

*На правах рукописи*



**БЕХЕР СЕРГЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ**

**МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПРИ РЕМОНТЕ И В ЭКСПЛУАТАЦИИ НА  
ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕНЗОМЕТРИИ И  
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения».

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
**Степанова Людмила Николаевна**

Официальные оппоненты: **Ахтулов Алексей Леонидович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения», профессор кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство»

**Панин Сергей Викторович**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики прочности и материаловедения» Сибирского отделения Российской академии наук (ИФПМ СО РАН), заместитель директора по научной работе, заведующий лабораторией

**Смирнов Александр Николаевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева», профессор кафедры «Технологии машиностроения»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения»

Защита состоится «03» октября 2017 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: Россия, 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (Россия, 634034, г. Томск, ул. Белинского 53а) и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>.

Автореферат разослан «    » мая 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук



Васендина  
Елена  
Александровна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Повышение эффективности железнодорожного транспорта требует увеличения скорости движения и разрешенной максимальной осевой нагрузки. Обеспечение безопасности при этом остается приоритетным направлением научно-технического развития, а предотвращение отказов технических средств является ключевой проблемой, без своевременного решения которой невозможно дальнейшее развитие железнодорожной отрасли.

С 2000 г. количество случаев разрушения неподрессоренных ходовых частей вагонов в грузовых поездах выросло в 5–10 раз. Безотказная работа подвижного состава может быть обеспечена только за счет применения комплексного подхода. В процессе изготовления и ремонта детали и узлы подвижного состава подлежат неразрушающему контролю, а в эксплуатации – мониторингу технического состояния. На вагоноремонтных предприятиях ответственные детали и узлы контролируются магнитопорошковым, вихретоковым и ультразвуковым методами, после остановки поезда на пунктах технического обслуживания проводится визуальный контроль. Большинство операций неразрушающего контроля не автоматизировано, а достоверность результатов зависит от психофизиологического состояния дефектоскописта и осмотрщика вагонов.

Основой для совершенствования системы неразрушающего контроля ходовых частей вагонов является создание автоматизированных систем и комплексов, позволяющих обнаруживать дефекты и оценивать их степень опасности, в том числе, в движении. При повышении нагруженности объектов железнодорожного транспорта активные методы контроля требуют уточнения критериев браковки. В этих условиях перспективно использовать пассивные методы: акустико-эмиссионный и тензометрический, так как их диагностические сигналы содержат информацию о динамике развития дефекта. Совершенствование пассивных методов контроля для непосредственной оценки негативного воздействия дефектов на ходовые части вагонов при ремонте и в эксплуатации направлено на решение актуальной проблемы повышения безопасности движения железнодорожного транспорта.

**Степень разработанности темы исследования.** Значительный вклад в развитие пассивного метода контроля, основанного на использовании явления акустической эмиссии, внесли: А.Е. Андрейкив, В.М. Баранов, Г.А. Бигус, В.С. Бойко, С.И. Буйло, К.Б. Вакар, В.А. Грешников, А.Т. Green, Н.Л. Dunegan, Ю.Б. Дробот, В.И. Иванов, J. Kaiser, Р. Коллакот, О.Г. Латышев, Н.В. Лысак,

В.А. Плотников, А. Поллок, Н.Г. Томилин, А.С. Трипалин, Н.А. Семашко, В.Н. Schofield, Л.Н. Степанова, В.В. Муравьев, В.А. Стрельченко, В.А. Стрижало, Т.Б. Петерсон, Х. Хатано, Н. Yokomichi, В.Н. Федюкин, В.М. Бобренко, А.А. Пятницкий.

Метод тензометрии получил развитие в работах таких авторов, как В.Г. Аляпышев, М.Л. Дайчик, В.С. Шадрин, Р.А. Макаров, А.Н. Серьезнов, В.В. Хиценко, В.Л. Бурнштейн, П.Н. Бутин, Б.А. Атакулов. Существенный вклад в исследования динамики взаимодействия колес и рельсов внесли: А.Я. Коган, М.Ф. Вериго, А.К. Шафрановский, А.Е. Балановский, Н.Н. Кудрявцев, С.В. Вершинский, Л.В. Кудюров.

В настоящее время накоплен опыт практической реализации методов пассивного контроля ответственных объектов, в том числе деталей подвижного состава. Вместе с тем, существующие стандартные методики определения параметров сигналов акустической эмиссии не обеспечивают необходимый уровень достоверной фильтрации и локации в деталях сложной формы с необработанной поверхностью и литой неоднородной структурой материала, а также объектов с размерами 100 – 200 мм. Закономерности акустической эмиссии в сталях ШХ4, 20ФЛ, ОС, которые применяются при изготовлении деталей подвижного состава, исследованы недостаточно и не обеспечивают необходимый уровень достоверности критериев обнаружения развивающихся усталостных трещин в условиях значительного количества механических источников помех, связанных с взаимодействием захватов нагружающего устройства с объектом контроля, растрескиванием остатков литой формы, трением в сопряжениях колес и осей.

Приращение надежности ходовых частей вагонов после проведения акустико-эмиссионного контроля возможно только при условии, что силы в эксплуатации не превышают 80–90 % испытательной силы. Для обеспечения достоверности результатов акустико-эмиссионного контроля деталей вагонов при ремонте необходимы технологии мониторинга сил, воздействующих на неподдресоренные ходовые части вагонов в движении. Методики динамического контроля должны применяться в реальных условиях эксплуатации без изменения конструкции пути и должны быть согласованы с технологиями акустико-эмиссионного контроля при ремонте.

Отечественными авторами разработаны методики испытаний подвижного состава для определения параметров его динамического воздействия на путь с использованием динамометрии и тензометрии. Существующие разработки ориентированы на контроль сил в системе «колесо – рельс» в процессе

испытаний и пока не получили распространения для решения задачи мониторинга подвижного состава на железных дорогах РФ. За рубежом широко применяются комплексы диагностики, предназначенные для контроля технического состояния подвижного состава и оценки его влияния на верхнее строение пути. Способы контроля и критерии браковки, реализованные в этих комплексах, оптимизированы для пути и подвижного состава определенного типа и не могут быть распространены на отечественных железных дорогах. Для решения этой задачи необходимы дополнительные исследования, направленные на оптимизацию схем установки тензодатчиков, создание алгоритмов обработки тензометрических сигналов, метрологическое обеспечение методик и оборудования для измерения динамических сил, проведение натурных испытаний.

**Цель исследования** – увеличение безопасности железнодорожного транспорта, связанное с повышением надежности и достоверности результатов неразрушающего контроля ответственных динамически нагруженных неподрессоренных ходовых частей вагонов (оси колесных пар, кольца буксовых подшипников, боковые рамы), за счет комплексного применения автоматизированных методов контроля: акустико-эмиссионного при плановых видах ремонта и тензометрического контроля динамических сил в эксплуатации.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**:

1) разработать методику оценки «устойчивости» параметров сигналов к влиянию мешающих факторов и создать алгоритмы обработки сигналов акустической эмиссии для повышения достоверности акустико-эмиссионного контроля ходовых частей вагонов;

2) исследовать статистические закономерности акустической эмиссии в процессе развития усталостных трещин и пластической деформации в реальных объектах и образцах из материалов ходовых частей вагонов (стали ШХ4, 20ФЛ, ОС) для создания надежных критериев браковки;

3) определить закономерности деформирования рельсов под поездной динамической нагрузкой и разработать методики измерения динамических сил в системе «колесо – рельс» для уменьшения влияния мешающих факторов, связанных с конструкцией и состоянием подрельсового основания, траекторией движения колеса по рельсу;

4) исследовать динамические характеристики системы «колесо – рельс – подрельсовое основание» и разработать комплекс информативных параметров тензометрических сигналов для оценки динамических сил воздействия колес с

дефектами поверхности катания на рельсы и методику тензометрического контроля в эксплуатации;

5) разработать методики акустико-эмиссионного контроля, согласованные по нагрузкам с результатами тензометрического контроля, осей колесных пар, боковых рам и колец буксовых подшипников для обнаружения усталостных дефектов при ремонте.

**Идея работы** заключается в комплексном использовании двух методов неразрушающего контроля, при котором тензометрия применяется для обнаружения дефектов, вызывающих сверхнормативное воздействие на путь, и для определения уровня динамических сил, воздействующих на ходовые части вагонов в эксплуатации, а метод акустической эмиссии – для обнаружения развивающихся дефектов при испытаниях деталей в вагонных ремонтных депо, причем, параметры нагружения основываются на результатах тензометрического контроля в эксплуатации.

**Объект исследования** – ходовые части железнодорожных грузовых вагонов (колеса, оси, кольца буксовых подшипников, боковые рамы).

**Предмет исследования** – закономерности формирования акустико-эмиссионных и тензометрических диагностических сигналов в процессе испытаний и в реальных условиях эксплуатации ходовых частей грузовых вагонов.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

1) установлено, что многократные отражения и рассеяния сигналов акустической эмиссии в объекте контроля увеличивают до 60 % относительную неопределенность регистрируемых параметров; разработана методика оценки неопределенности, основанная на корреляционном анализе сигналов, регистрируемых двумя преобразователями акустической эмиссии от одного источника, позволяющая экспериментально выбрать и обосновать комплекс информативных параметров, коэффициенты корреляции которых с параметрами источника составляют 0,9 и более;

2) разработан способ определения координат источников сигналов акустической эмиссии, основанный на аналитическом решении задачи определения математического ожидания и среднего квадратического отклонения времени прихода сигнала на преобразователь с использованием двухинтервального коэффициента в модели с линейным передним фронтом и некоррелированным шумом, что обеспечило обнаружение развивающихся дефектов на расстояниях 100–200 мм от источника неинформативных сигналов–помех;

3) экспериментально установлены закономерности изменения потоковых характеристик сигналов акустической эмиссии в процессе развития усталостных трещин и пластической деформации в материале осей колесных пар из стали марки ОС по ГОСТ 4728, в литых деталях тележки грузового вагона из стали 20ГФЛ по ГОСТ 32400, в кольцах буксовых подшипников из стали ШХ4 по ГОСТ 18572. На основе полученных экспериментальных закономерностей разработаны критерии браковки ходовых частей вагонов при ремонте;

4) решена обратная задача определения динамических сил в системе «колесо – рельс» с использованием временных зависимостей деформаций рельса, измеряемых непосредственно над шпалой под движущейся с постоянной скоростью от 20 до 90 км/ч поездной нагрузкой в условиях неопределенности сил реакции подрельсового основания, что позволило разработать способ (патент № 2480711) и алгоритмы обработки первичных сигналов для динамического контроля ходовых частей вагонов в движении;

5) обоснованы комплекс информативных параметров и алгоритмы обработки тензометрических диагностических сигналов на основе разработанной математической модели взаимодействия дефектных колес с верхним строением пути и установлены корреляционные зависимости параметров локальных деформаций рельса в сечениях, расположенных на расстояниях свыше 90 мм от колеса, с характеристиками дефектов поверхности катания;

6) разработан способ акустико-эмиссионного контроля ходовых частей вагонов при ремонте, параметры нагружения которого согласуются с критериями браковки и результатами контроля тензометрическим методом в эксплуатации, что повышает надежность ходовых частей вагонов за счет комплексного подхода: мониторинга динамических сил в движении и выявления развивающихся дефектов при ремонте (патенты № 2537747, 2391656, 2391655).

**Теоретическая значимость работы.** Предложенные корреляционные и аналитические модели параметров сигналов акустической эмиссии в объектах с неоднородной структурой, дисперсией, переотражениями позволили создать алгоритмы обработки сигналов для получения достоверных границ амплитудных и временных информативных параметров, устойчивых к мешающим факторам. Созданные модели и алгоритмы достаточно универсальны и могут послужить основой для построения статистических моделей сигналов акустической эмиссии для повышения достоверности

кластеризации и оценки свойств развивающихся дефектов в различных объектах.

Разработанная двухэлементная модель взаимодействия железнодорожных колес с верхним строением пути позволила проанализировать закономерности деформирования рельса при воздействии колеса с дефектом поверхности. В рамках предложенной модели рассчитаны зависимости амплитудных и временных параметров тензометрических сигналов от размеров дефекта и динамических сил. Реализованный подход может быть распространен на решение задач динамического тензометрирования различных конструкций для оценки параметров динамического воздействия по деформациям, связанным с влиянием граничных условий.

**Практическая значимость работы.** Предложенный способ повышения точности локализации и оценки погрешности координат источников акустической эмиссии защищен патентом и внедрен в программное обеспечение микропроцессорных акустико-эмиссионных диагностических систем СЦАД-16.03 и СЦАД-16.10, изготавливаемых ФГУП СибНИА «им. С.А. Чаплыгина».

Экспериментально определены закономерности изменения потоковых характеристик сигналов акустической эмиссии при развитии усталостных дефектов в материале осей колесных пар, колец подшипников, боковых рам, с использованием которых разработаны и уточнены критерии браковки деталей по степени воздействий на эксплуатационные свойства объектов. Результаты исследований внедрены в 9 акустико-эмиссионных комплексах контроля боковых рам и наддресорных балок вагонных ремонтных депо ОАО «ВРК-1»), в акустико-эмиссионных комплексах контроля осей колесных пар и колец буксовых подшипников грузовых вагонов в ВЧДр Инская, в нагружающих устройствах в Дорожном конструкторско-технологическом депо – структурном подразделении ЗСЖД филиала ОАО «РЖД». Разработанные способы контроля защищены 7 патентами РФ.

Теоретически обоснована и практически реализована методика обнаружения дефектов поверхности катания колесных пар грузовых вагонов в движении с использованием быстродействующей тензометрии рельсов по схеме, не требующей изменения конструкции пути. Способ контроля защищен патентом РФ и внедрен в программное обеспечение тензометрической системы «Динамика-3» (СГУПС), установленной на измерительном участке Западно-Сибирской железной дороги (ООО «ТрансТех»). Методика включает в себя алгоритмы обработки первичных сигналов с тензодатчиков для получения диагностических сигналов путем минимизация влияния мешающих факторов.

Разработанное программное обеспечение защищено свидетельствами о государственной регистрации программ для ЭВМ и используется в тензометрическом диагностическом комплексе для автоматизированного контроля колесных пар в движении на ПТО Инская Западно-Сибирской железной дороги – филиала ОАО «РЖД».

Ценность научной работы – автором разработаны согласованные по уровню силового воздействия методики акустико-эмиссионного и тензометрического контроля ходовых частей вагонов в эксплуатации и при ремонте, позволяющие уменьшить влияние неинформативных составляющих сигналов на результаты контроля и таким образом повысить достоверность результатов контроля.

**Методология и методы исследования.** В работе опирались на методологию системного анализа, основанную на исследовании методов неразрушающего контроля и объекта как взаимосвязанной системы. В процессе исследования использовались методы математического численного моделирования, включающие в себя методы конечных элементов для расчета деформаций и напряжений в ходовых частях вагонов, методы математической статистики: регрессионный анализ, проверка гипотез, точечные и интервальные оценки параметров распределений. Для анализа первичных сигналов применялись методы математического анализа: преобразование Фурье, дифференцирование и интегрирование, фильтрация. В экспериментальных исследованиях использовались разрушающие методы (механические испытания и металлография), виды и методы неразрушающего контроля (ультразвуковой, акустико-эмиссионный, магнитный, вихретоковый, визуально-измерительный), измерения акустических, линейно-угловых, механических и временных величин. При теоретических и экспериментальных исследованиях использовались положения теории упругости, пластичности и разрушения материалов, классической механики, динамики, электроники и электротехники, технической диагностики и неразрушающего контроля.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Методика оценки устойчивости параметров сигналов акустической эмиссии к влиянию многократных рассеяний и переотражений в объектах контроля (кольца буксовых подшипников, боковые рамы) с неоднородной структурой материала и/или имеющих сложную форму, в которых расстояние  $l$  между границами существенно меньше величины, обратной коэффициенту затухания  $\delta$  ( $l \ll \delta^{-1}$ ). Методика основана на корреляционном анализе параметров сигналов на нескольких преобразователях от одного источника и

позволяет выбрать и обосновать комплекс информативных параметров для идентификации развивающихся дефектов.

2. Методика и программное обеспечение для локации источников акустической эмиссии при механическом нагружении объекта контроля, основанные на применении модернизированного двухинтервального коэффициента. Методика обеспечивает обнаружение развивающихся дефектов на фоне акустических помех (до 1000), вызванных воздействием захватов нагружающего устройства на поверхность объекта на расстояниях 100–200 мм от зоны контроля, за счет фильтрации по значению погрешности времени прихода акустико-эмиссионных сигналов.

3. Закономерности акустической эмиссии при развитии усталостных трещин и пластической деформации в материале осей колесных пар и боковых рам и основанные на них критерии браковки, позволяющие в процессе периодического акустико-эмиссионного контроля обнаружить развивающийся дефект за 20–40 % общего количества циклов до разрушения.

4. Закономерности распределения деформаций рельса под движущейся поездной нагрузкой и основанная на них методика контроля динамической силы, в которой схема установки тензодатчиков и алгоритмы обработки сигналов обеспечивают границы погрешности 2 % (влияние боковой силы, эксцентриситета вертикальной силы, изгиба рельса в вертикальной плоскости), 1 % при измерениях между шпалами и 5 % – над шпалами (влияние зависимости коэффициента пропорциональности сила – деформация от частоты до 1 кГц).

5. Модель формирования тензометрических сигналов при взаимодействии колеса с дефектом поверхности катания и рельса, включающая подсистемы «колесо – рельс» и «рельс – подрельсовое основание» с собственными частотами 700 и 250 Гц соответственно, и разработанные на ее основе методика и программное обеспечение обнаружения дефектов и критерии браковки по уровню динамической силы в подсистеме «колесо – рельс» в движении.

6. Экспериментальные амплитудные распределения динамических сил, вызванных дефектами поверхности катания колес, удовлетворительно описываются экспоненциальным законом с верхней границей силы 220 кН по уровню 1 %. Согласованные максимальные значения испытательной силы для обнаружения развивающихся дефектов при акустико-эмиссионном контроле боковых рам составляют от 480 до 530 кН, колец буксовых подшипников – от 120 до 130 кН и осей колесных пар – от 240 до 265 кН на шейку.

7. Методика акустико-эмиссионного контроля колец подшипников

буксового узла относительно штатного магнитопорошкового метода обеспечивает вероятность перебраковки не более 0,5 %, а обнаружения дефекта – не менее 98 %. Высокая чувствительность акустико-эмиссионного метода к усталостным трещинам колец подшипников буксового узла из стали ШХ4 проявляется в асимптотическом росте зависимости сигналов акустической эмиссии от испытательной нагрузки с коэффициентом пропорциональности более  $200 \text{ кН}^{-1}$ .

**Степень достоверности и апробация результатов.** Достоверность полученных результатов определяется: сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований с известными работами других авторов; применением средств измерений утвержденного типа, поверенных (калиброванных) в установленном порядке; сходимостью результатов контроля разными методами (акустико-эмиссионным, ультразвуковым, тензометрическим, визуальным, измерительным, магнитопорошковым) и результатами фрактографии; статистически значимым объемом экспериментальных данных, который позволяет достоверно судить о точечных оценках параметров статистических распределений исследуемых величин.

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 11 конференциях: Всероссийской научно-технической конференции «Политранспортные системы» (г. Новосибирск, 2009 г.); конференции с участием иностранных ученых «Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды» (г. Новосибирск, 2008 г., 2012 г.); научно-техническом совете Центральной дирекции по ремонту грузовых вагонов ОАО «РЖД» (г. Москва, 2012 г.); научно-технической конференции МИИТа «Безопасность движения поездов» (г. Москва, 2013 г.); VIII Международной научно-технической конференции «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты» (г. Санкт-Петербург, 2013 г.); VIII Российской научно-технической конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 2014 г.); VIII Международной научно-практической конференции в рамках года науки Россия – ЕС «Научные проблемы реализации проектов в Сибири и на Дальнем Востоке» (г. Новосибирск, 2014 г.); III Всероссийской с международным участием научно-практической конференции по инновациям в неразрушающем контроле SibTest (Республика Алтай, 2015 г.); IIХ и IX Международных научно-технических конференциях «Политранспортные системы» (г. Новосибирск, 2014 г., 2016 г.).

**Личный вклад автора.** Автору принадлежат: постановка цели и формулировка задач научной работы, создание и расчет физических моделей, планирование и участие в проведении экспериментов, их математическая обработка и статистический анализ результатов, участие в создании программного обеспечения для обработки экспериментальных данных, их анализ и интерпретация результатов.

**Публикации по теме диссертации.** По результатам диссертационной работы опубликовано **70** работ, в том числе **19** статей в изданиях, включенных в перечень ВАК, и **две** статьи в издании, индексируемом в реферативной базе Scopus, изданы **две** монографии, получено **семь** патентов РФ на изобретения, зарегистрированы **три** программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 276 наименований и пяти приложений. Диссертация изложена на 283 страницах, содержит 169 рисунков, 11 таблиц.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность доктору технических наук, профессору Л.Н. Степановой, доктору технических наук, профессору В.В. Муравьеву, кандидатам технических наук [М.В. Муравьеву], А.Л. Боброву, Е.В. Бояркину, К.В. Власову, С.И. Кабанову, А.С. Кочеткову, Е.С. Тенитилову, научным сотрудникам А.О. Коломейцу, Т.В. Сыч, аспиранту А.А. Попкову за конструктивную критику, обсуждение результатов и помощь, оказанную при выполнении работы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность диссертационной работы и степень проработанности темы исследования, установлены цель и задачи, сформулированы выносимые на защиту основные положения диссертации, новизна, теоретическая и практическая значимость.

**В первой главе** проанализировано современное состояние метода акустической эмиссии и тензометрии для решения задач неразрушающего контроля объектов железнодорожного транспорта. Рассмотрены основные информативные параметры акустико-эмиссионных и тензометрических сигналов и их связь с динамическими характеристиками дефектов. Проанализированы опубликованные научные работы, направленные на совместное применение нескольких методов неразрушающего контроля. Определены основные направления исследований по совершенствованию акустико-эмиссионного и тензометрического контроля.

**Во второй главе** представлены результаты исследования устойчивости

параметров сигналов и координат источников акустической эмиссии в ходовых частях вагонов. В объектах контроля, изготовленных из материала с неоднородной структурой, имеющих сложную форму, с расстоянием между границами  $l$  существенно меньше величины, обратной коэффициенту затухания  $\delta$  ( $l \ll \delta^{-1}$ ), форма акустико-эмиссионных сигналов в значительной степени определяется многократными отражениями и рассеянием. Интерференция переотраженных и рассеянных волн вызывает изменение формы акустико-эмиссионных сигналов при малозначительных вариациях первоначального воздействия. Для таких объектов предложено использовать понятие «устойчивость», введенное впервые в работах О.В. Туйкина и В.И. Иванова.

Для оценки устойчивости разработана методика, основанная на корреляционном анализе параметров сигналов, зарегистрированных разными преобразователями от одного источника. Методика позволяет обоснованно выбирать информативные параметры и оптимизировать их для объектов контроля определенного типа. Выполненный анализ устойчивости параметров сигналов в буксовых проемах боковых рам и кольцах подшипников позволил установить оптимальные информативные параметры для характеристики энерговыделения источника, а именно среднее квадратическое отклонение сигнала на временном интервале, определить его положение на временной оси и длительность. Коэффициент корреляции этого параметра составил 0,9, в то время как амплитуды – не более 0,6.

В боковых рамах, колесных парах, кольцах подшипника в процессе акустико-эмиссионного контроля регистрируется значительное количество (100 – 500) акустических помех, вызванных поверхностным растрескиванием остатков литейной формы, трением в сопряжениях деталей и в местах взаимодействия с нагружающим устройством. Неопределенности результатов измерения времен прихода сигналов на преобразователи приводят к локации помех в зоне контроля и, как следствие, к перебраковке деталей.

Разработана методика определения координат источников акустической эмиссии, основанная на преобразовании регистрируемых сигналов к виду, в котором экстремальное значение сигнала соответствует его времени прихода на преобразователь. Для сигналов с сильной дисперсией, у которых относительная неопределенность скорости распространения составляет  $\delta C > 5\%$ , предложен «двухинтервальный» коэффициент (рисунок 1), чувствительный к изменению формы сигнала.

Разработана математическая модель, в рамках которой получены аналитические зависимости неопределенности времени прихода  $\Delta$  от

максимального значения «двухинтервального» коэффициента  $K_{\max}$  (см. рисунок 1), длительности интервала усреднения  $T$ , коэффициента  $k_P$ , определяемого уровнем доверительной вероятности  $P$ :  $\Delta = k_P \cdot T \cdot K_{\max}^{-0,5}$ .

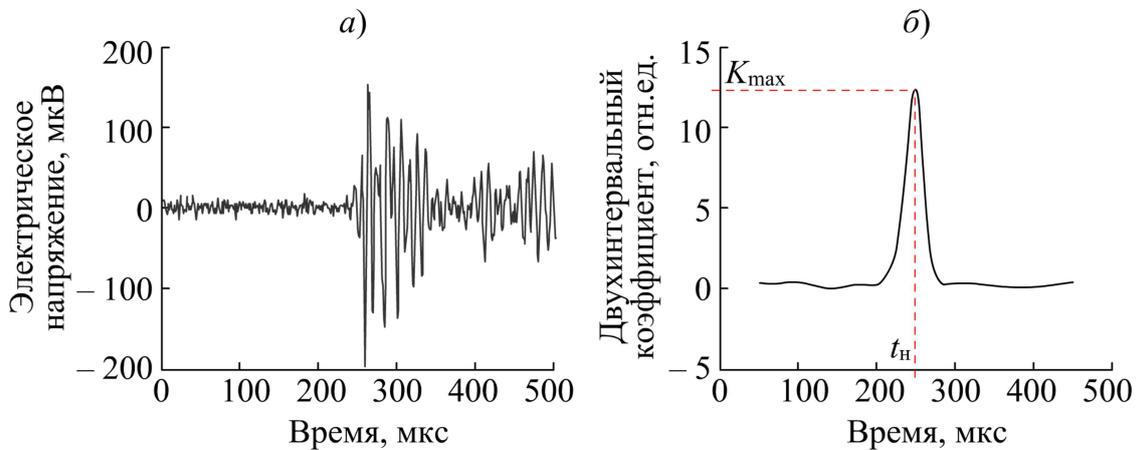


Рисунок 1 – Зависимости: *a* – электрического напряжения на выходе преобразователя акустической эмиссии; *б* – «двухинтервального» коэффициента от времени

Это позволило создать алгоритмы плоскостной локации источников сигналов акустической эмиссии с оценкой доверительных границ их координат (рисунок 2, *a*). Алгоритмы фильтрации, основанные на использовании модернизированного «двухинтервального» коэффициента, внедрены во ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина» в программное обеспечение цифровых акустико-эмиссионных диагностических систем СЦАД 16.03 и СЦАД 16.10. Это позволило идентифицировать сигналы от развивающихся дефектов при ресурсных и прочностных испытаниях образцов на фоне значительного количества акустических помех. Применение методики обеспечивает локацию сигналов от трещины во внутренних углах буксового проема боковых рам и в кольцах подшипников с погрешностью не более 5 % от максимального размера пьезоантенны.

Предложена методика анализа акустического тракта для оценки неопределенности координат источников акустической эмиссии. Для прямоугольной пьезоантенны изменение отношения сторон в диапазоне от 0,5 до 2 м несущественно влияет на погрешность, увеличивая ее не более чем на 30 %. Различие в чувствительностях акустических каналов изменяет отношение сигнал – шум, что, в свою очередь, значительно увеличивает неопределенность времени начала сигнала. Например, вариация в 6 дБ отношения сигнал – шум на двух каналах акустической антенны приводит к двукратному увеличению неопределенности (см. рисунок 2, *б*) координат источников акустической эмиссии.

Разработанные методики обработки сигналов обеспечивают достоверную

оценку параметров и координат источников акустической эмиссии в условиях регистрации малозначительных шумов и помех, влияния многочисленных переотражений от границ объекта контроля и рассеяния на неоднородностях структуры материала, литейных дефектов и неровностей поверхности. Оценка опасности усталостных дефектов производится по критериям браковки, основанным на закономерностях потоковых характеристик. Эти данные могут быть получены в процессе прочностных и усталостных испытаний образцов при акустико-эмиссионном контроле.

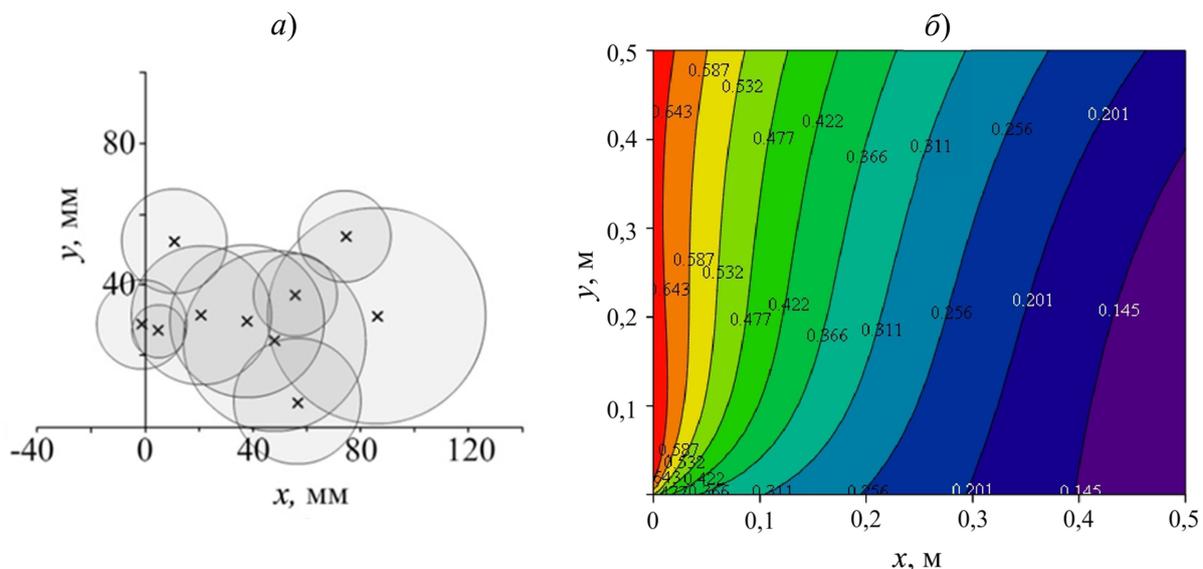
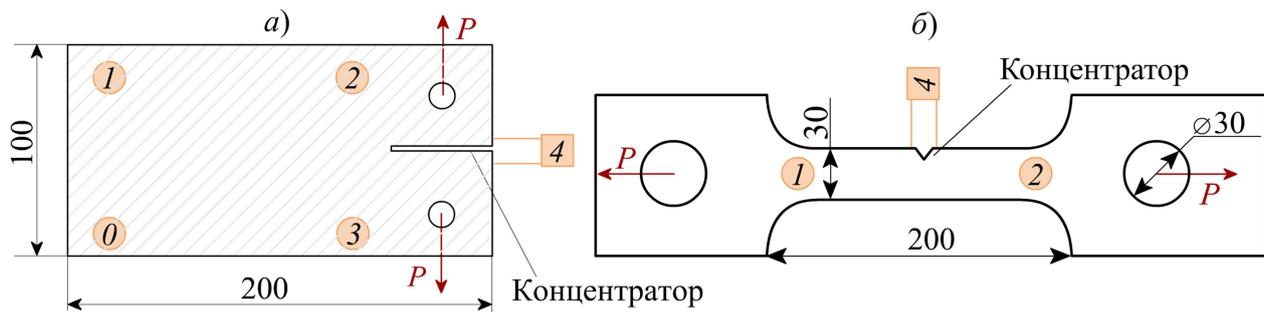


Рисунок 2 – Распределение *a* – источников в углу буксового проема боковой рамы грузового вагона с использованием «двухинтервального» коэффициента; *б* – доверительных границ неопределенностей координат источников для треугольной пьезоантенны (чувствительность первого канала в два раза выше)

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований закономерностей акустической эмиссии при развитии трещин и пластической деформации в материалах ходовых частей вагонов.

Механические испытания образцов из материала боковых рам (рисунок 3, а) и осей колесных пар (рисунок 3, б) грузовых вагонов выполнены по схеме, воспроизводящей процесс эксплуатации и ремонта. Образцы из материала боковых рам нагружались в электрогидравлической машине MTS-50 растягивающей силой  $P$ , изменяющейся по периодическому закону с амплитудой 25 кН. Через каждые 5–20 тысяч циклов проводился акустико-эмиссионный контроль в процессе нагружения монотонно возрастающей силой до максимального значения 30 кН. Образцы из материала осей испытывались на растяжение на установке для механических испытаний материалов Instron–8800 с использованием специально разработанных изолирующих захватов, состоящих из чередующих слоев войлока и стальных пластин. Амплитуда

циклического нагружения варьировалась в диапазоне от 80 до 100 кН, а максимальное значение монотонно возрастающей нагрузки достигало 160 кН.



0, 1, 2, 3 – преобразователи акустической эмиссии; 4 – датчик раскрытия трещины;  
 $P$  – испытательная нагрузка

Рисунок 3 – Образцы для испытаний: *a* – образец из материала боковых рам стали 20ГЛ толщиной от 8,5 до 12,5 мм; *б* – образец из осевой стали марки ОС по ГОСТ 4728 толщиной  $(9,0 \pm 0,5)$  мм

На начальном этапе монотонного нагружения образца с выращенной трещиной регистрируется нестационарная акустическая эмиссия (рисунок 4). Превышение испытательной силой критического значения, которое составляет от 80 до 100 % амплитуды циклического нагружения, приводит к появлению стационарной акустической эмиссии. Зависимость числа сигналов от силы описывается линейной функцией, которая характеризуется двумя параметрами: значением силы начала регистрации стационарной акустической эмиссии и коэффициентом пропорциональности.

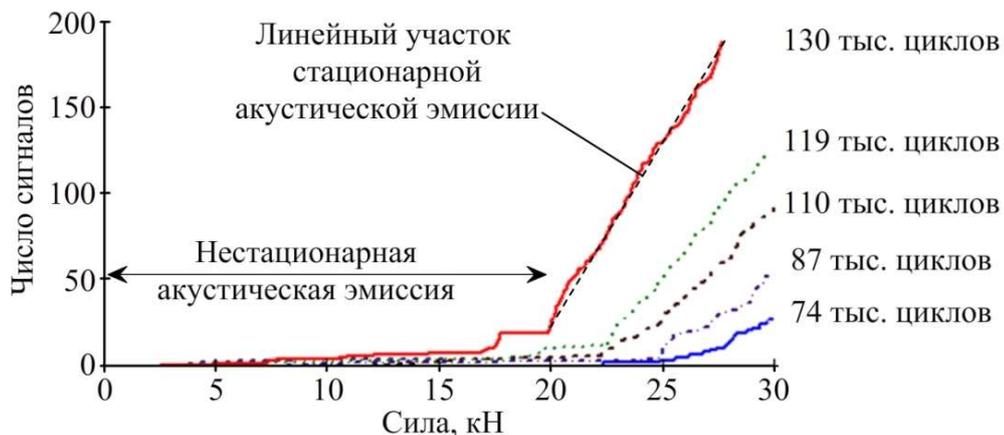


Рисунок 4 – Зависимость числа сигналов от испытательной силы после заданного количества циклов нагружения

В процессе развития трещины коэффициент пропорциональности увеличивается с  $0,5 \text{ кН}^{-1}$  (для нестационарной акустической эмиссии) до  $21 \text{ кН}^{-1}$  за 8–25 % общего количества циклов до разрушения. Сила начала регистрации стационарной акустической эмиссии относительно максимальной силы циклического нагружения в процессе роста трещины уменьшается со 110 до 60 % перед разрушением. Разработанные критерии браковки, основанные на

уменьшении относительного значения силы начала стационарной акустической эмиссии ниже 105 % и увеличении коэффициента пропорциональности до  $10 \text{ кН}^{-1}$ , позволяют обнаружить трещину за 40–60 % общего количества циклов до разрушения.

Сигналы акустической эмиссии от трещины регистрируются как в процессе нагружения, так и при разгрузке образцов. Значимый уровень акустической эмиссии при разгрузке возникает только после уменьшения испытательной силы до уровня 20–80 % максимальной силы циклического нагружения. Значительные вариации потоковых характеристик акустической эмиссии, регистрируемой в процессе разгрузки, существенно ограничивают ее применение для обнаружения и оценки опасности трещин в материале боковых рам.

Средняя амплитуда акустико-эмиссионных сигналов от трещины возрастает с коэффициентом пропорциональности 0,23 мкВ на тысячу циклов и изменяется от испытания к испытанию случайным образом со средним квадратическим отклонением более 50 %. Перед разрушением за 20–40 тысяч циклов повышается доля высокоамплитудных сигналов акустической эмиссии с амплитудой свыше 300 мкВ, что является дополнительным критерием обнаружения усталостных дефектов в материале боковых рам.

При испытаниях образцов из материала осей колесных пар зависимость числа сигналов акустической эмиссии от испытательной силы в целом повторяет закономерности, возникающие при развитии усталостных трещин в материале боковых рам, и позволяет уверенно идентифицировать начало пластической деформации в области концентратора и начало общей текучести образца. При малых нагрузках (меньше 40 % предела прочности образца) акустическая эмиссия отсутствует, количество регистрируемых сигналов не превышает пяти – десяти. Пластическая деформация в области концентратора при увеличении силы приводит к появлению стационарной акустической эмиссии с линейной зависимостью числа сигналов от испытательной силы. Наклон зависимости составляет  $0,5\text{--}0,6 \text{ кН}^{-1}$ , а нагрузка начала стационарной акустической эмиссии около 40–50 % предела прочности образца. С использованием результатов локации источников акустической эмиссии определен коэффициент пропорциональности числа сигналов и испытательной силы, пересчитанный на единицу объема материала:  $(9,4 \pm 0,2) \cdot 10^{-5} \text{ кН}^{-1} \cdot \text{мм}^{-3}$ .

При испытаниях пяти из десяти образцов высокоамплитудные сигналы акустической эмиссии (свыше 500 мкВ на входе предварительного усилителя) регистрировались в области перехода от локальной пластической деформации к

общей текучести образца, в трех случаях – за 10 кН перед разрушением, а в двух случаях – в начале пластической деформации в области концентратора. Несмотря на неоднозначный характер изменения высокоамплитудной составляющей, ее связь с процессами хрупкого разрушения определяет необходимость ее использования для обнаружения развивающихся трещин в осевой стали.

Выполнены усталостные испытания образцов из осевой стали в процессе циклического нагружения с частотой 5 Гц и амплитудой механических напряжений в рабочей части образца от 330 до 390 МПа. Число циклов до разрушения составило 20–30 тысяч. Материал работал в области малоциклового усталости и разрушение связано с повторно-пластическим деформированием. Сигналы акустической эмиссии от трещины регистрировались при испытании силой свыше 86 % амплитудного значения силы циклического нагружения. При разгрузке образца сигналы регистрировались при значениях силы от 20 до 30 %, а их количество не превышало 10 % общего количества сигналов.

Разработанные критерии обнаружения усталостных трещин в осях колесных пар основаны на следующих закономерностях: уменьшение силы начала стационарной акустической эмиссии ниже 95 % максимальной рабочей силы, увеличение коэффициента пропорциональности зависимости числа сигналов от испытательной силы до уровня  $0,6 \text{ кН}^{-1}$  и регистрацию высокоамплитудных сигналов акустической эмиссии с амплитудой более 450 мкВ на входе предварительного усилителя.

Выполнены исследования акустической эмиссии трения, возникающей при взаимодействии захватов нагружающего устройства с объектом контроля. Число сигналов акустической эмиссии определяется значением нормальной силы прижатия резины к основанию и может достигать 10–20 тысяч. Сигналы акустической эмиссии трения в паре резина – металл являются низкоэнергетическими со средней амплитудой не более 30 мкВ на входе предварительного усилителя. Эффективными способами подавления помех данного вида являются: амплитудная фильтрация с порогом фиксации аппаратуры, равным 40–50 мкВ, и пространственная фильтрация по месту расположения источников.

Достоверность обнаружения развивающихся дефектов в боковых рамах и колесных парах зависит от соотношения максимальных динамических сил, воздействующих на деталь в эксплуатации, и максимальной испытательной силы в процессе акустико-эмиссионного контроля в ремонтных депо. Приращение надежности детали после проведения контроля возможно только в

случае, если на признанную годной деталь в эксплуатации не будут воздействовать силы, превышающие максимальную силу акустико-эмиссионного испытания. Это условие может быть выполнено только в процессе мониторинга динамических сил в эксплуатации.

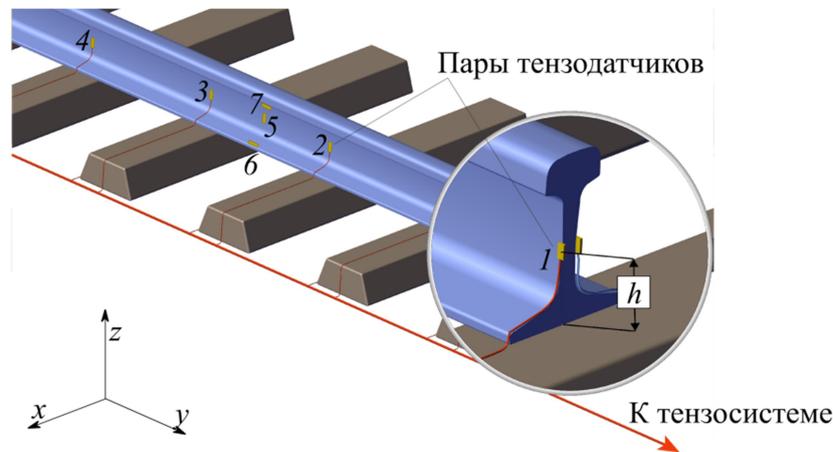
**В четвертой главе** приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований закономерностей формирования тензометрических сигналов в рельсах при статическом и динамическом нагружении для разработки методики измерения динамических сил в системе «колесо – рельс» в движении.

Экспериментальные исследования деформаций рельса в процессе движения грузового поезда проводились на специально подготовленном измерительном участке действующего пути ЗСЖД и на испытательном полигоне СГУПСа. Для измерения деформаций использовались проволочные тензодатчики типа ПКС-12-200. Сигналы с тензодатчиков регистрировались быстродействующей тензометрической системой «Динамика-1» (зарегистрирована в государственном реестре средств измерений № 32885-06) и быстродействующей тензометрической системой «Динамика-3» с максимальными частотами дискретизации аналого-цифрового преобразователя на один канал, равными 10 и 64 кГц.

Тензодатчики наклеивались (поз. 1–7 на рисунке 5) парами симметрично с двух сторон рельса на участке общей длиной 4,5 м. Для регистрации вертикальных деформаций  $\varepsilon_z$  тензодатчики устанавливались над шпалами (поз. 1–4) и между шпалами (поз. 5) в нейтральной плоскости рельса. Для регистрации продольных деформаций  $\varepsilon_y$  тензодатчики устанавливались на шейку (поз. 7) на расстоянии 15 мм от галтели перехода шейки в головку и на подошву (поз. 6) на расстоянии 5 мм от кромки. Все тензодатчики подключались к тензосистеме по схеме «одиночный тензодатчик» при четырехпроводном включении. Цена наименьшего разряда аналого-цифрового преобразователя тензосистемы составила  $2,45 \text{ млн}^{-1}$ , а среднее квадратическое отклонение шумов, пересчитанное в относительные деформации, не превышало  $4 \text{ млн}^{-1}$ .

Вертикальная статическая сила воспроизводилась гидравлическим домкратом с упором в поперечную балку грузового вагона, боковая сила – в противоположный рельс. Контроль сил осуществлялся динамометром. Динамическое нагружение осуществлялось ударным способом с помощью специально разработанного устройства, включающего в себя: боек переменной массы от 5 до 15 кг, устройство позиционирования и электрическую схему,

обеспечивающую измерение времени электрического контакта бойка с рельсом. В реальных условиях эксплуатации измерительный участок пути нагружался грузовыми поездами, составленными преимущественно из полувагонов и движущимися на скоростях от 30 до 90 км/ч.



1, 2, 3, 4, 5 – пары тензодатчиков для измерения вертикальных деформаций  $\varepsilon_z$ ;  
6, 7 – пары тензодатчиков для измерения горизонтальных деформаций  $\varepsilon_y$

Рисунок 5 – Измерительный участок пути

Расчет деформаций рельса выполнен в программе SolidWorks с использованием разработанной модели (рисунок 6) рельса длиной 7 м с переменным размером элементов от 5 до 50 мм. Шпалы имитировались распределенной упругой поддержкой, значение которой варьировалось в диапазоне от  $10^5$  до  $10^{12}$  Н/м<sup>3</sup>. Для предотвращения поворота рельса относительно продольной оси на боковых поверхностях подошвы рельса создавались зеркальные граничные условия, имитирующие закрепление рельса на шпале.

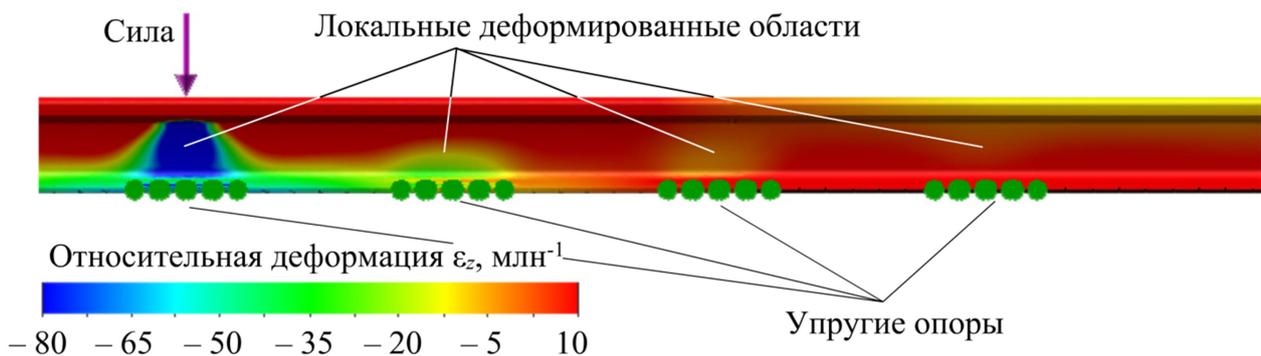


Рисунок 6 – Распределение вертикальных деформаций  $\varepsilon_z$  в рельсе под действием вертикальной силы 100 кН и упругого основания с жесткостью 300 МН/м<sup>3</sup>

Для обоснования выбора граничных условий торцы в процессе моделирования закреплялись тремя способами: жесткая заделка, шарнирное и зеркальное закрепление. Способ закрепления (в пределах погрешности расчета менее 0,5 %) не влияет на распределение деформаций средней части ( $\pm 1$  м)

модели, поэтому в дальнейших расчетах использовались зеркальные граничные условия. На головку рельса прикладывалась вертикальная сила  $Q$ , горизонтальная сила  $B$  и их комбинации. Точка приложения силы смещалась в направлении оси  $Ox$  на величину эксцентриситета  $e$  и в направлении оси  $Oy$ , имитируя движение колеса по рельсу. Распределение деформаций  $\varepsilon_z$  под действием вертикальной силы 100 кН, приложенной без эксцентриситета над центром шпалы, показано на рисунке 6.

В основу методики измерения силы положен известный метод Шлюмфа, получивший развитие в работах Н.Н. Кудрявцева и А.К. Шафрановского. Сила  $Q$  определяется по результатам измерений мостовым методом вертикальных деформаций  $\varepsilon_z$  шейки рельса, симметричных относительно плоскости симметрии и нейтральной плоскости рельса. В предлагаемом способе пары тензодатчиков (поз. 1–5 на рисунке 5) устанавливаются симметрично с внутренней и наружной сторон на нейтральной плоскости шейки рельса. Сила  $Q$  определяется по значениям симметричных вертикальных деформаций:

$$Q = k^{-1} \cdot \varepsilon_s, \quad (1)$$

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_o + \varepsilon_i)/2, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности,  $\text{кН}^{-1} \cdot \text{млн}^{-1}$ ;  $\varepsilon_o, \varepsilon_i$  – относительные деформации  $\varepsilon_z$  шейки рельса с наружной и внутренней сторон,  $\text{млн}^{-1}$ ;

Симметричное расположение тензодатчиков относительно плоскости симметрии обеспечивает нечувствительность коэффициента пропорциональности  $k$  к боковому изгибу, а симметричность относительно нейтральной плоскости – к изгибу в вертикальной плоскости рельса. Экспериментально установлено, что продольные деформации рельса (поз. 6 и 7 на рисунке 5), зарегистрированные при движении поезда, имеют противоположные знаки и связаны линейной зависимостью, что позволяет определить положение по высоте нейтральной плоскости рельса, на которой продольные деформации равны нулю.

Основные причины погрешностей и неопределенностей измерений силы связаны с влиянием на деформации  $\varepsilon_s$  (2) мешающих факторов: боковой силы, эксцентриситета приложения вертикальной силы, изгиба рельса в вертикальной плоскости, сил реакции шпал, износа головки рельса. Значительную неопределенность в результаты вносит динамика, в которой коэффициент преобразования  $k$  в формуле (1) зависит от амплитудно-частотной характеристики воздействия.

Оценка чувствительности симметричных вертикальных деформаций  $\varepsilon_s$  к боковой силе 35 кН, эксцентриситету вертикальной силы до 30 мм и изгибу

рельса в вертикальной плоскости до 4 мм выполнена экспериментально и расчетным способом. Степень влияния мешающих факторов на погрешность измерения силы зависит от точности установки преобразователей на рельс. Полученные при расчетах методом конечных элементов вариации коэффициента преобразования не превышают 0,2 %, а в экспериментах – 1 %.

Локальные деформации  $\varepsilon_s$ , связанные с силой реакции шпалы и силой от колеса, сосредоточены в областях протяженностью 80–100 мм в обе стороны от сечения приложения нагрузки и описываются функцией Гаусса с коэффициентом корреляции 0,99. Наименьшее влияние шпалы на результат измерения вертикальной силы реализуется при измерениях вертикальных симметричных деформаций между шпалами на расстояниях до края шпалы более 100 мм. При этом погрешность измерений не превышает 0,5 %.

Выполнена калибровка тензометрических каналов при нагружении статической силой и динамической силой с характерной частотой 1 кГц. Динамический коэффициент преобразования силы в деформации в формуле (1) определялся по разработанной автором методике, основанной на измерении импульса до и после ударного воздействия и площади импульсной составляющей сигнала с тензодатчиков. Относительная разница коэффициентов преобразования при измерениях деформаций между шпалами не превышает 2 %, а при измерениях над шпалами – 5 %. Это позволило проводить калибровку тензометрической системы статической силой с использованием существующей поверочной схемы средств измерений силы.

Методика, при которой тензодатчики располагались над шпалами, обеспечивает измерение комбинации деформаций, связанных с силой, воздействующей от колеса и силой реакции шпалы. При этом в зоне протяженностью 0,16–0,20 м преобладают локальные деформации от колеса, а в зоне протяженностью 1,0–2,5 м – от силы реакции шпалы. Разработанный алгоритм и программное обеспечение (рисунок 7) позволили в зарегистрированных при движении поезда сигналах деформаций выделить медленную компоненту, связанную с реакцией шпалы, и импульсную составляющую деформаций, вызванную силой реакции колеса. За счет этого уменьшилось влияние подрельсового основания на результаты измерения вертикальной силы с погрешностью, не превышающей 5 %.

Выполнены исследования динамических сил в системе «колесо – рельс» в реальных условиях эксплуатации на Западно-Сибирской железной дороге. Построены амплитудные распределения сил в сечениях измерительного участка. Показано, что параметры распределений существенно зависят от места

измерения и жесткости подрельсового основания. Амплитудное распределение имеет колоколообразную форму со средним значением силы от 76 до 110 кН. Среднее квадратическое отклонение силы по колесным парам десяти поездов относительно среднего значения составляет от 10 до 13 %. Распределение силового воздействия по сечениям характеризуется средним квадратическим отклонением 5 % с доверительными границами, равными  $\pm 10$  %. Обнаружена разница средних значений силы, воздействующей от первого и второго колес тележки, которая зависит от характеристик подрельсового основания и может достигать 22 %.

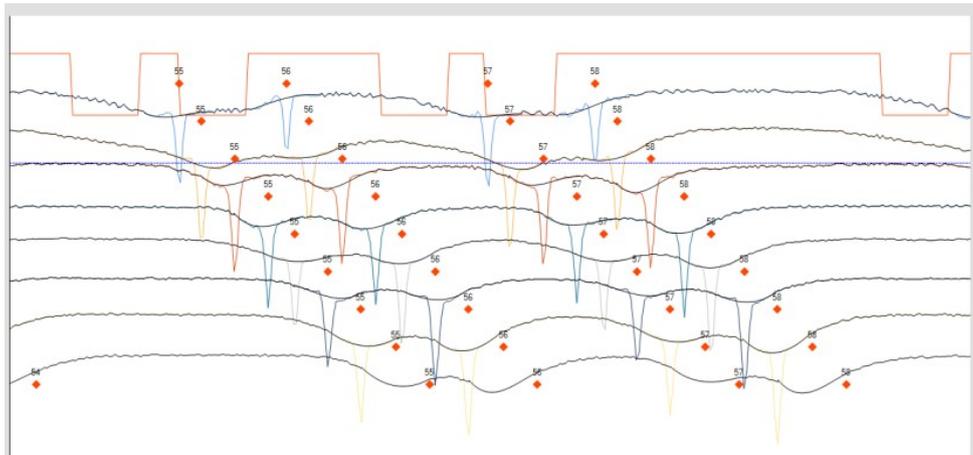


Рисунок 7 – Внешний вид программного обеспечения для обработки сигналов тензометрической системы с сигналами симметричных деформаций и рассчитанными компонентами сигнала реакции шпалы

Дефекты поверхности катания способны увеличивать динамические силы в системе «колесо – рельс» в несколько раз. Их воздействие на ходовые части вагонов является циклическим с частотой вращения колесной пары, что оказывает значительное влияние на процессы усталостного разрушения ходовых частей вагонов.

**В пятой главе** рассмотрена методика тензометрического контроля колес вагонов в движении и результаты ее внедрения на действующем участке пути. В работах авторов А.Я. Коган, М.Ф. Вериги, А.К. Шафрановский, А.Е. Балановский, Н.Н. Кудрявцев, С.В. Вершинский, Л.В. Кудюров достаточно подробно исследована динамика взаимодействия колес и рельсов, в том числе с дефектами поверхности катания (рисунок 8, а). Отдельные вопросы, связанные с соотношениями деформаций от колес и шпал требуют уточнения. Автором разработана модель и рассчитаны параметры сигналов симметричных вертикальных деформаций шейки рельса над шпалами при воздействии колеса с ползуном на поверхности катания. Аналитическая модель (рисунок 8, б) состоит из двух упругих элементов, имитирующих взаимодействие колеса с

рельсом и рельса с подрельсовым основанием.

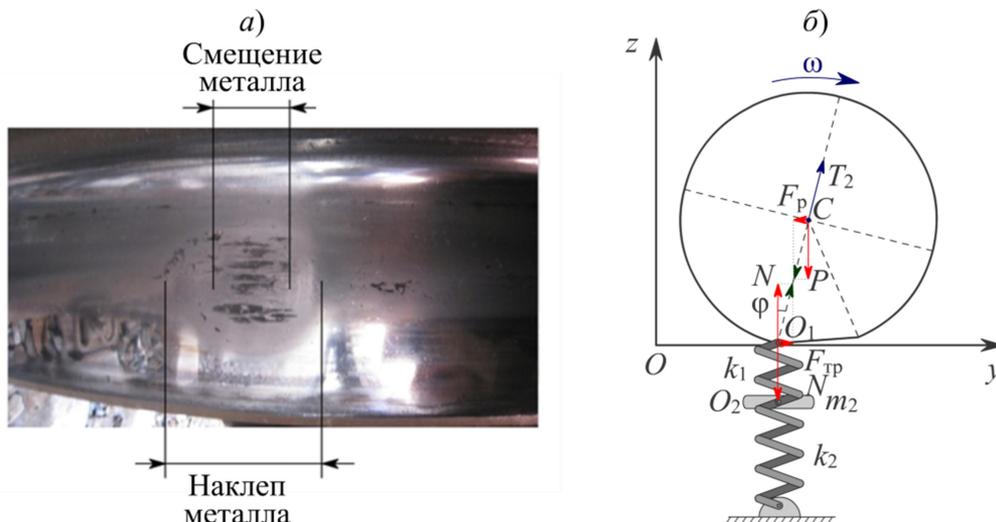


Рисунок 8 – Фотография ползуна (а); модель системы с двумя упругими элементами для расчета динамических сил при взаимодействии колеса с ползуном и рельса

Экспериментальные данные (рисунок 9, б) удовлетворительно описываются моделью с собственными частотами упругих элементов: 700 Гц «колесо–рельс» и 250 Гц «рельс–подрельсовое основание». В отличие от одноэлементной модели, разработанная модель позволяет определять основные параметры регистрируемых сигналов с тензодатчиков, связанных с реакциями шпалы, когда колесо находится вне зоны их чувствительности на расстояниях более 80–100 мм.

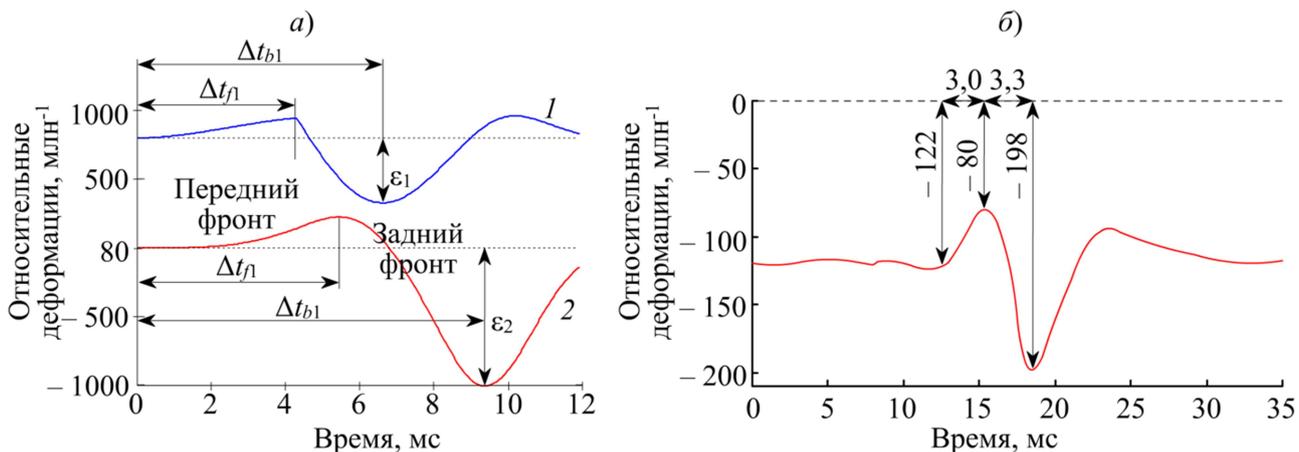


Рисунок 9 – Зависимость деформаций упругих элементов  $k_1$  (1) и  $k_2$  (2) от времени (а) и сигнал тензосистемы при движении колеса с ползуном (б)

Разработан комплекс информативных параметров (рисунок 9, а) сигналов деформаций, состоящий из группы амплитудных и временных параметров. Временные параметры коррелируют с протяженностью дефекта, амплитудные – с силой воздействия колеса на рельс. Обе группы параметров существенно зависят от собственных частот системы, определяемых массой и

жесткостью ее элементов. Наименьшее влияние скорости движения колеса на результат измерения размера дефекта реализуется при использовании в качестве информативного параметра длительности переднего фронта сигналов локальных деформаций в системе «колесо – рельс». Неопределенность измерения размера дефекта не превышает 1 % на скоростях до 110 км/ч.

Для временных параметров сигналов, связанных с реакцией шпалы, неопределенность результатов измерений существенно зависит от скорости движения и жесткости подрельсового основания, что связано с относительно низкой собственной частотой 250 Гц, сравнимой с частотой воздействия колеса. В постоянных условиях наблюдается корреляционная связь размера дефекта и временных параметров сигналов деформаций с коэффициентом корреляции 0,45–0,65. Амплитуда относительных деформаций характеризует силу взаимодействия колеса и рельса, рельса и подрельсового основания. Уровни сил в подсистемах «колесо – рельс» и «рельс–подрельсовое основание» зависят от соотношения их собственных частот с частотой внешнего воздействия.

Разработанная методика контроля колес в движении основана на применении двух составляющих сигналов тензометрической системы. Первая составляющая, связанная с локальными деформациями  $\varepsilon_w$  (рисунок 10, а) под колесом в зоне протяженностью не более 160 мм, используется для измерения вертикальной силы от колеса на рельс с погрешностью не более 5 %. Оценка импульсной составляющей силы, вызванной воздействием дефекта поверхности катания вне зоны протяженностью 200 мм, основывается на определении отношения амплитуды  $\varepsilon_{\max}$  импульсной составляющей и среднего уровня  $\varepsilon_{mn}$  деформаций при движении колеса.

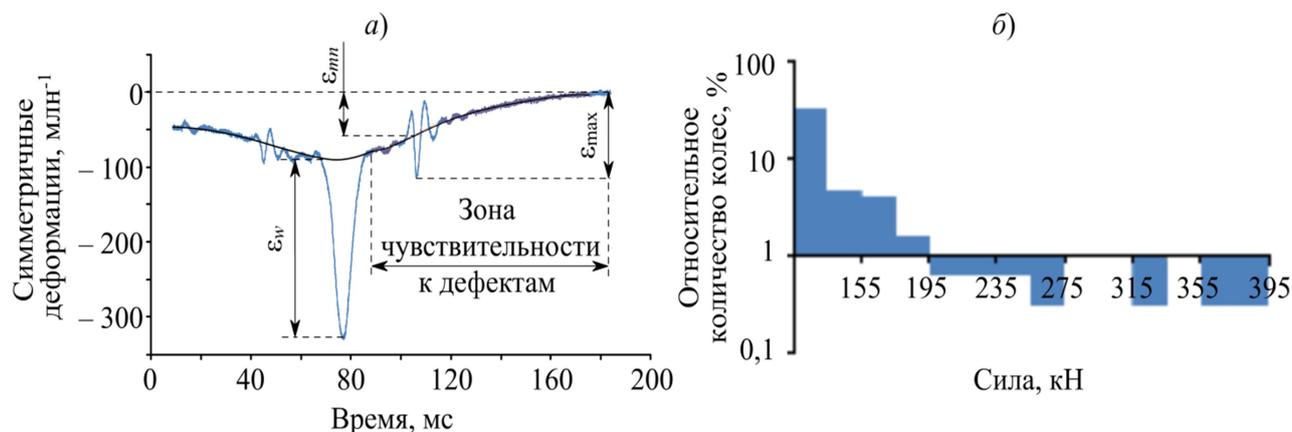


Рисунок 10 – Зависимость симметричных деформаций от времени при проходе колеса  $\varepsilon_w$  и воздействии дефекта поверхности катания  $\varepsilon_{\max}$ , где  $\varepsilon_{mn}$  – средний уровень деформаций при движении бездефектного колеса, (а) и статистические распределения силы воздействия колес с дефектами поверхности катания (б)

Проведен контроль колес вагонов в реальных условиях на действующем

участке бесстыкового пути ЗСЖД. Динамическое воздействие, превышающее максимально допустимую статическую нагрузку в два раза и более, обнаруживается у 1–2 % колесных пар, в 3 раза и более – у 0,5–1 %. Статистическое распределение динамических сил, определяемых дефектами поверхности катания, описывается экспоненциальным распределением (рисунок 10, б). Верхняя граница распределения, равная 220 кН, по уровню 0,01 принята в качестве предельно допустимого значения силы от колеса на рельс. Значение динамической силы, равное 220 кН, является максимальной рабочей нагрузкой, которая определяет параметры нагружения при акустико-эмиссионном контроле в ремонтных депо.

**В шестой главе** рассматриваются разработанные методики акустико-эмиссионного контроля деталей и узлов ходовых частей грузовых вагонов при ремонте. Для повышения надежности обнаружения усталостных трещин на ранних стадиях развития в кольцах буксовых подшипников колесных пар грузовых вагонов разработана методика акустико-эмиссионного контроля. Создано специализированное нагружающее устройство с максимальным сжимающим усилием 115 кН. Разработанный модернизированный «двухинтервальный» метод определения времени прихода сигналов обеспечивает в зонах малых размеров (менее 200 мм) устойчивую локацию сигналов от развивающегося дефекта в условиях значительного уровня помех из мест взаимодействия захватов нагружающего устройства с объектом контроля. В депо Инская ЗСЖД проведены сравнительные испытания акустико-эмиссионной системы и штатного контроля магнитопорошковым методом. При нагружении колец подшипников с усталостными трещинами на зависимости числа сигналов акустической эмиссии от испытательной силы обнаруживается вертикальная асимптота. На основе статистического распределения потоковых характеристик в бездефектных и дефектных кольцах подшипников рассчитано критическое значение параметра браковки для адаптированного локально-динамического критерия. Вероятность ложной браковки колец подшипников не превышает 0,02 %, а вероятность пропуска дефекта – 2 %.

Разработана методика акустико-эмиссионного контроля осей колесных пар вагонов. Параметры нагружения осей колесных пар согласованы с максимально допустимым уровнем динамических сил, регистрируемых в эксплуатации с использованием динамической тензометрии. Максимальная нагрузка на каждую шейку оси составляет от 240 до 265 кН. Локация источников акустической эмиссии осуществлялась с использованием

комбинированных алгоритмов на основе зонной и линейной локации внутри каждой зоны (рисунок 11, а). Для обнаружения сигналов из мест взаимодействия колес с захватами нагружающего устройства преобразователи устанавливались на диск колеса.

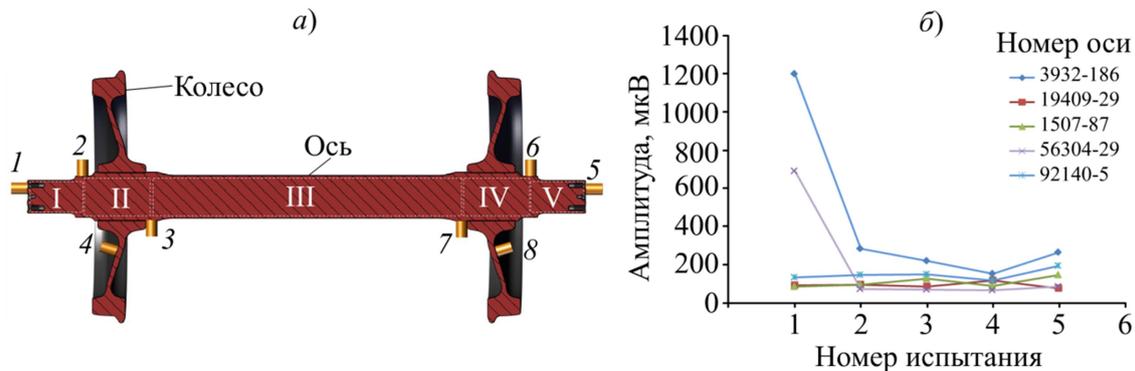


Рисунок 11 – Схема установки преобразователей акустической эмиссии (1 – 8) на колесную пару и зоны контроля (I – V) (а) и зависимость амплитуды сигналов акустической эмиссии от номера испытания для пяти осей колесных пар (б)

Проведены сравнительные испытания акустико-эмиссионного, ультразвукового и магнитопорошкового методов контроля. Разработанная методика обнаружения усталостных трещин основана на комплексном использовании амплитудного критерия и критерия по изменению значению силы начала стационарной акустической эмиссии и коэффициента пропорциональности числа сигналов от испытательной силы. Применение разработанной методики обеспечивает обнаружение (см. рисунок 11, б) усталостных дефектов во всех зонах оси в условиях помех от нагружающего устройства и напрессовки колес.

В результате анализа статистических данных о контроле боковых рам штатным методом выполнена оценка вероятностей обнаружения трещин длиной  $l < 5$  мм, которая составила менее 0,6 %, трещин длиной  $5 \text{ мм} < l < 12$  мм – не более 30 %. Для проведения акустико-эмиссионного контроля боковых рам коробчатого сечения при техническом освидетельствовании в депо разработана методика и критерии браковки. Параметры нагружения согласованы по амплитудным значениям силы с критериями браковки, установленными в тензометрической системе контроля динамических сил в движении. Максимальная вертикальная нагрузка на боковую раму в рессорном проеме составляет 480–530 кН.

Акустико-эмиссионный контроль выполнялся системой СЦАД-16.03 с целью обнаружения усталостных развивающихся дефектов в углах буксовых проемов (рисунок 12). Испытания проводились в вагонных ремонтных депо после визуального осмотра и магнитного контроля.

С целью уменьшения помех, характерных для литых объектов, использовалась фильтрация, основанная на «двухинтервальном» коэффициенте. Это обеспечило повышение достоверности контроля за счет исключения сигналов-помех, локализуемых в зонах контроля из-за погрешности определения времени прихода сигналов на преобразователь акустической эмиссии

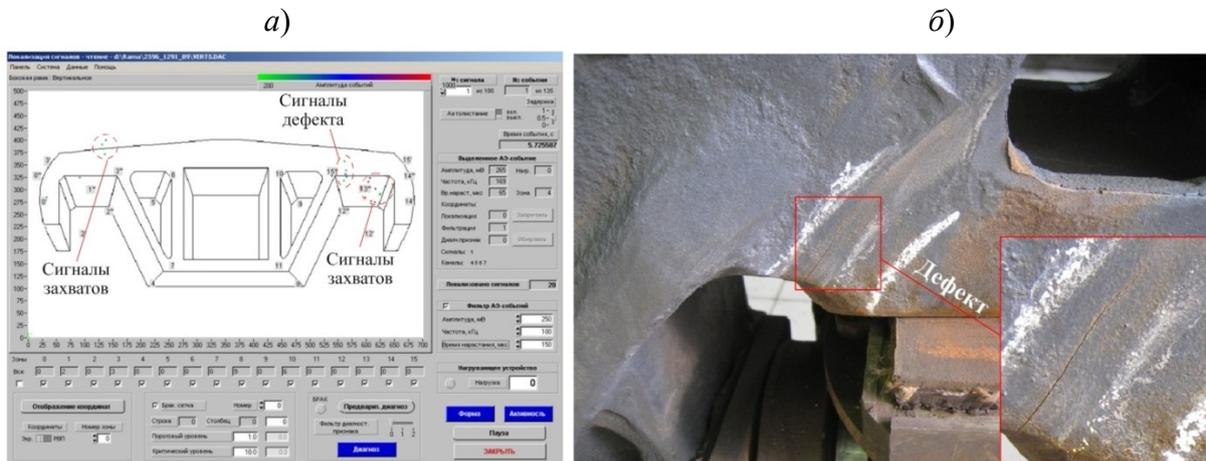


Рисунок 12 – Результаты локации источников акустической эмиссии в боковой раме (заводской номер 2596, клеймо завода изготовителя 1291), изготовленной в 2009 г. (а) и фотография фрагмента боковой рамы с усталостной трещиной (б)

Разработаны новые конструкции магнитных креплений преобразователей акустической эмиссии для установки на детали с необработанной литой поверхностью. Созданы специализированные нагружающие устройства, обеспечивающие повышение эффективности контроля и снижение шумов и помех из мест взаимодействия захватов с объектом контроля за счет использования полимерных материалов и оптимизированной схемы приложения нагрузки в рессорном проеме. Разработана методика аттестации нагружающих устройств по ГОСТ Р 8.568, которая внедрена в технологический процесс при их периодическом освидетельствовании. Технология акустико-эмиссионного контроля внедрена в девяти вагонных ремонтных депо ОАО «ВРК-1».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации представлены результаты разработки методики и технологии тензометрического и акустико-эмиссионного контроля, согласованное использование которых на различных этапах жизненного цикла продукции (при ремонте и в эксплуатации) позволяет повысить достоверность и надежность контроля ходовых частей вагонов.

**Основные научные и практические результаты**, полученные автором и представленные в диссертации, заключаются в нижеследующем.

1. Разработаны методики и алгоритмы оценки информативности параметров сигналов акустической эмиссии в условиях значительного влияния многократных отражений в объекте контроля, определения координат источников акустической эмиссии и их доверительных границ с использованием модернизированного «двухинтервального» метода. Методика реализована в программном обеспечении систем СЦАД 16.03, СЦАД 16.10 и внедрена во ФГУП «СибНИА им. С.А. Чаплыгина» при ресурсных и прочностных испытаниях и в вагонных ремонтных депо ОАО «ВРК-1» при акустико-эмиссионном контроле боковых рам грузовых вагонов.

2. Проведены экспериментальные исследования статистических закономерностей акустической эмиссии в процессе развития усталостных трещин, пластической деформации в материале ходовых частей вагонов и трения в местах сопряжения объекта контроля с нагружающим устройством. Разработаны критерии браковки на основе анализа параметров зависимости числа сигналов акустической эмиссии от испытательной силы. Способ, реализующий критерии браковки, защищен патентом и внедрен в вагонном ремонтном депо Инская – филиал ОАО «ВРК-1» для контроля боковых рам коробчатого сечения и осей колесных пар грузовых вагонов.

3. Выполнены экспериментальные исследования и моделирование методом конечных элементов закономерностей деформирования рельсов под поездной нагрузкой. Разработана методика измерения вертикальной динамической силы, основанная на временной фильтрации симметричных деформаций шейки рельса и позволяющая уменьшить влияние подрельсового основания на результаты измерения силы. Методика защищена патентом, реализована в программном обеспечении, зарегистрированном в Роспатенте и внедрена на Западно-Сибирской железной дороге в виде подсистемы «Комплекс-2» (ООО «Транстех», г. Новосибирск) для автоматизированного контроля динамических сил в системе «колесо – рельс».

4. Исследованы методы калибровки тензометрической системы контроля колес в движении с использованием динамических и статических сил. Показано, что относительная разница коэффициентов преобразования статической силы и динамической, импульсной силы с характерной частотой до 1 кГц в симметричные деформации между шпалами не превышает 2 %, над шпалами – 5 %. Это позволило разработать методику калибровки тензометрической системы, основанную на поверочной схеме средств измерения силы.

5. Разработана математическая модель формирования сигналов

симметричных деформаций при движении колес с дефектами поверхности катания на скоростях до 110 км/ч. На основе модели разработан комплекс временных и амплитудных параметров диагностических сигналов и установлена их связь с амплитудой динамической силы от колеса на рельс и протяженностью дефекта.

6. Выполнен контроль динамических сил в системе «колесо – рельс» в реальных условиях эксплуатации бесстыкового пути. Определены статистические распределения динамических сил от бездефектных колес и колес с дефектами поверхности катания. На основе параметров распределений установлены верхние значения испытательных сил при акустико-эмиссионном контроле боковых рам, осей колесных пар и колец подшипников грузовых вагонов. Определены максимально допустимые динамические силы в системе «колесо – рельс», согласованные с методикой акустико-эмиссионного контроля.

7. Разработаны методики акустико-эмиссионного контроля неподрессоренных частей грузовых вагонов, согласованные по динамическим нагрузкам с системой «колесо – рельс» с учетом влияния дефектов поверхности катания. Методики внедрены в вагонных ремонтных депо ОАО «ВРК-1».

Разработанные методики и алгоритмы оценки устойчивости временных и амплитудных параметров сигналов и неопределенности координат источников акустической эмиссии являются достаточно универсальными и могут быть использованы при разработке методик акустико-эмиссионного контроля различных объектов для повышения достоверности результатов контроля. Реализованный подход, основанный на комплексном использовании нескольких методов контроля на различных этапах жизненного цикла продукции, обеспечивает повышение надежности контроля и компенсирует ограничения применяемых методов. Предложенный подход может применяться для контроля и мониторинга ответственных конструкций, работающих в условиях циклических нагрузок, вызывающих образование и развитие усталостных дефектов, например, грузоподъемных механизмов.

### **Список основных работ, опубликованных автором по теме диссертации**

#### **Монографии и главы в научных изданиях**

1. **Бехер, С. А.** Контроль дефектов поверхности катания железнодорожных колес в движении по показателям динамики их взаимодействия с рельсами / **С. А. Бехер** // Тензометрия в транспортном машиностроении / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов и др. – Новосибирск : Наука, 2014. – Гл. 10. – С. 225–241. – ISBN 978-5-02-019175-4.

2. Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций / А.

Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, В. В. Ивлиев, С. И. Кабанов, **С. А. Бехер** и др. – Новосибирск : Наука, 2011. – 272 с. – ISBN 978-5-02-018973-7.

3. Двухинтервальный метод определения времени прихода сигналов акустической эмиссии / К. Л. Комаров, В. В. Муравьев, **С. А. Бехер**, М. В. Муравьев // Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, В. В. Муравьев и др. ; под ред. Л. Н. Степановой, В. В. Муравьева. – М. : Машиностроение / Машиностроение-Полет, 2004. – 386 с. – ISBN 5256015311.

4. Использование метода акустической эмиссии для неразрушающего контроля объектов железнодорожного транспорта // В. В. Муравьев, К. Л. Комаров, А. Л. Бобров, Е. В. Бояркин, **С. А. Бехер**, М. В. Муравьев // Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, В. В. Муравьев и др. ; под ред. Л. Н. Степановой, В. В. Муравьева. – М. : Машиностроение / Машиностроение-Полет, 2004. – 386 с. – ISBN 5256015311.

**Публикации в ведущих научных рецензируемых периодических изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ**

5. **Бехер, С. А.** Экспериментальная методика измерения динамических сил, действующих на рельсы подкранового пути в реальных условиях эксплуатации / **С. А. Бехер**, А. О. Коломеец // Известия вузов. Строительство. – 2016. – № 3. – С. 110–118. – ISSN 0536-1052.

6. **Бехер, С. А.** Повышение достоверности контроля колес грузовых вагонов в движении с использованием цифровых методов обработки информации / **С. А. Бехер**, А. О. Коломеец // Дефектоскопия. – 2015. – № 3. – С. 61–68. – ISSN 01303082.

7. **Бехер, С. А.** Использование эффекта акустоупругости при исследовании механических напряжений в рельсах / **С. А. Бехер**, А. Н. Курбатов, Л. Н. Степанова // Вестн. Рост. гос. ун-та путей сообщ. – 2013. – № 2. – С. 104–111. – ISSN 0201-727X.

8. Акустико-эмиссионный контроль боковых рам тележек грузовых вагонов при деповском ремонте / В. Д. Верескун, Л. Н. Степанова, **С. А. Бехер** и др. // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 1. – С. 67–71. – ISSN 0201-7032.

9. Тензометрическая система для обнаружения дефектов поверхности катания колес грузового вагона / Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов, **С. А. Бехер**, А. О. Коломеец // Датчики и системы. – 2013. – № 10 (173). – С. 38–44. – ISSN 1992-7185.

10. Исследование образцов из материала боковых рам коробчатого

сечения методом акустической эмиссии / Л. Н. Степанова, **С. А. Бехер**, Е. В. Бояркин и др. // Дефектоскопия. – 2013. – № 4. – С. 40–51 – ISSN 0130-3082.

11. Микропроцессорные многоканальные тензометрические системы для динамических испытаний конструкций / Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов, **С. А. Бехер** и др. // Датчики и системы. – 2011. – № 8. – С. 29–34. – ISSN 1992-7185.

12. **Бехер, С. А.** Разработка методики браковки дефектов поверхности катания колесных пар в движении / **С. А. Бехер**, Л. Н. Степанова, А. С. Кочетков // Контроль. Диагностика. – 2011. – № 7. – С. 24–29. – ISSN 0201-7032.

13. **Бехер, С. А.** Анализ результатов неразрушающего контроля при деповском ремонте деталей тележек грузовых вагонов / **С. А. Бехер**, А. Л. Бобров, А. А. Большанов // Вестн. Рост. гос. ун-та путей сообщ. – 2011. – № 2. – С. 20–26. – ISSN 0201-727X.

14. Разработка методики определения дефектов поверхности катания колесных пар в движении / Л. Н. Степанова, **С. А. Бехер**, А. С. Кочетков, Б. М. Харламов // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 5. – С. 64–69. – ISSN 0201-7032.

15. Степанова, Л. Н. Методика определения координат дефектов при акустико-эмиссионном контроле свободных колец подшипников / Л. Н. Степанова, **С. А. Бехер**, Е. С. Тенитилов // Контроль. Диагностика. – 2010. – № 4. – С. 61–65. – ISSN 0201-7032.

16. Степанова, Л. Н. Особенности использования быстродействующей тензометрии для контроля колес грузовых вагонов в движении / Л. Н. Степанова, **С. А. Бехер**, А. С. Кочетков // Вестн. Рост. гос. ун-та путей сообщ. – 2010. – № 2. – С. 53–57. – ISSN 0201-727X.

17. Степанова, Л. Н. Исследование влияния ударных нагрузок на распространение ударных колебаний в рельсе / Л. Н. Степанова, **С. А. Бехер**, А. С. Кочетков // Дефектоскопия. – 2010. – № 3. – С. 27–34. – ISSN 01303082.

18. Степанова Л. Н. Контроль колец подшипников локомотива методом акустической эмиссии / Л. Н. Степанова Е. С. Тенитилов, **С. А. Бехер** // Дефектоскопия. – 2009. – № 9. – С. 49–55. – ISSN 01303082.

19. Степанова, Л. Н. Анализ погрешностей измерения вертикальных сил, действующих на рельс от колес движущегося транспортного средства / Л. Н. Степанова, **С. А. Бехер**, А. С. Кочетков // Контроль. Диагностика. – 2009. – № 12. – С. 54–60. – ISSN 0201-7032.

20. Использование тензометрии для контроля колес грузового вагона в движении / Л. Н. Степанова, **С. А. Бехер**, А. С. Кочетков, И. И. Снежков // Контроль. Диагностика. – 2008. – № 8. – С. 19–23. – ISSN 0201-7032.

21. Муравьев, В. В. Анализ погрешностей определения координат источников акустической эмиссии в конструкциях из листовой стали / В. В. Муравьев, **С. А. Бехер**, К. В. Власов // Дефектоскопия. – 2008. – № 7. – С. 53–59. – ISSN 01303082.

22. Власов, К. В. Контроль продольных несущих балок мостовых конструкций акустико-эмиссионным методом / К.В. Власов, **С. А. Бехер**, А. Б. Алексеев // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2007. – № 3. – С. 95–102. – ISSN 0536–1052.

23. **Бехер, С. А.** Зависимость числа импульсов АЭ при механических испытаниях колец подшипников буксового узла / **С. А. Бехер**, Е. С. Тенитилов // Дефектоскопия. – 2006. – № 8. – С. 54–62. – ISSN 01303082.

#### **Статьи в научных изданиях, входящих в международные базы данных**

24. **Bekher, S. A.** Calibration methods of force control diagnostic system of a rolling stock on the run / **S. A. Bekher**, А. О. Коломеец // Journal of Physics : Conference Series, 2016. – Т. 671. – № 1. – P. 012029. – ISSN 1742-6588.

25. **Bekher, S. A.** Regularities of acoustic emission in the freight car solebar materials / **S. A. Bekher** // Journal of physics: Conference series. – 2016. – Vol. 671. – № 1. – P. 012005. – ISSN 1742-6588.

#### **Патенты и свидетельства о регистрации программ для ЭВМ**

26. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015613124. Определение параметров дефектов поверхности катания колес и динамических характеристик подвижного состава по сигналам тензометрической системы / **Бехер С. А.**, Кабанов С. И., Коломеец А. О. и др. – № 2014661307 ; заявл. 07.11.2014 ; рег. 05.03.2015. – 2 с.

27. Пат. 2537747 С1 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 N 29/14. Акустико-эмиссионный способ диагностирования металлических конструкций / Степанова Л. Н., **Бехер С. А.**, Бобров А. Л. – № 2013124375/28 ; заявл. 27.05.2013 ; опубл. 10.01.2015, Бюл. № 1. – 12 с. : ил.

28. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619321. Программа определения силовых показателей динамики взаимодействия колес и рельсов и поиска дефектов поверхности катания колес грузовых вагонов в движении с использованием тензометрии / Коломеец А. О., Попков А. А., **Бехер С. А.** – № 2013617321 ; заявл. 13.08.2013 ; рег. 01.10.2013. – 1 с.

29. Пат. 2499237 С2 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 L 5/20. Быстродействующий преобразователь сопротивления резистивных датчиков в электрический сигнал / Степанова Л. Н., Кабанов С. И., Лебедев Е. Ю., Ельцов А. Е., **Бехер С. А.**, Кочетков А. С. – № 2010131278/28 ; заявл. 26.07.2010 ; опубл. 20.11.2013, Бюл. № 32. – 13 с. : ил.

30. Пат. 2480711 С2 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 B 7/34. Способ обнаружения дефектов поверхности катания колес железнодорожных транспортных средств в движении / **Бехер С. А.**, Степанова Л. Н., Кочетков А. С. – № 2011120545/28 ; заявл. 20.05.2011 ; опубл. 27.11.2012, Бюл. № 33. – 10 с. : ил.

31. Пат. 2431139 С1 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 N 29/14. Способ акустико-эмиссионного контроля сосудов, работающих под давлением, и устройство для его осуществления / **Бехер С. А.**, Бобров А. Л. – № 2010116971/28 ; заявл. 29.04.2010 ; опубл. 10.10.2011, Бюл. № 28. – 10 с. : ил.

32. Пат. 2424533 С2 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 R 27/02. Измерительный преобразователь быстродействующей тензометрической системы / Степанова Л. Н., **Бехер С. А.**, Кабанов С. И., Кочетков А. С., Лебедев Е. Ю. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» (СГУПС). – № 2009118904/28 ; заявл. 19.05.2009 ; опубл. 20.07.2011, Бюл. № 20. – 14 с. : ил.

33. Пат. 2391656 С2 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 N 29/14. Акустико-эмиссионный способ диагностирования колец подшипников буксового узла железнодорожного транспортного средства и устройство для его осуществления / Степанова Л. Н., **Бехер С. А.**, Кабанов С. И., Тенитилов Е. С. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» (СГУПС). – № 2008126353/28 ; заявл. 27.06.2008 ; опубл. 10.06.2010, Бюл. № 16. – 16 с. : ил.

34. Пат. 2391655 С2 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 N 29/14. Способ диагностирования металлических мостовых конструкций и устройство для его осуществления / Степанова Л. Н., **Бехер С. А.**, Власов К. В., Кабанов С. И. ; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» (СГУПС). – № 2008107657/28 ; заявл. 27.02.2008 ; опубл. 10.06.2010, Бюл. № 16. – 16 с. : ил.

35. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2010612114. Программа обработки результатов акустико-эмиссионных испытаний резервуаров / **Бехер С. А.** ; заявитель и правообладатель **С. А. Бехер**. – № 2010610610 ; заявл. 01.02.2010 ; рег. 19.03.2010. – 1 с.

**Зарегистрированные результаты научно-исследовательской работы**

36. Разработка методики контроля дефектов поверхности катания колес и ходовых частей вагонов в движении по показателям динамики взаимодействия колес и рельсов : отчет о НИР (заключ.) : СГУПС ; рук. Л. Н Степанова ; исполн.: **С. А. Бехер**, С. И. Кабанов, А. С. Кочетков. – Новосибирск, 2011. – 430 с. – Рег. № 01201156919.

37. Разработка стенда для акустико-эмиссионного метода неразрушающего контроля и прогнозирования ресурса локомотива (по перечню ЦТ) : отчет о НИР (заключ.) : 7.1.003.Н.ЦТМ (7.8.02) / ЦНТИБ – филиал ОАО «РЖД» ; рук. В. В. Муравьев; исполн.: Е. В. Бояркин, С. И. Снежков, **С. А. Бехер** и др. – М., 2009. – 468 с. – Рег. № 05307106.

**БЕХЕР СЕРГЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ**

**МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКИ НАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ПРИ РЕМОНТЕ И В ЭКСПЛУАТАЦИИ НА  
ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕНЗОМЕТРИИ И  
АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ**

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук  
по специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,  
веществ, материалов и изделий

---

Подписано в печать « » апреля 2017 г.  
Печ. л. 2,0 Тираж 100 экз. Заказ № \_\_\_\_\_  
Отпечатано в издательстве ФГБОУ ВО  
«Сибирский государственный университет путей сообщения»  
Адрес: 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191

---