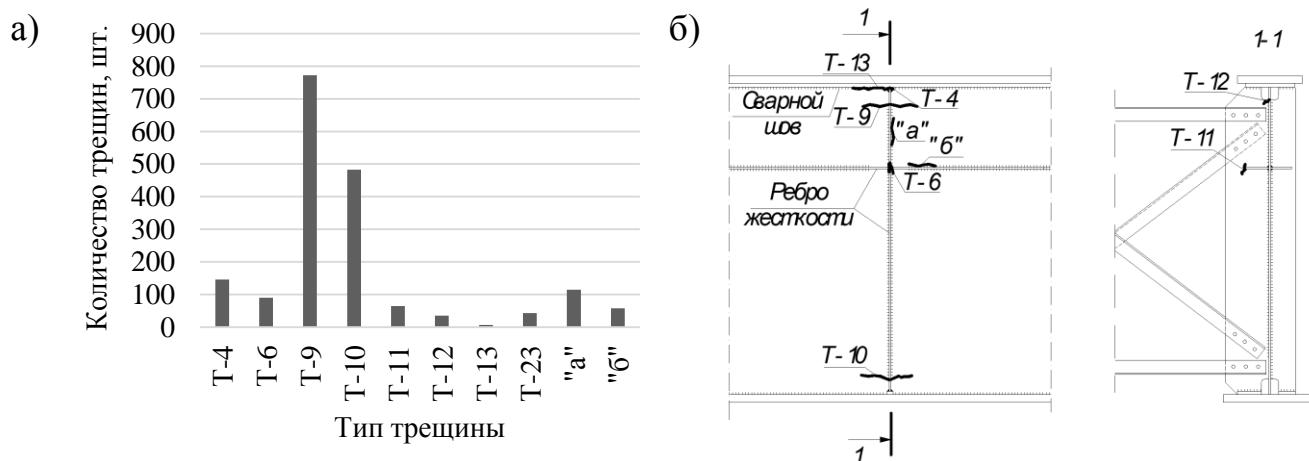


Рисунок 2 – Усталостные трещины в болто-сварных пролетных строениях:
а – гистограмма распределения трещин; б – расположение трещин в конструкции

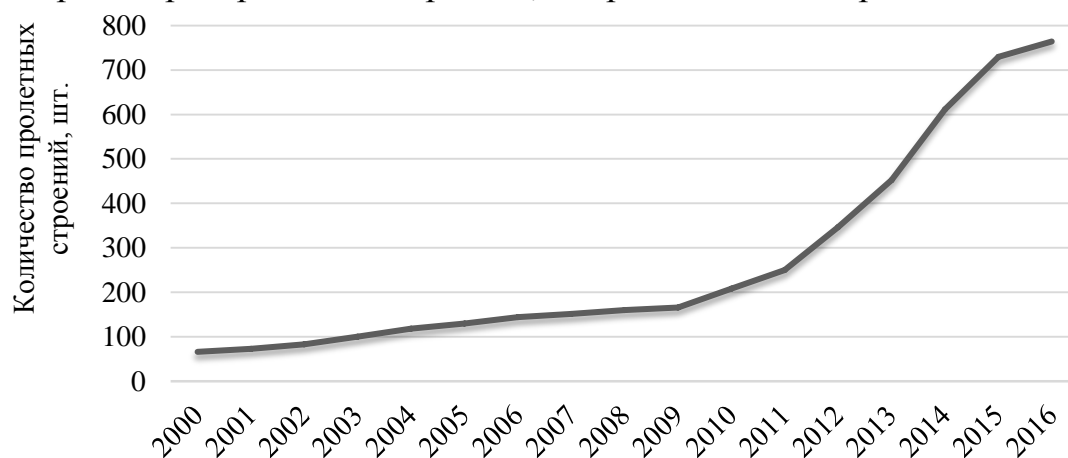


Рисунок 3 – Динамика изменения количества болто-сварных пролетных строений с усталостными трещинами

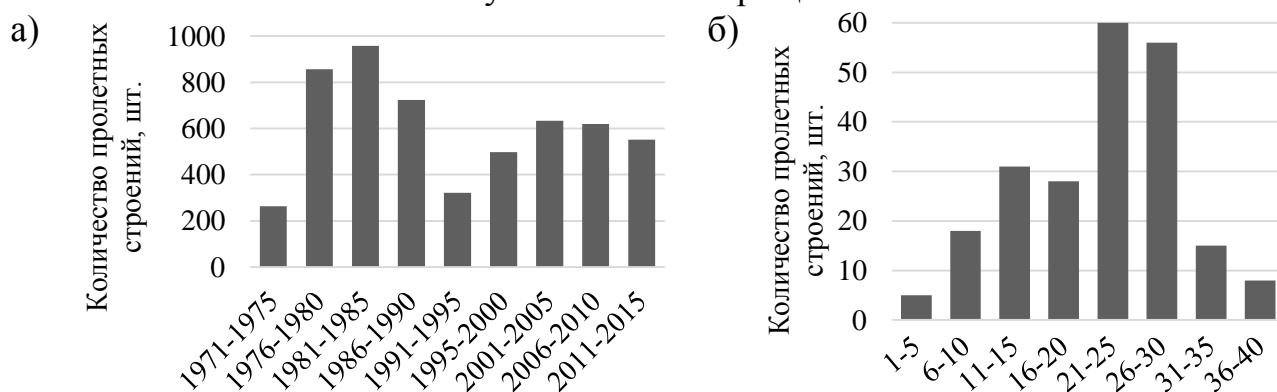


Рисунок 4 – История эксплуатации болто-сварных пролетных строений:
а – начало эксплуатации; б – время до образования первой трещины

По данным, представленным на рисунке 3, видно, что количество пролетных строений с трещинами неуклонно прогрессирует и в период с 2008 по 2015 г.г. увеличилось в 4 раза. Подобная динамика, вероятно, связана с тем, что к этому времени пролетные строения, установленные с 1975 по 1990 годы, находились в эксплуатации 20-30 лет, а, как видно из рисунка 4, вероятность образования трещин в этот период наибольшая. Подобное резкое увеличение количества пролетных строений с трещинами возможно и в будущем, когда

начнется интенсивное трещинообразование в пролетных строениях, установленных с 2000 года. Кроме того, на образование усталостных трещин в болто-сварных пролетных строениях может повлиять ввод тяжеловесных и длинносоставных поездов, которые ускорят процесс накопления усталостных повреждений.

Анализ исследований, посвященных определению усталостной долговечности сварных соединений металлоконструкций, позволил установить три метода для решения этой задачи: по измерениям деформаций в зонах трещинообразования, на основе численного моделирования роста трещины, при помощи кривых усталости. Стоит отметить, что оценка усталостной долговечности по изменению деформаций в зонах возможного трещинообразования и на основе численного моделирования роста трещины не получили широкого распространения из-за высокой трудоемкости и применяются в исследовательских целях для уникальных конструкций и сооружений. Для прогноза усталостной долговечности преимущественно используют модель линейного суммирования повреждений и зависимости числа циклов до разрушения от амплитуды или максимальных напряжений цикла, представленные в виде кривых усталости (рисунок 5). Такая инженерная методика хорошо зарекомендовала себя и используется в большинстве нормативных документов, регламентирующих оценку усталостной долговечности.

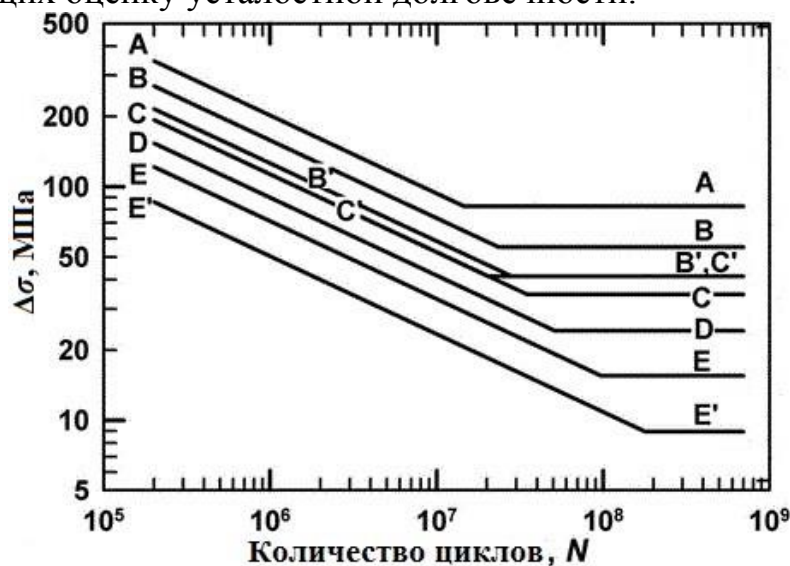


Рисунок 5 – Кривые усталости AASHTO LRFD 2012 Bridge Design Specifications

Аналогичный подход был применен отечественными исследователями в 90-х годах прошлого века при разработке метода оценки усталостной долговечности сварных соединений. Определение долговечности некоторых сварных соединений по этой методике имеет низкую достоверность. Особенно это заметно при определении долговечности сварных швов вертикальных ребер жесткости в болто-сварных пролетных строениях. Расчетная долговечность соединений, подверженных образованию наиболее распространенных трещин Т-9 и Т-10, получается больше в 2-3 раза выше фактической.

Анализ результатов отечественных и зарубежных экспериментальных исследований, касающихся усталостной долговечности сварных соединений в

пролетных строениях, показал, что появление усталостных трещин в элементах конструкций в процессе эксплуатации может быть связано со следующим рядом факторов:

- остаточными сварочными напряжениями;
- особенностями воздействия подвижного состава и передачи подвижной нагрузки мостовым полотном;
- наличием неплотности опирания верхнего пояса балки на вертикальные ребра жесткости;
- изгибными деформациями стенки балки на длине выреза ребра жесткости.

Совокупность этих факторов может значительно увеличивать действующие напряжения в трещиноопасной зоне по сравнению с проектными и приводить к снижению усталостной долговечности сварного узла. На основании изложенного в первой главе определены задачи диссертационного исследования.

Во второй главе представлены методика проведения и результаты обследований 14 болто-сварных пролетных строений, изготовленных по типовым проектам инв. № 563, № 690, № 821 и имеющих усталостные трещины в сварных соединениях. В процессе обследований пролетных строений и камеральной обработки данных были определены следующие параметры:

- положение рельсового пути и главных балок пролетного строения в профиле;
- эксцентриситет пути;
- конструкция мостового полотна на пролетном строении, соответствие нормам содержания;
- тип и длина трещин в сварных швах и металле околошовной зоны;
- наличие зазора в примыкании вертикальных ребер жесткости к верхнему поясу главных балок и балок проезжей части;
- наличие неплотности опирания пролетного строения на опорные части;
- величина напряжений в трещиноопасных узлах под обращающейся нагрузкой.

Проведенные обследования подтвердили, что подавляющее большинство усталостных трещин образуется у вертикальных ребер жесткости и соответствует трещинам типа Т-9 и Т-10. В результате статистического анализа значимой зависимости между количеством усталостных трещин в пролетном строении и типом или неисправностями мостового полотна выявлено не было. Это может указывать на то, что неисправности мостового полотна, которые увеличивают вибрацию конструкции, как правило, не распространяются по всей длине пролетного строения и влияют на образование и дальнейшее развитие трещины локально, около определенного ребра жесткости (рисунок 6). Примером еще одной неисправности пролетного строения, оказывающей локальное влияние на трещинообразование, может служить неплотное опирание пролетного строения на опорные части, при наличии которого образуются усталостные трещины у опорного ребра жесткости (рисунок 6).

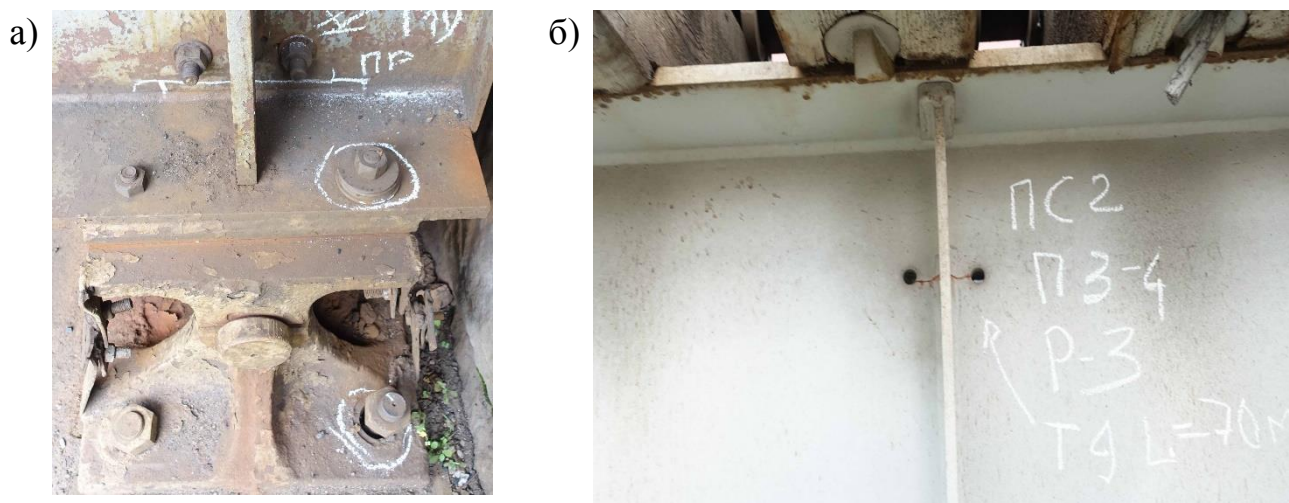


Рисунок 6 – Развитие трещин в сварных швах вертикальных ребер жесткости в результате: а – неплотного опирания пролетного строения на опорные части; б – слабых или развернутых лапчатых болтов

Статистически значимого влияния грузонапряженности участка на продолжительность эксплуатации конструкции до образования усталостных трещин не было установлено, но было выявлено сильное влияние этого фактора на количество трещин в пролетном строении (рисунок 7). Статистически было подтверждено, что развитию трещин значительной длины (более 50 мм) способствует наличие зазоров более 1 мм между вертикальным ребром жесткости и верхним поясом.

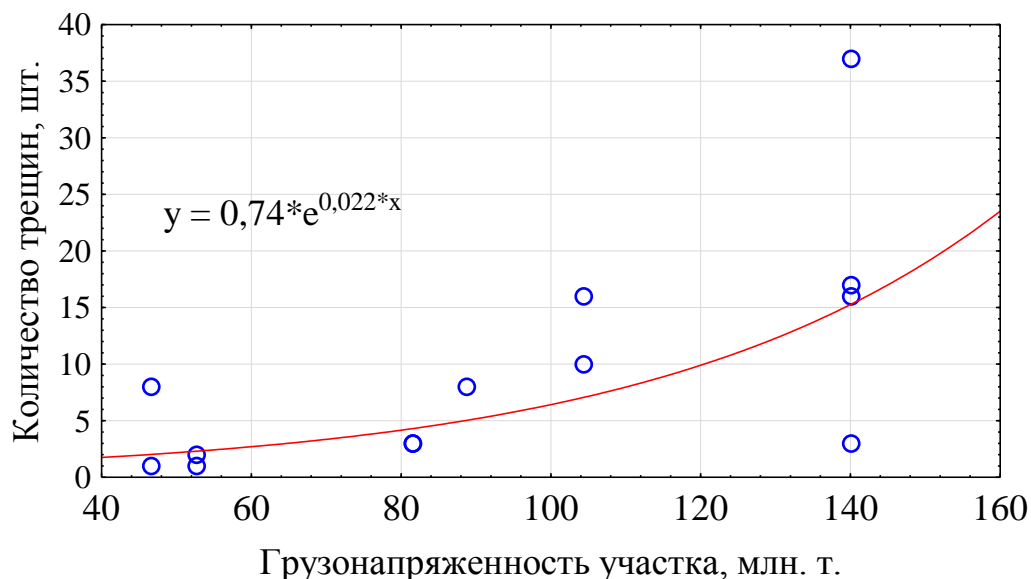


Рисунок 7 – Зависимость количества трещин в пролетном строении от грузонапряженности участка

Измерения деформаций в стенках балок около обрывов сварных швов вертикальных ребер жесткости были проведены в соответствии с разработанной программой испытаний пролетных строений под обращающейся нагрузкой. Для проведения непосредственных измерений деформаций были использованы съемные датчики тензометрического комплекса «Тензор-МС», разработанного сотрудниками СибНИИ мостов СГУПС. Тензометрические датчики

устанавливали перпендикулярно наиболее вероятному направлению развития трещин на расстоянии 20 мм от ребра жесткости (рисунок 8). В процессе испытаний сплошностенчатых пролетных строений измерения фактических деформаций производили у всех вертикальных ребер жесткости в верхней части обеих главных балок. При испытаниях решетчатых пролетных строений измерения фактических деформаций производили в первой панели у вертикальных ребер жесткости в верхней и нижней частях обеих продольных балок проезжей части.

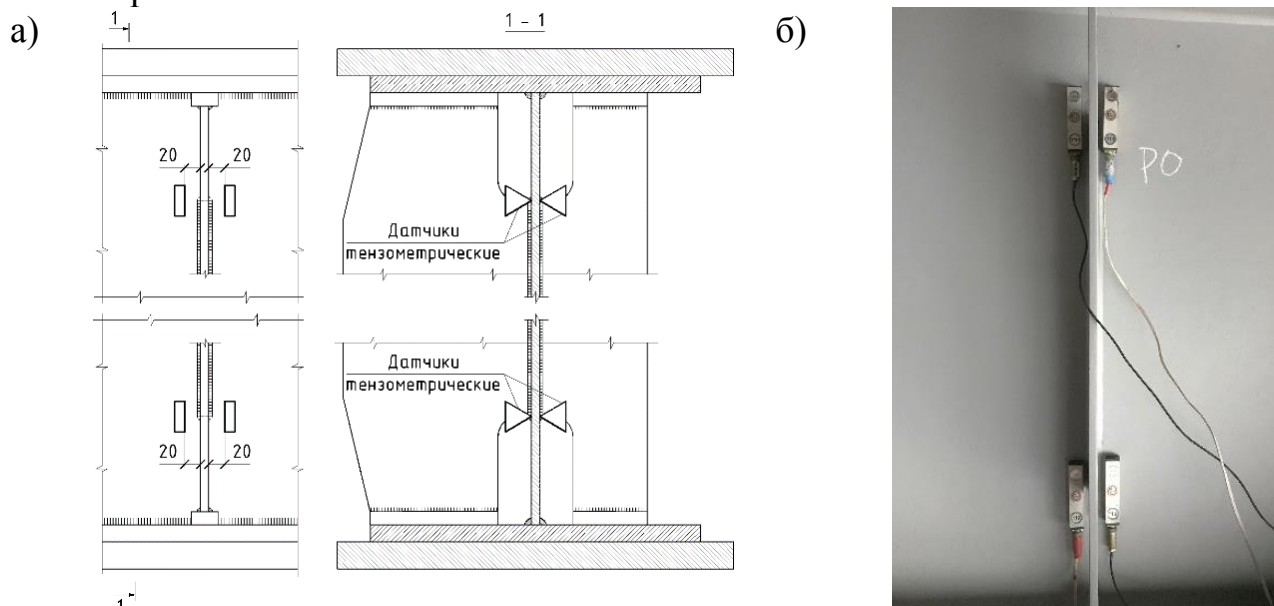


Рисунок 8 – Расположение тензометрических датчиков на стенке балки:
а – схема; б – фотография

Результаты измерений показали, что от прохода подвижного состава стенки главных балок сплошностенчатых пролетных строений с ездой поверху и продольных балок решетчатых пролетных строений с ездой понизу испытывают поперечный изгиб на длине «выкружки» ребер жесткости. При этом характер изгиба стенок балок зависит от типа мостового полотна: при движении по безбалластным плитам происходят поперечные синхронные колебания верхних поясов; при движении по мостовым брускам происходит синхронный поворот поясов во внутрь. Максимальные напряжения достигают 20,0 МПа с исправными сварными швами и минимальным зазором между торцом ребра жесткости и верхним поясом. При наличии зазора величиной около 1 мм максимальные напряжения могут достигать 60,0 МПа. Фрагменты тензограмм в стенке продольной балки около вертикального ребра жесткости показаны на рисунке 9.

При проходе подвижного состава по сплошностенчатым пролетным строениям с ездой понизу стенки главных балок около верхнего обрыва сварного шва вертикальных ребер жесткости испытывают деформации растяжения. При исправном сварном соединении максимальные напряжения достигают 15,0 МПа, при наличии неисправностей напряжения в стенке балки могут увеличиваться в два раза. Тензограмма в стенке главной балки около верхнего конца сварного шва вертикального ребра жесткости сплошностенчатого пролетного строения с ездой понизу показана на рисунке 10.

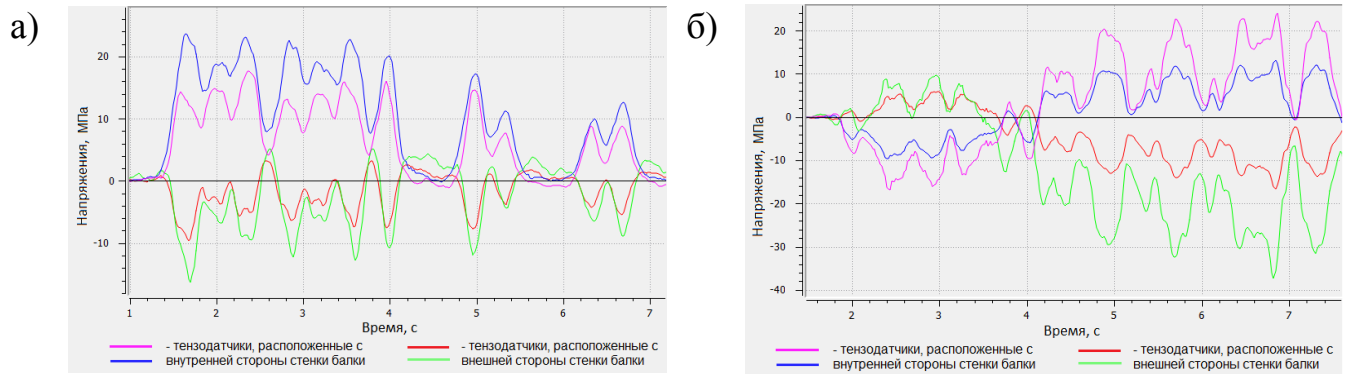


Рисунок 9 – Фрагменты тензограмм в стенке продольной балки около вертикального ребра жесткости:

а – у верхнего конца сварного шва; б – у нижнего конца сварного шва

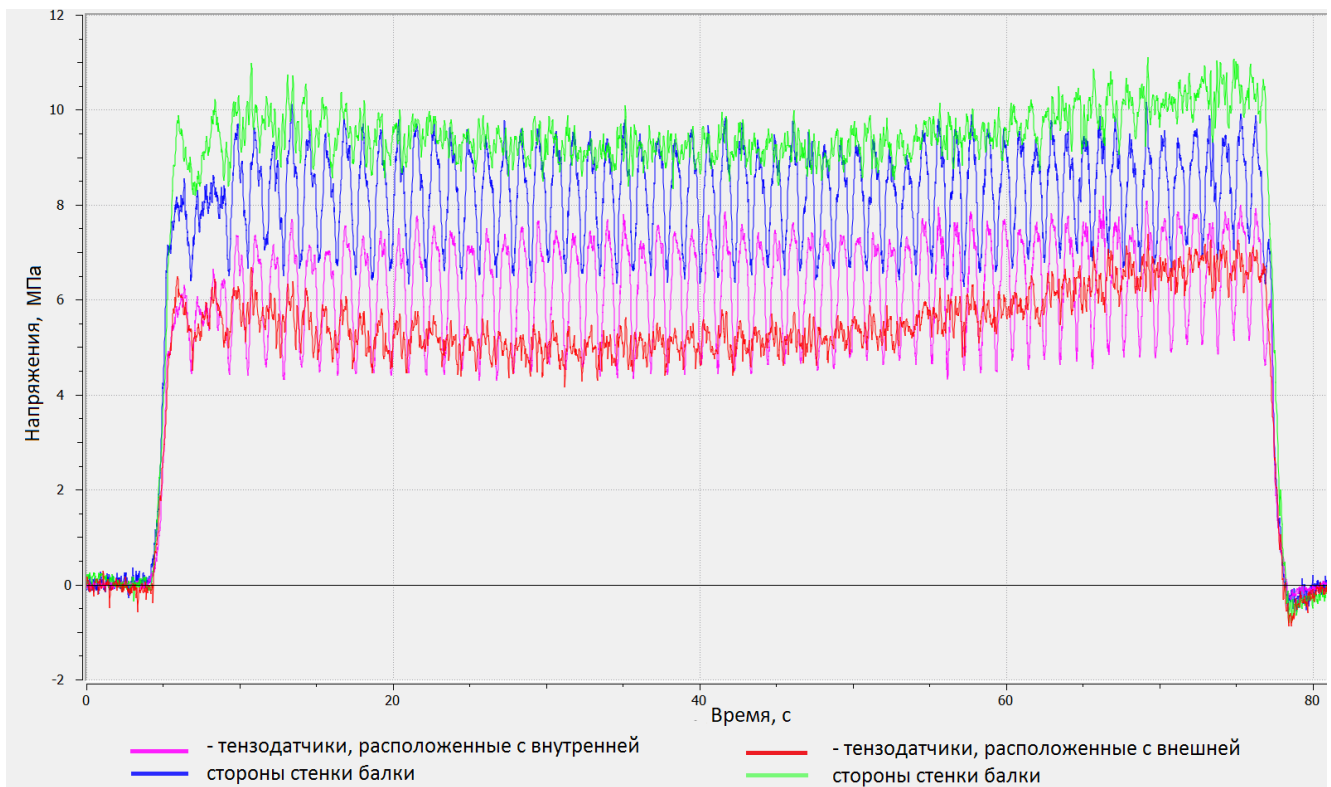


Рисунок 10 – Тензограмма в стенке главной балки около верхнего конца сварного шва вертикального ребра жесткости сплошностенчатого пролетного строения с ездой понизу

Спектральный анализ колебаний стенок главных и продольных балок показал, что стенки балок испытывают поличастотный характер нагружения. Наиболее значительные по мощности компоненты находятся в диапазоне частот 0,5-5,2 Гц и связаны с собственными колебаниями конструкции, пульсацией статических прогибов и влиянием подвижного состава. При этом схематизация циклов изменения напряжений от прохода подвижного состава по методу «падающего дождя» показала, что наиболее часто в стенках балок действуют циклы напряжений с коэффициентом асимметрии от -0,3 до +0,3.

Численное моделирование работы стенок балок при проходе подвижной нагрузки подтвердило результаты непосредственных измерений деформаций стенок балок под обращающейся нагрузкой. Увеличение зазора между торцом

ребра жесткости и верхним поясом до 0,5 мм приводит к увеличению напряжений в 2 раза по сравнению с плотно приторцованными ребрами жесткости (рисунок 11).

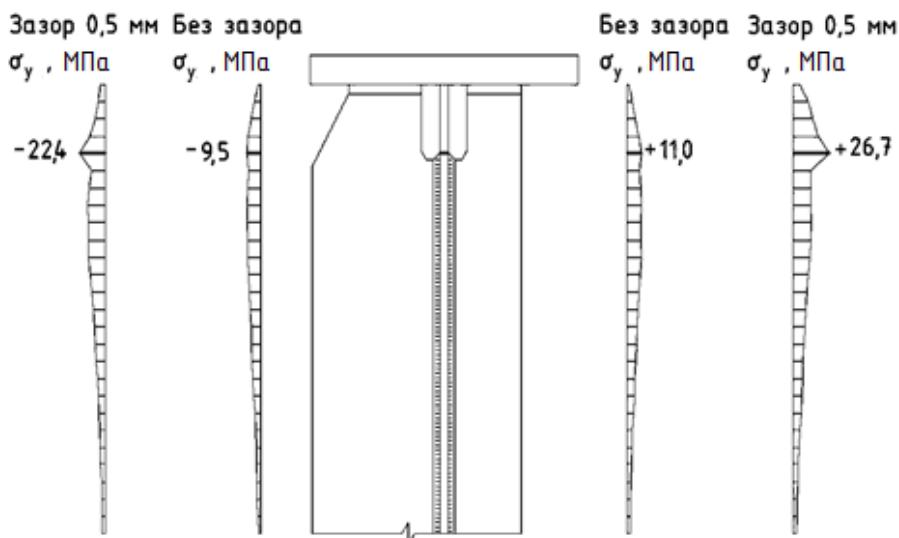


Рисунок 11 – Изменение напряжений по высоте балки на расстоянии 20 мм от ребра жесткости

По результатам проведенных натурных обследований и испытаний болто-сварных пролетных строений были уточнены условия эксплуатации и содержания искусственных сооружений, влияющие на трещинообразование, особенности работы стенок балок около обрывов сварных швов вертикальных ребер жесткости и характеристики циклов напряжений (максимальные напряжения, коэффициенты асимметрии) при воздействии подвижной нагрузки.

В третьей главе представлены результаты экспериментально-теоретических исследований долговечности сварных соединений при действии циклически изменяющегося изгибающего момента. В 2019-2020 г.г. в лаборатории СибНИИ мостов СГУПС были проведены испытания на усталость 42 металлических образцов со сварными ребрами жесткости. Отличительной особенностью исследований было испытание большого количества сварных образцов, находящихся в напряженно-деформированном состоянии аналогичном сварным соединениям вертикальных ребер жесткости реальных конструкций. Конструкция лабораторного образца была аналогична конструкции сварного соединения вертикальных ребер жесткости со стенкой балок (рисунок 12). В качестве материала применена сталь 15ХСНД обычного исполнения.

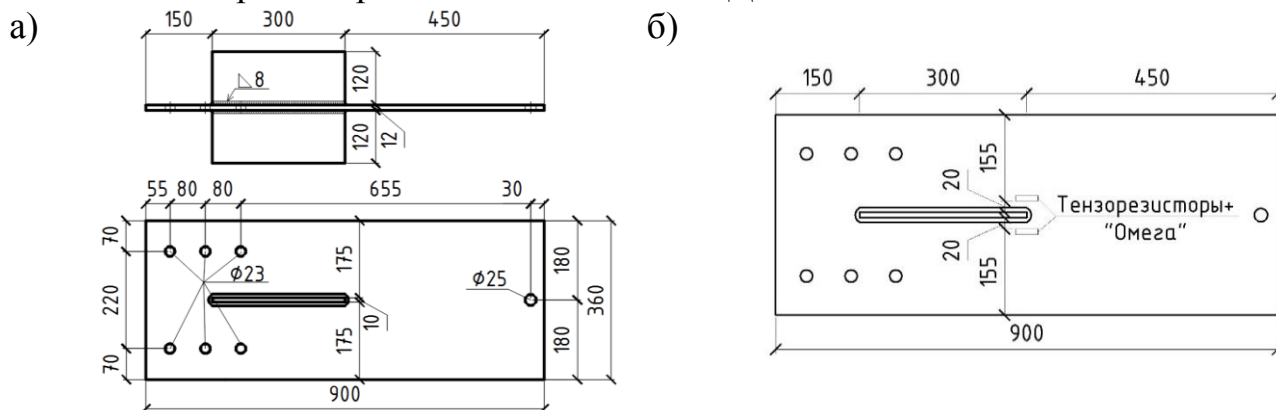


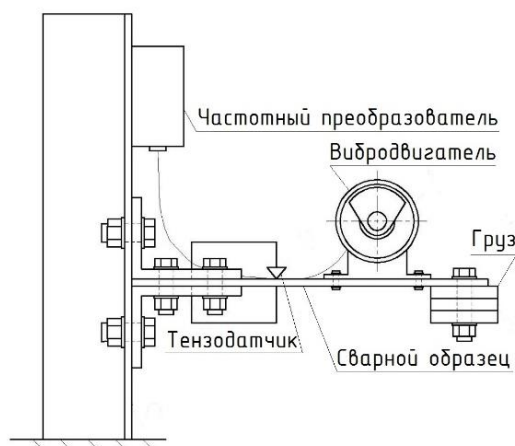
Рисунок 12 – Лабораторный сварной образец:

а – эскиз; б – расположение датчиков около сварного шва

Необходимость проведения такого эксперимента обусловлена исследованием долговечности сварных соединений при действии изгибающего момента и получением экспериментальных данных для уточнения метода оценки усталостной долговечности сварных соединений пролетных строений железнодорожных мостов.

Для создания, изменяющихся по гармоническому закону, изгибных деформаций горизонтального листа использовали вибродвигатель, прикрепленный к свободному концу консольно закрепленного образца. Величину средних напряжений цикла задавали грузом, подвешенным к свободному концу образца. Амплитуду колебаний изменяли при помощи частотного преобразователя, подключенного к вибродвигателю, а ее величину контролировали при помощи тензодатчика, установленного на верхней поверхности листа на расстоянии 20 мм от ребра жесткости с двух сторон перпендикулярно вероятному направлению развития усталостных трещин. Схема и фотография установки для испытаний приведены на рисунке 13.

а)



б)



Рисунок 13 – Установка для усталостных испытаний образцов при изгибе:
а – схема; б – фотография

На основании результатов исследования фактической напряженности сварных соединений под обращающейся нагрузкой в рамках лабораторного исследования были проведены испытания образцов в диапазоне максимальных локальных напряжений цикла (σ_{max}) от 30,0 до 110,0 МПа при трех коэффициентах асимметрии цикла (ρ): -0,3, 0, +0,3. Для построения кривой усталости при одном коэффициенте асимметрии цикла использовали не менее трех значений максимальных напряжений, а на каждом уровне максимальных напряжений цикла испытывали 1 до 5 образцов в зависимости от разброса значений долговечности. Испытания проводили на базе 4 млн. циклов. В качестве критерия разрушения образца было принято образование усталостной трещины величиной 3 мм в основном металле. Момент образования трещины и дальнейшее изменение напряженно-деформированного состояния трещины фиксировали по показаниям тензометрических датчиков, размер трещины определяли при помощи метода капиллярной дефектоскопии.

Результаты испытаний были аппроксимированы степенными уравнениями с высокой степенью достоверности (рисунок 14). Уравнение долговечности сварного соединения, работающего на изгиб, в зависимости от максимальных номинальных напряжений цикла, коэффициента асимметрии цикла и вероятности безотказной работы соединения было выражено следующей формулой:

$$N = \left(\frac{C}{(\sigma_{max} + z_p S_\rho)(1 - \rho)} \right)^m, \quad (1)$$

где C, m – эмпирические коэффициенты кривой усталости, $C = 550, m = 3,83$;

σ_{max} – максимальные номинальные напряжения цикла, МПа;

z_p – квантиль нормального отклонения распределения для вероятности P ;

S_ρ – среднеквадратическое отклонение предела выносливости, МПа;

ρ – коэффициент асимметрии цикла.

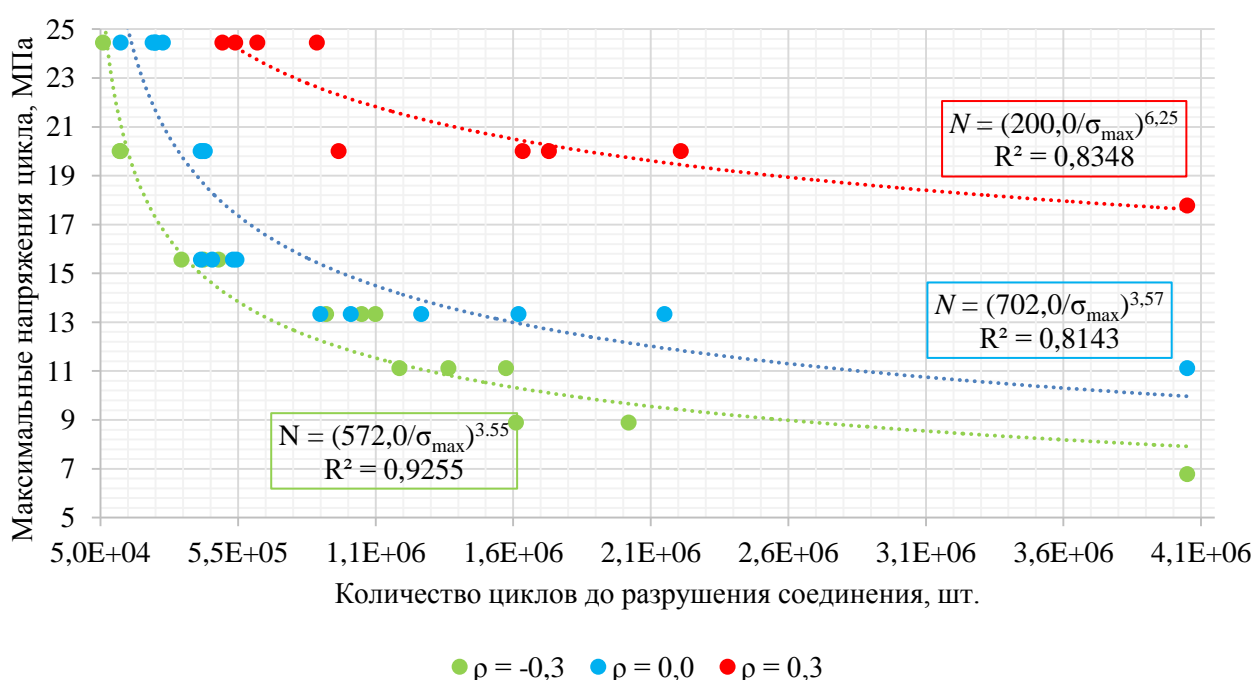


Рисунок 14 – Кривые усталости, полученные в результате испытания сварных соединений при действии изгибающего момента

Приведенные кривые усталости отражают зависимость количества циклов до образования трещины от максимальных номинальных напряжений с вероятностью 0,50. Пределы выносливости в зависимости от коэффициента асимметрии цикла получены равными: $\sigma_{0,3} = 19,0$ МПа, $\sigma_0 = 12,0$ МПа, $\sigma_{-0,3} = 8,0$ МПа. Сравнение кривых усталости, полученных при разных схемах нагружения образцов, показывает, что долговечность лабораторных образцов при испытаниях на изгиб ниже в 6 раз по сравнению с долговечностью образцов, испытываемых при растяжении-сжатии.

Для уточнения действующих напряжений в сварном образце была создана объемная конечно-элементная модель в программном комплексе для термических расчетов – Sysweld, позволяющем смоделировать процесс приварки ребер жесткости и определить поля остаточных сварочных напряжений. В программе моделировали приварку двух ребер жесткости четырьмя сварными швами при

помощи MIG сварки. Формирование сварного шва осуществляли за один проход теплового источника. Воздействие теплового источника имитировали при помощи модели двойного эллипсоида Голдака. В результате было установлено, что по границе сплавления шва с основным металлом действуют растягивающие сварочные напряжения, достигающие 300,0 МПа, постепенно переходящие в сжимающие при удалении от границы сплавления. Разработан алгоритм определения напряжений в конечно-элементной модели сварного элемента на основании объединения результатов термомеханических расчетов при моделировании сварочного процесса и результатов механических расчетов при моделировании воздействия внешних нагрузок в различных программных комплексах.

Кроме того, в рамках лабораторных испытаний была определена фактическая скорость роста трещин в диапазоне размаха локальных напряжений цикла от 60,0 до 110, МПа и в диапазоне длин трещин от 2 до 27 мм. Подтверждено наличие зависимости между скоростью роста трещины и ее длиной, в соответствии с формулой Пэриса-Эрдогана:

$$\frac{dl}{dN} = B(\Delta\sigma\sqrt{\pi l}f)^d, \quad (2)$$

где l – длина трещины, мм;

N – количество циклов;

$\Delta\sigma$ – размах напряжений в цикле, МПа;

B, d, f – коэффициенты, зависящие от геометрии образца, свойств материала и условий испытания.

Получено уравнение для определения среднего количества циклов, необходимых для приращения усталостной трещины на 1 мм, в зависимости от величины размаха напряжений:

$$N = \left(\frac{4348,0}{\Delta\sigma}\right)^{2,63}. \quad (3)$$

В четвертой главе представлен уточненный метод оценки усталостной долговечности сварных соединений пролетных строений железнодорожных мостов. В целом, оценка сводится к определению расчетного ресурса и наработки сварных соединений при заданной вероятности безотказной работы, а условие обеспечения долговечности можно представить в виде неравенства:

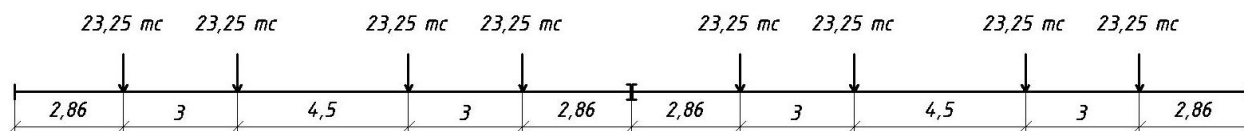
$$N_n \leq N_p, \quad (4)$$

где N_n – наработка соединения за период эксплуатации сооружения;

N_p – расчетный ресурс соединения или наработка до отказа.

Мерой усталостного ресурса и наработки соединений железнодорожных мостов служит накопленное повреждение, вызываемое воздействием эталонного поезда. В качестве эталонного поезда принят набор подвижных единиц, состоящих из локомотива ВЛ-80 и полногрузных четырехосных вагонов, общей длиной состава 750 м. Подвижные единицы, составляющие эталонный поезд, были выбраны из-за того, что они обладают достаточной осевой нагрузкой для усталостного воздействия и высокой распространенностью на сети железных дорог. Схемы подвижных единиц эталонного поезда приведены на рисунке 15.

Две секции электровоза В/1 80



четырёхосный вагон

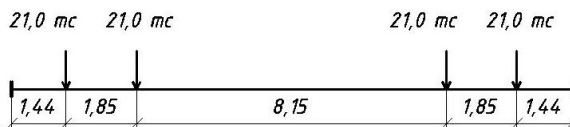


Рисунок 15 – Схемы подвижных единиц эталонного поезда

Ресурс соединения определяют по формуле:

$$N_p = \frac{1}{v_3}. \quad (5)$$

Накопленное повреждение от совокупности циклов изменения напряжений при проходе эталонного поезда (v_3) определяют на основании гипотезы линейного суммирования накопленных усталостных повреждений по формуле Пальмгрена-Майнера (6). Допускаемое количество циклов нагружения (N_k) при заданной вероятности безотказной работы (P) в зависимости от величины действующих напряжений вычисляют по формуле (1). Для определения допускаемого количества циклов нагружения каждого соединения используют характерную кривую усталости, соответствующую материалу и напряженному состоянию конструкции.

$$v = \sum_k \frac{n_k}{N_k}, \quad (6)$$

где k – индекс уровня максимальных напряжений цикла σ_j ;

n_k – число циклов данного уровня;

N_k – предельное число циклов до разрушения, принимаемое по усталостным кривым (диаграммам Вёлера).

В зависимости от конструктивно-технологических особенностей сварных соединений пролетных строений для расчета усталостного ресурса применяют различные кривые усталости. Характеристики кривых усталости сварных соединений получены из существующей методики и по результатам лабораторных испытаний. В таблице 1 приведено описание сварных соединений, соответствующих кривых усталости и их характеристики. На рисунке 16 приведены кривые усталости для расчета ресурса сварных соединений. Кривые усталости 1-4 были построены по результатам усталостных испытаний сварных образцов, приведенным в РД 50-694-90. Номера кривых усталости в таблице 1 соответствуют кривым усталости 3а, 4а, 5б, 6а в порядке возрастания номеров. Кривая усталости 5 была построена по результатам лабораторных испытаний сварных образцов при изгибе.

В связи с тем, что для железнодорожных мостов характерно как большое число схем поездных нагрузок, так и их существенная изменчивость в течение срока эксплуатации, для определения наработки сооружения целесообразным

оказывается выражение накопленных усталостных повреждений от обращающихся нагрузок (v_i) через повреждение от эталонного поезда ($v_э$):

$$K_{ni} = \frac{v_i}{v_э}. \quad (7)$$

Таблица 1 – Описание соединений и характеристики кривых усталости

Описание сварного соединения (тип трещины)	Номер кривой усталости	Среднеквадратическое отклонение, МПа	Коэффициенты	
			<i>m</i>	<i>C</i>
Швы сплавления верхнего поясного шва со стенкой балки (Т-13, Т-16, Т-17, Т-18, Т-22, Т-23)	1	24,0	5,65	2305
Швы прикрепления вертикальных ребер жесткости к верхним поясам балок (Т-4, Т-14)	2	20,0	5,00	2709
Швы прикрепления горизонтальных ребер жесткости к вертикальным (Т-6, Т-11)	3	24,0	3,79	4560
Швы прикрепления связей или фасонок (Т-1, Т-2, Т-3, Т-5, Т-7, Т-8)	4	12,0	3,45	5580
Швы прикрепления вертикальных и горизонтальных ребер жесткости к стенке балки (Т-9, Т-10, Т-12, «а», «б», «в»)	5	4,3	3,83	550

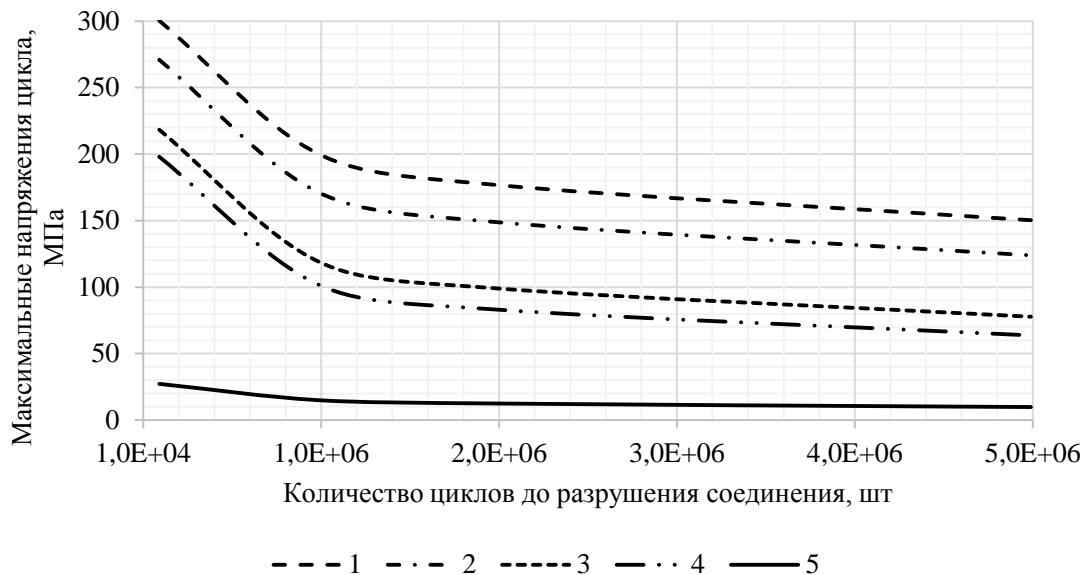


Рисунок 16 – Кривые усталости для расчета ресурса сварных соединений

Для определения коэффициента наработки за определенный период производится математическое моделирование потока подвижных нагрузок на основе данных, содержащихся в годовых отчетностях дорог. Формирование поездных нагрузок производится на основе информации о количестве, типе и загрузке вагонов, роде груза в вагоне, среднем весе поездов, типах локомотивов, количестве груженых и порожних поездов, прошедших за год. В результате

анализа парка вагонов, локомотивов и структуры грузопотока происходит моделирование поездопотока на основе метода Монте-Карло.

Для определения наработки вся история эксплуатации сооружения разбивается на несколько периодов, каждый из которых характеризуется числом прошедших поездов и соответствующими коэффициентами наработки. Общую величину наработки за весь срок эксплуатации моста определяют по формуле:

$$N_{\text{н}} = \sum_{i,j} N_{\text{п}i,j} K_{\text{н}i,j}, \quad (8)$$

где $N_{\text{п}i,j}$ – количество i -х нагрузок, прошедших за j -й период по участку дороги;

$K_{\text{н}i,j}$ – коэффициент наработки соединения от прохода i -й нагрузки за j -й период эксплуатации сооружения.

Оценка остаточного ресурса определяется вероятностью безотказной работы сварного соединения, при которой расчетный ресурс больше фактической наработки. Таким образом, чем больше наработка соединения, тем ниже вероятность безотказной работы и хуже оценка остаточного ресурса. В таблице 2 указаны состояния сооружения и соответствующие интервалы вероятности безотказной работы, принятые на основе рекомендаций Инструкции по оценке состояния и содержания искусственных сооружений ОАО «РЖД». Для обработки большого количества исходных данных, возможности моделирования поездопотока, расчета наработки и усталостного ресурса применяется программа «Арго-Ресурс».

Таблица 2 – Классификация состояний сварного соединения

Состояние	Оценка и характеристика ресурса сварного соединения	Вероятность безотказной работы / квантиль
S_0	<i>Отличное</i> Неограниченный запас усталостного ресурса соединения	$\geq 0,9995$ / $\geq 3,3$
S_1	<i>Хорошее</i> Большой запас усталостного ресурса соединения	0,9995... 0,9970 / 3,3...2,7
S_2	<i>Удовлетворительное</i> Низкий запас усталостного ресурса соединения. Необходимо тщательное наблюдение за соединением	0,997... 0,98 / 2,7...2
S_3	<i>Неудовлетворительное</i> Низкий запас усталостного ресурса соединения. Необходима точная оценка усталостного ресурса	0,98... 0,95 / 2...1,5
S_4	<i>Предотказное</i> Высокая вероятность образования усталостной трещины.	0,95... 0,90 / 1,5...1,3
S_5	<i>Отказ</i> Образование трещины. Необходимо усиление.	$< 0,9$ / $< 1,3$

Расчет экономического эффекта от внедрения результатов исследований выполнен на основании обоснованного исключения работ по осмотру сварных соединений при обследовании пролетных строений. Экономическая эффективность от применения метода оценки долговечности сварных соединений может составить от 80 до 180 тыс. руб. в год (в зависимости от длины пролетного строения) на содержание одного пролетного строения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований была достигнута цель и получены следующие основные научные выводы.

1. Проведенные натурные испытания болто-сварных железнодорожных пролетных строений под обращающейся нагрузкой позволили определить зависимость деформирования стенок балок около вертикальных ребер жесткости от типа мостового полотна, уровня езды и плотности опирания верхнего пояса на ребра жесткости. Было установлено, что стенка балки около обрыва сварного шва вертикального ребра жесткости испытывает поперечный изгиб (при езде по верхнему поясу балок) или растяжение (при езде по нижнему поясу балок). При этом величина максимальных напряжений может находиться в диапазоне 15,0-60,0 МПа в зависимости от величины зазора между верхним поясом и ребром жесткости, а коэффициенты асимметрии цикла изменяться от -0,3 до +0,3.

2. В результате лабораторных испытаний 42 сварных образцов на усталость при действии изгибающего момента были получены три кривые усталости сварных крестообразных соединений в диапазоне максимальных напряжений цикла от 30,0 до 110,0 МПа при трех коэффициентах асимметрии цикла: -0,3, 0, +0,3. Кроме того, была определена скорость роста усталостных трещин в сварных образцах в диапазоне размаха напряжений цикла от 60,0 до 110,0 МПа и в диапазоне длин трещин от 2 до 27 мм.

3. На основании натурных и лабораторных испытаний предложен вероятностный метод оценки усталостной долговечности сварных соединений в болто-сварных пролетных строениях, использующий характерные кривые усталости, меру расчетного ресурса и наработки в виде железнодорожной нагрузки, достоверный алгоритм формирования поездопотока.

Перспективой дальнейших исследований является разработка метода оценки усталостной долговечности автодорожных и железнодорожных пролетных строений на стадии распространения трещины и влияния ее на несущую способность конструкций.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

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

1. Бокарев, С. А. Обеспечение пропуска тяжеловесных поездов по металлическим мостам / С. А. Бокарев, К. О. Жунев, А. М. Усольцев // Путь и путевое хозяйство. – 2019. – №4. – С. 26-28. (0,33 п. л. / 0,22 п. л.).
2. Жунев, К. О. Исследование усталостной долговечности сварных соединений железнодорожных пролетных строений / К. О. Жунев, Ю. Н. Мурованный, А. Н. Яшнов // Транспортные сооружения. – 2020. – №2. – С. 1-4. (0,45 п. л. / 0,30 п. л.).

3. Жунев, К. О. Параметры проведения лабораторных исследований для построения кривых усталости сварных соединений / К. О. Жунев // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2020. – №3. – С. 58-65. (0,52 п. л. / 0,52 п. л.).

4. Ефимов, С. В. Моделирование динамического взаимодействия подвижного состава и железнодорожных мостов / С. В. Ефимов, К. О. Жунев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2020. – № 6. – С. 154–166. (0,50 п. л. / 0,33 п. л.).

Патент на изобретение и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ

5. Пат. 2730555 Российская Федерация, МПК G01M 7/02, G01N 3/32. Установка для механических испытаний образцов листовых материалов на усталость при изгибе / С. А. Бокарев, К. О. Жунев, Л. Ю. Соловьев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО СГУПС. - № 2019143048; заявл. 29.08.2019; опубл. 24.08.2020, Бюл. № 24 – 1 с. (0,11 п. л. / 0,03 п. л.).

6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020611010. Арго-Ресурс / К. О. Жунев, Ю. Н. Мурованный; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО СГУПС. – № 2019667828; заявл. 31.12.2019; опубл. 23.01.2020, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с. (0,11 п. л. / 0,06 п. л.).

Публикация в издании, входящем в международную базу данных Scopus

7. 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. – Vol. 8. – Pp. 119-129. (0,88 п. л. / 0,59 п. л.).

Публикации в журналах, научных сборниках и других научных изданиях

8. Бокарев, С. А. Особенности и перспективы оценки остаточного ресурса сварных металлических пролетных строений железнодорожных мостов / С. А. Бокарев, К. О. Жунев // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2017. – №40. – С. 30-35. (0,48 п. л. / 0,24 п. л.).

9. Жунев, К. О. Статистический анализ факторов трещинообразования в сварных пролетных строениях / К. О. Жунев // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: сборник материалов VIII междунар. науч.-техн. конф. – Иркутск, 2017. – Т. 1. – С. 455-460. (0,25 п. л. / 0,25 п. л.).

10. Жунев, К. О. Сравнительный анализ методов расчета усталостного ресурса сварных соединений / К. О. Жунев // Инновационные факторы развития транспорта. Теория и практика: сборник материалов междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск, 2018. – Т. 1. – С. 152-158. (0,30 п. л. / 0,30 п. л.).

11. Жунев, К. О. Обследование трещиноподобных узлов в болто-сварных пролетных строениях / К. О. Жунев // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: сборник материалов IX науч.-практ. конф. – СПб., 2018. – С. 62-70. (0,30 п. л. / 0,30 п. л.).

12. Жунев, К. О. Динамическое воздействие подвижной нагрузки на сварные пролетные строения / К. О. Жунев // Наука и практика в решении

стратегических и тактических задач устойчивого развития России: сб. науч. ст. науч.-практ. конф. – СПб, 2019. – С. 9-12. (0,25 п. л. / 0,25 п. л.).

13. Бокарев, С. А. Методы расчета долговечности сварных соединений / С. А. Бокарев, К.О. Жунев // Транспорт: наука, образование, производство: сб. науч. ст. междунар. науч.-практ. конф. – Ростов-на-Дону, 2019. – С. 280-283. (0,25 п. л. / 0,13 п. л.).

14. Жунев, К. О. Методика оценки усталостного ресурса сварных соединений железнодорожных пролетных строений / К. О. Жунев // Мосты и туннели: теория, достижения, практика: сб. тр. научн.-практ. конф. – Днепр: Издательство ДНУЖТ, 2020. – С. 67-75. (0,52 п. л. / 0,52 п. л.).

Жунев Кирилл Олегович

**УСТАЛОСТНАЯ ДОЛГОВЕЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РЕБЕР
ЖЕСТКОСТИ В ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЯХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ
МОСТОВ**

Специальность 2.1.8 – «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей»
(технические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать «23» сентября 2021 г.

Печ. л 1,0. Тираж 120 экз. Заказ №

Издательство ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет путей сообщения»
630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191. Тел. (383) 328-03-81. e-mail: bv@mail.ru
