

На правах рукописи

Муравьев Тимофей Витальевич

**ИНФОРМАТИВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ АКУСТИЧЕСКИХ
СИГНАЛОВ ПРИ НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННЫХ ДЕТАЛЕЙ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург - 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук
Институте физики прочности и материаловедения СО РАН
и Сибирском государственном университете путей сообщения

Научный руководитель: *доктор физико-математических наук,
профессор Зуев Лев Борисович*

Официальные оппоненты: *доктор физико-математических наук,
профессор Ринкевич Анатолий Брониславович*
*доктор технических наук,
профессор Смирнов Александр Николаевич*

Ведущая организация: *Научно-исследовательский институт интроскопии
Томского политехнического университета*

Защита состоится « 28 » декабря 2010 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д004.023.01 в Учреждении Российской академии наук Институте машиноведения УрО РАН по адресу: 620049, г. Екатеринбург, ГСП-207, ул. Комсомольская, д. 34. E-mail: avk@imach.uran.ru, тел. (343) 375-35-61

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института машиноведения УрО РАН.

Автореферат разослан « 26 » ноября 2010 г.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью организации просим направлять по указанному адресу диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Коновалов А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Надежность и долговечность технических устройств железнодорожного транспорта в значительной степени зависят от результатов их диагностирования и неразрушающего контроля. Несущие элементы металлоконструкций пути (рельсы), детали буксового узла колесной пары (внутренние кольца подшипников на оси) циклически нагружаются при эксплуатации, что совместно с высоким уровнем остаточных напряжений и накопленными микроповреждениями приводит к трещинообразованию, разрушению и катастрофическим последствиям.

Современная концепция технической диагностики и неразрушающего контроля базируется на методах обнаружения дефектов в виде разрывов сплошности, снижающих прочность сечений механически нагруженных деталей машин и конструкций. Совершенствование методов и средств неразрушающего контроля в последние десятилетия позволило существенно поднять чувствительность и надежность выявления дефектов в металлоконструкциях. Однако, несмотря на высокую техническую и методическую оснащенность неразрушающего контроля и жесткий технический контроль надзорными органами, техногенные аварии продолжают происходить. Более того, нередко ситуации, когда разрушения конструкций, аварии и крушения на транспорте происходили сразу после планового дефектоскопического и технического освидетельствования объектов. Налицо противоречие между опасным уровнем техногенных аварий с одной стороны, и весьма высоким уровнем развития методов и средств дефектоскопии, квалификацией персонала, а также методов расчета конструкций с другой. Таким образом, проблема оценки текущего технического состояния инженерных конструкций и деталей машин транспорта является весьма **актуальной**.

Процесс разрушения материалов начинается с локализации пластической деформации вблизи структурных неоднородностей и концентраторов напряжения, вызывающей формирование зоны деформации, накопление в ней дефектов и образование трещин. Закономерности формирования и размер зоны зависят от структуры материала и локального напряженного состояния. Условиями разрушения являются концентрация механических напряжений и их высокий градиент. Дефект зарождается в месте концентратора напряжений и развивается в направлении градиента. Для гарантии безопасной работы требуется не только дефектоскопия, констатирующая наличие дефекта, но и оценка локальных внутренних напряжений.

Перспективные варианты оценки напряженно-деформированного состояния металлов связаны с акустическими методами, основанными на измерении характеристик упругих волн в контролируемой среде. К их преимуществам следует отнести возможность оценки не только поверхностных, но и внутренних напряжений в объеме материала (за счет многообразия типов используемых волн); оперативность контроля, достаточно высокую разрешающую способность и возможность проведения измерений непосредственно на контролируемых объектах в процессе эксплуатации.

Во всех случаях в основе акустического воздействия на объект контроля в напряженно-деформированном состоянии лежат поля одной природы, поэтому оценка технического состояния металлоконструкций акустическими методами наиболее достоверна. Использование акустической эмиссии как дополнительного метода по-

звolyет повысить информативность оценки напряженно-деформированного состояния и дает возможность определения его особенностей.

Проблема точной оценки внутренних напряжений массивных объектов остается нерешенной как аналитически, так и экспериментально. Исследование информативных параметров объемных акустических волн в процессе их распространения в прессовом соединении внутреннего кольца и оси колесной пары, изучение волн акустической эмиссии, в зависимости от величины, направления и вида деформаций в рельсах, существенно расширяют возможности акустических методов контроля для разработки эффективных средств неразрушающего контроля рельсов, сварных стыков рельсов, колец подшипников, что, в конечном счете, повысит безопасность движения.

Объектом исследования являются информативные характеристики акустических сигналов, используемых при неразрушающем контроле металлоконструкций железнодорожного транспорта в напряженно-деформированном состоянии.

Предмет исследования: физико-математические модели распространения акустических волн через прессовое соединение, методическое обеспечение акустико-эмиссионных методов контроля образцов из углеродистых и легированных сталей, рельсов, сварных стыков рельсов, резонансных методов контроля прессовых соединений колец подшипников на шейке оси колесной пары.

Цель диссертационной работы состоит в исследовании информативных характеристик акустических сигналов, распространяющихся в рельсах, их сварных стыках, кольцах подшипников на шейке оси колесной пары вагона, находящихся в напряженно-деформированном состоянии и выработка научно-обоснованных рекомендаций для разработки методик неразрушающего контроля.

Задачи исследования:

1. Теоретические и экспериментальные исследования особенностей распространения акустических сигналов в зависимости от плотности посадки внутренних колец подшипника на шейке оси колесной пары с учетом мешающих факторов. Обоснование рекомендаций по разработке методик контроля степени натяга колец подшипников.

2. Анализ характеристик сигналов акустической эмиссии при упруго-пластическом деформировании на примере стали 09Г2С и разработка методики исследования процессов движения зоны локализованной пластической деформации.

3. Исследование потоковых характеристик сигналов акустической эмиссии в процессе изменения термонапряженного состояния при стыковой электроконтактной сварке рельсов.

4. Анализ основных параметров волны напряжения в процессе движения поезда с применением тензометрирования для разработки методики акустико-эмиссионного контроля железнодорожных рельсов.

Научная новизна

1. Разработана модель процесса распространения упругих волн через прессовое соединение, основанная на явлении ограниченной прозрачности пограничного слоя двух сопрягаемых деталей, учитывающая величину натяга, акустические свойства слоя и деталей, геометрию и внутренние напряжения в кольце, частоту волны.

2. Исследованы передаточные характеристики процессов распространения волн на резонансных частотах прессового соединения, позволяющие обосновать выбор частот и чувствительность акустического метода контроля плотности посадки внутреннего кольца подшипника на шейке оси колесной пары.

3. Предложен метод визуализации процесса движения локализованных полос пластической деформации с использованием метода акустической эмиссии, что позволяет прогнозировать место образования шейки и разрыва образца.

4. Выявлены основные информативные параметры сигналов акустической эмиссии, возникающих при остывании сварных стыков для дефектных и бездефектных соединений. Обоснован рабочий интервал температур акустико-эмиссионного контроля рельсов на рельсосварочном предприятии.

5. Обоснован способ регистрации акустических сигналов при напряженно-деформированном состоянии рельса, обусловленном возникновением резонанса по длине пролетного строения моста на волне изгиба, распространяющейся в рельсе под нагрузкой от проходящего поезда.

Защищаемые положения

1. Расчет акустического тракта при распространении акустических сигналов в прессовом соединении кольца и оси.

2. Результаты экспериментальных исследований процессов распространения акустических сигналов в кольцах и шейках осей колесных пар.

3. Методика визуализации процесса движения локализованных полос пластической деформации с использованием метода акустической эмиссии.

4. Результаты экспериментальных исследований процессов распространения акустико-эмиссионных сигналов в рельсах в условиях термических нагрузок на рельсосварочном предприятии.

5. Способ определения условий регистрации сигналов системой АЭ контроля по соотношению продольной и поперечной деформаций конструкций моста в условиях движущейся поездной нагрузки.

Практическая ценность работы

1. Доказано, что при проектировании методик и средств акустического контроля степени посадки следует руководствоваться с одной стороны требованиями минимальных потерь при прохождении сигнала по объекту, с другой стороны, достаточно крутой и однозначной зависимостью характеристик сигнала, в частности выраженности резонанса, от величины зазора сопрягаемых деталей. Экспериментальные результаты позволили выявить факторы, влияющие на работу УЗ прибора и учесть их при его совершенствовании, а теоретические расчеты обосновывают применение методики контроля степени натяга подшипников.

2. Методика визуализации процесса движения локализованных полос пластического течения с применением метода акустической эмиссии используется в научных исследованиях в ИФПМ СО РАН и учебном процессе в СГУПСе.

3. Доказано, что акустико-эмиссионный контроль указывает на дефектное состояние объекта при использовании в качестве нагружающего воздействия - градиент температур, который возникает при остывании стыка рельсов на рельсосварочном предприятии сразу после сваривания. Результаты работы могут быть использованы при разработке методики контроля сварных соединений рельсов в процессе

остывания, основанной на анализе постоянства потоковых характеристик сигналов от сварного шва после выполнения электроконтактной сварки.

4. Обоснована достаточность уровня напряженно-деформированного состояния, создаваемого весом проходящего поезда, для акустоэмиссионного диагностирования рельсов, уложенных на мосту. Разработанный с соавторами «Способ диагностирования рельсовых плетей металлического моста и устройство для его осуществления» запатентован.

Методы исследования. В работе представлены материалы, полученные на основе метода акустической эмиссии, ультразвукового, тензометрического, оптического (спекл-фотография) методов, а так же визуального контроля. Решение поставленных задач осуществлялось с использованием сертифицированного оборудования. Исследования проводились в соответствии с требованиями нормативной документации, утвержденной Госстандартом и Ростехнадзором РФ. Анализ точности определения места положения источников акустической эмиссии проводился по результатам экспериментов проведенных в лабораторных и цеховых условиях. При обработке полученной информации использовались методы математической статистики.

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается физической обоснованностью решаемых задач, применением фундаментальных положений акустики и механики деформируемого твердого тела, решением поставленных задач с использованием современного поверенного сертифицированного оборудования, большим объемом экспериментальных данных и сопоставлением полученных результатов с результатами других исследователей.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации апробированы на 15–ти Международных и Российских научных конференциях:

Научно-техническая конференция «Наука и молодежь XXI века», Новосибирск, 2002. Межвузовская научная студенческая конференция "Интеллектуальный потенциал Сибири", Новосибирск, 2002. Студенческая конференция «Дни науки – 2002», Новосибирск. Студенческая конференция «Дни науки – 2003», Новосибирск. Научно-техническая конференция "Наука и молодежь XXI века", Новосибирск, 2003. Межвузовская научная студенческая конференция "Интеллектуальный потенциал Сибири", Новосибирск, 2004. 2-я Евразийская научно-практическая конференция “Прочность неоднородных структур - ПРОСТ”, Москва, 2004. 5-я Региональная школа-семинар молодых ученых «Современные проблемы физики, технологии и инновационного развития», Томск, 2004. Научно-производственный форум «Экологические проблемы и техногенная безопасность строительства, эксплуатации и реконструкции нефтегазопроводов. Новые технологии и материалы», Томск, 2005. XVII Российская научно-техническая конференция «Неразрушающий контроль и диагностика», Екатеринбург, 2005. 7-ая научно-практическая конференция "Безопасность движения поездов", Москва, 2006. 9-ая Международная конференция «Градиентные структурно-фазовые состояния в сталях и сплавах», Новокузнецк, 2006. International Conference NDE for Safety. European Federation for NDT, Prague, Czech, 2007. 1-я Всероссийская научно-техническая конференция «Измерение, контроль и диагностика», Ижевск, 2010. 6-я Российская конференция «Механика микронеоднородных материалов и разрушение», Екатеринбург, 2010.

Личный вклад автора заключается в постановке задач исследования, разработке модели процесса распространения упругих волн через прессовое соединение, разработке и изготовлении вспомогательных устройств и средств сопряжения аппаратурных комплексов при выполнении экспериментов, создании методик обработки сигналов, планировании экспериментов, в анализе результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Публикации. Результаты диссертации изложены в 22-х публикациях, в т.ч. 3-х статьях по списку ВАК, Патенте на изобретение и материалах конференций.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 153 страницах, состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка используемой литературы из 151 наименований. Диссертация включает 53 рисунков, 3 таблицы и 3 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, показана научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приводятся основные положения, выдвигаемые на защиту.

В **первой Главе** приводится обзор литературы по видам напряжений, в том числе железнодорожных изделий. Проводится анализ методов оценки напряженно-деформированного состояния в металлических изделиях и конструкциях. Подробно рассматриваются характеристики акустических и акустико-эмиссионных методов, позволяющие оценивать напряженно-деформированное состояние прессовых и сварных соединений. Обосновывается цель и постановка задач исследования.

Во **второй Главе** представлена модель процесса распространения акустических волн через прессовое соединение внутреннего кольца подшипника и оси колесной пары и проведены расчеты основных информативных параметров акустических волн в зависимости от степени натяга в прессовом соединении.

В процессе передачи акустического сигнала через прессовое соединение кольца подшипника и оси колесной пары могут иметь место потери энергии, обусловленные двумя основными причинами: ограниченной прозрачностью слоя между кольцом и осью, отличающейся при различных степенях натяга; отражением от границы кольцо – ось вследствие различия в скоростях упругих волн напряженного металла кольца и свободного от напряжений металла оси.

На величину натяга существенное влияние оказывает зазор между кольцом и шейкой оси, обусловленный влиянием ряда факторов: конусность оси и кольца (допуск ± 10 мкм); эллипсность оси и кольца (допуск ± 10 мкм); волнообразность соприкасаемых поверхностей (10 мкм); шероховатость поверхности оси (R_a 6,3 мкм); малозначительные дефекты поверхности кольца и шейки оси; температура сопрягаемых деталей и окружающей среды. В общем случае величина зазора является неравномерной. При моделировании предполагается, что величина зазора может меняться от максимального значения 20 мкм, ограниченного допуском на конусность, эллипсность и волнообразность, в случае, когда натяг отсутствует (степень натяга 0), до среднего значения R_a 0,6 мкм, ограниченного шероховатостью поверхности кольца, когда степень натяга составляет 60 мкм и более. Таким образом, диа-

пазон значений зазора от 0,6 мкм до 20 мкм соответствует различной степени натяга от 0 до 60 мкм.

Отражение и прохождение волн через слой толщиной h с волновым сопротивлением Z_2 , помещенный между двумя средами с волновыми сопротивлениями Z_1 и Z_3 для случая нормального падения описывается выражениями для коэффициентов отражения R и прозрачности D по амплитуде, полученными Л.М. Бреховских:

$$R = \frac{(Z_1 + Z_2)(Z_2 - Z_3)\exp(-2i\varphi) + (Z_1 - Z_2)(Z_2 + Z_3)}{(Z_1 + Z_2)(Z_2 + Z_3)\exp(-2i\varphi) + (Z_1 - Z_2)(Z_2 - Z_3)}, \quad (1)$$

$$D = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 - Z_2)(Z_2 - Z_3)\exp(i\varphi) + (Z_1 + Z_2)(Z_2 + Z_3)\exp(-i\varphi)}, \quad (2)$$

где $\varphi = k_2h = \omega h / C_2$ - набег фазы плоской волны частоты ω при распространении через слой; C_2 - скорость продольной волны в слое.

Анализ формул (1) и (2) показывает, что зависимости R и D являются гармоническими функциями параметра $\omega h / C_2$. Максимумы R имеют место при условии $h = (2n-1)\lambda_2 / 4$, максимумы коэффициента прозрачности D - при $h = n\lambda_2 / 2$, $n=1,2,3$, n - целое число, λ_2 - длина волны в слое. В качестве примера на рис.1 представлены кривые зависимостей коэффициента прозрачности D и коэффициента отражения R от частоты f для воздушного зазора фиксированной толщины h .

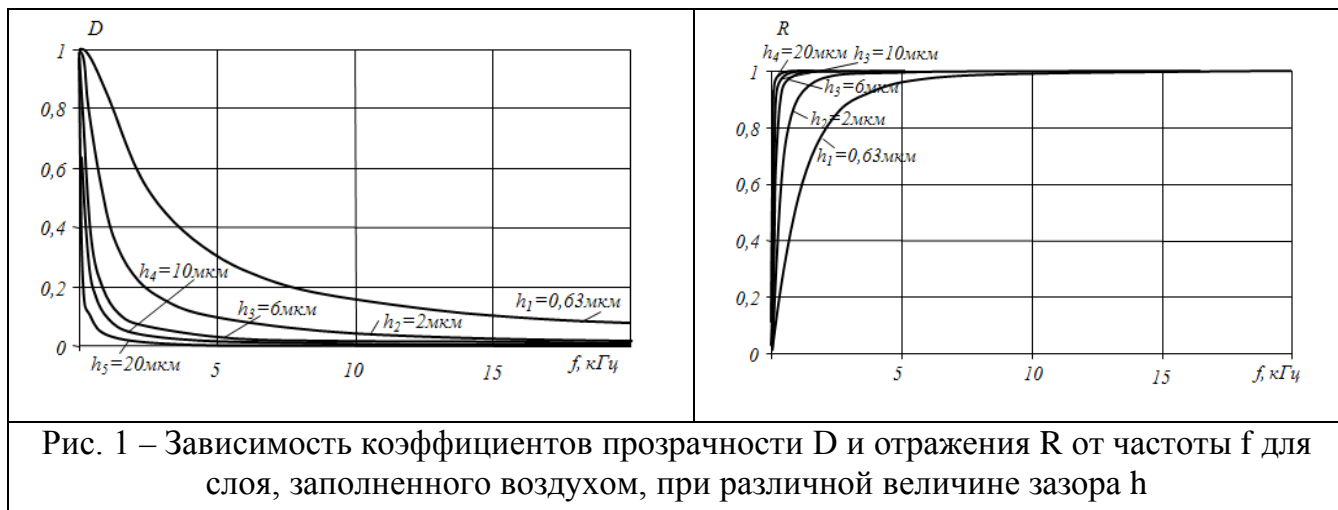


Рис. 1 – Зависимость коэффициентов прозрачности D и отражения R от частоты f для слоя, заполненного воздухом, при различной величине зазора h

Функции $R(f)$ и $D(f)$ в выражениях (1)-(2) представляют собой передаточные амплитудно-частотные функции $H(f)$ процессов отражения и прозрачности и могут влиять на выраженность отдельных резонансов, формирование которых обусловлено прохождением или отражением волн от слоя, при различной величине зазора.

Прессовое соединение кольца и шейки оси представляют собой сложную колебательную систему, в которой возможно формирование ряда низкочастотных резонансов: по толщине всего соединения, по толщине кольца и диаметра шейки оси, по толщине кольца подшипника. В частности, для резонанса по толщине кольца d_2 и диаметра шейки d_3 оси:

$$d_2 + d_3 = (2n + 1) \frac{C_l}{2F_{Rn}}, \quad (3)$$

где C_l - скорость продольной акустической волны, n - целое число.

На рис.2 представлены зависимости передаточной характеристики $H(f) \sim D^2 R$ прессового соединения от величины зазора h для слоя, заполненного воздухом, на резонансных частотах в соответствии с формулой (3).

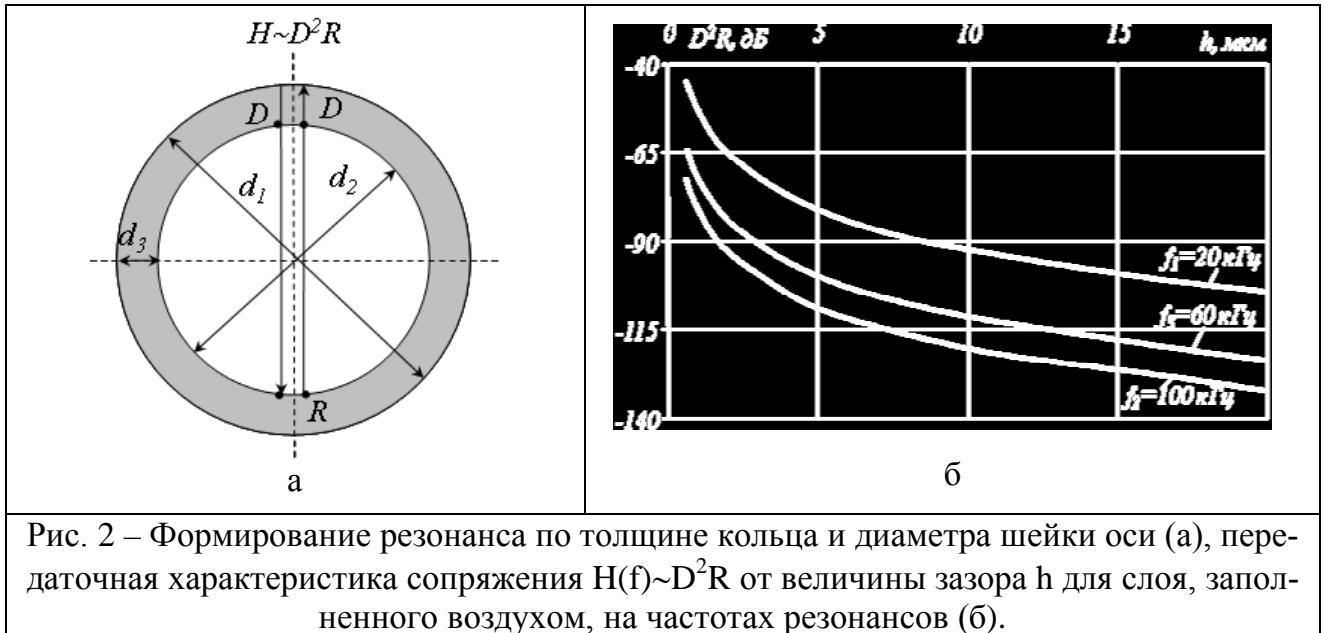


Рис. 2 – Формирование резонанса по толщине кольца и диаметра шейки оси (а), передаточная характеристика сопряжения $H(f) \sim D^2 R$ от величины зазора h для слоя, заполненного воздухом, на частотах резонансов (б).

Для прессового соединения, выполненного через слой воздуха, наиболее оптимальным является использование резонансного метода на низких частотах. Указанным требованиям наилучшим образом удовлетворяет передаточная характеристика $H(f) \sim D^2 R$ (рис. 2,б). Максимальное ослабление сигнала не превышает 100 дБ, при крутизне зависимости в 60 дБ в диапазоне исследуемых значений степени натяга.

Иногда при горячей посадке сопрягаемые поверхности покрываются слоем лака или масла. В отличие от случая воздушного зазора заметные изменения наблюдаются лишь в области высокочастотного диапазона (1...5 МГц). В отличие от слоя, заполненного воздухом, передаточные характеристики $H \sim D^2 R$ являются неоднозначными, что не позволяет использовать последние в методиках контроля степени натяга. Это объясняется формированием собственных резонансов характеристики $H \sim D^2 R$ в исследуемом диапазоне частот вследствие противоположного характера зависимостей коэффициентов отражения и прозрачности.

Для прессового соединения, выполненного через слой масла или лака, низкочастотный метод реализовать нельзя ввиду отсутствия крутой зависимости передаточных характеристик от величины зазора. Тем не менее, измерения степени натяга могут быть выполнены с использованием эхо-импульсного метода на частотах мегагерцового диапазона. Анализ передаточных характеристик показывает, что наилучшей для использования в методике измерений является характеристика $H \sim D^4$. Максимальное ослабление сигнала не превышает 100 дБ, при крутизне зависимости в 63 дБ для слоя масла, и 30 дБ для слоя лака в диапазоне исследуемых значений степени натяга.

Другой возможной причиной изменения передаточных характеристик упругой волны при прохождении и отражении ее в прессовом соединении является различие в напряженном состоянии металла оси и кольца роликоподшипника. Проведя аналогию с задачей Ламе о распределении напряжений в толстостенной трубе под

действием равномерного внутреннего радиального давления, полагаем, что касательные напряжения вдоль образующей кольца являются сжимающими и меняются от максимального значения на внутренней поверхности кольца до нуля на его наружной поверхности. В соответствии с известными экспериментальными данными зависимости скорости поперечной горизонтально поляризованной волны C_{tH} от напряжений в кольце в диапазоне значений натяга от 1 до 85 мкм скорость изменяется от 0,08% до 0,2% (рис. 3). При этом коэффициенты отражения R и прозрачности D через границу соединения определяются разницей в акустических сопротивлениях граничащих сред ненапряженного металла оси $Z_2 = \rho C_t$ и напряженного металла кольца $Z_1 = \rho C_{tH}$:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (4)$$

$$D = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}. \quad (5)$$

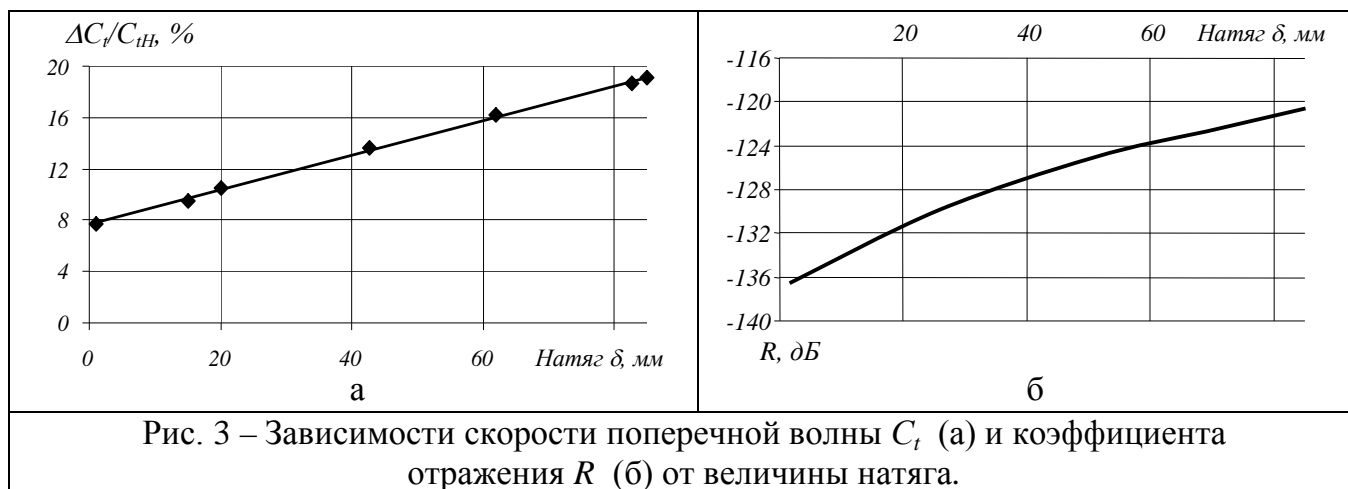


Рис. 3 – Зависимости скорости поперечной волны C_t (а) и коэффициента отражения R (б) от величины натяга.

Анализ передаточных характеристик, полученных на основании различия в напряженном состоянии металла оси и кольца роликоподшипника показывает, что коэффициент отражения R изменяется на 15 дБ при изменении величины натяга от 1 до 85 мкм. Отсюда следует принципиальная возможность контроля степени натяга по величине коэффициента отражения с использованием поперечной горизонтально поляризованной волны на высоких частотах. При использовании этой характеристики отсутствует зависимость от акустических свойств промежуточной среды, через которую выполнено соединение.

В **третьей Главе** спланированы эксперименты с измерениями значимых параметров на образцах и кольцах, изложены методические приемы, описаны лабораторные установки и нагружающие устройства, приборы для исследований и неразрушающего контроля напряжений. Для измерения натяга посаженных колец на шейках осей колёсных пар использован прибор УДС-СИН, реализующий интегрально – резонансный метод ультразвуковой дефектоскопии, основанный на влиянии величины натяга и толщины прослойки между двумя слоями материала на количество отраженных эхо импульсов (б).

$$H = K \cdot N - A, \quad (6)$$

где H – разность диаметров внутреннего кольца и оси колесной пары, мкм; K – постоянный коэффициент, учитывающий свойства слоя и материала; A – константа, мкм; N – число зарегистрированных отраженных эхо импульсов.

Для тарировки прибора на различных уровнях натяга разработан лабораторный стенд, включающий нагружающее устройство для имитации посадки с различным натягом и электрические тензопреобразователи с измерительной тензосистемой для контроля напряжений. Тензопреобразователи наклеивались на поверхность кольца вдоль огибающей и по образующей в трёх местах в пределах 1/3 части рабочей поверхности. Сопротивление тензорезистора – 200 Ом; база – 20 мм; коэффициент тензочувствительности – 2,1. Суммарная погрешность измерений составила $\pm 5\%$. Результаты измерений представляются трёхмерной зависимостью – спектроэхограммой, где по осям абсцисс и ординат меняется количество пакетов импульсов и частота в каждом пакете соответственно. Полученные зависимости использовались для калибровки прибора УДС1-СИН, разработанном в СГУПС.

Для исследования влияния несплошностей и структурного состояния сопрягаемых деталей на измеряемые характеристики прибора подготовили образцы из среднеуглеродистой стали 40 в состоянии отжига, закалки и отпусков, а также с искусственными дефектами. Полученные спектроэхограммы показывают различие в дефектности образцов (рис. 4) и влияние термической обработки (рис. 5).

На спектроэхограммах видны различия по энергии импульсов на разной частоте колебаний. Повторяемость вида спектроэхограмм для образцов, имеющих одинаковые дефекты или термическую обработку, достаточно высока. Об изменившейся твёрдости после произведенной закалки можно судить по значениям произведения NF . Однако, графики спектроэхограмм при смешанных воздействиях различных факторов не позволяют однозначно судить о местоположении дефекта и степени его опасности, поскольку на построение картины влияют другие факторы, такие как степень натяга, текстура материала.

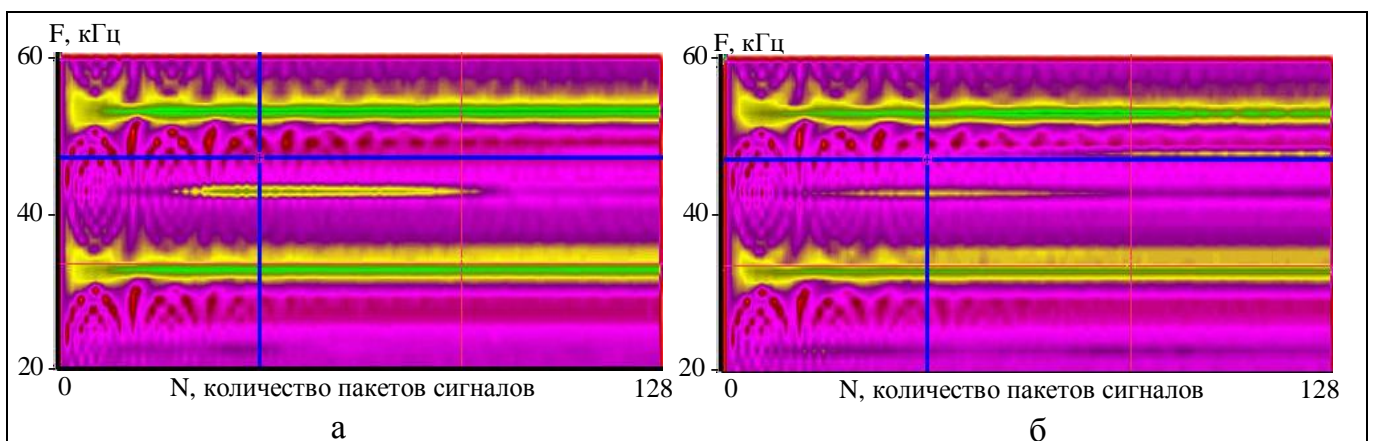


Рис. 4 – Спектроэхограммы образца с просверленным до середины отверстием – (а) и отверстием насквозь (б).

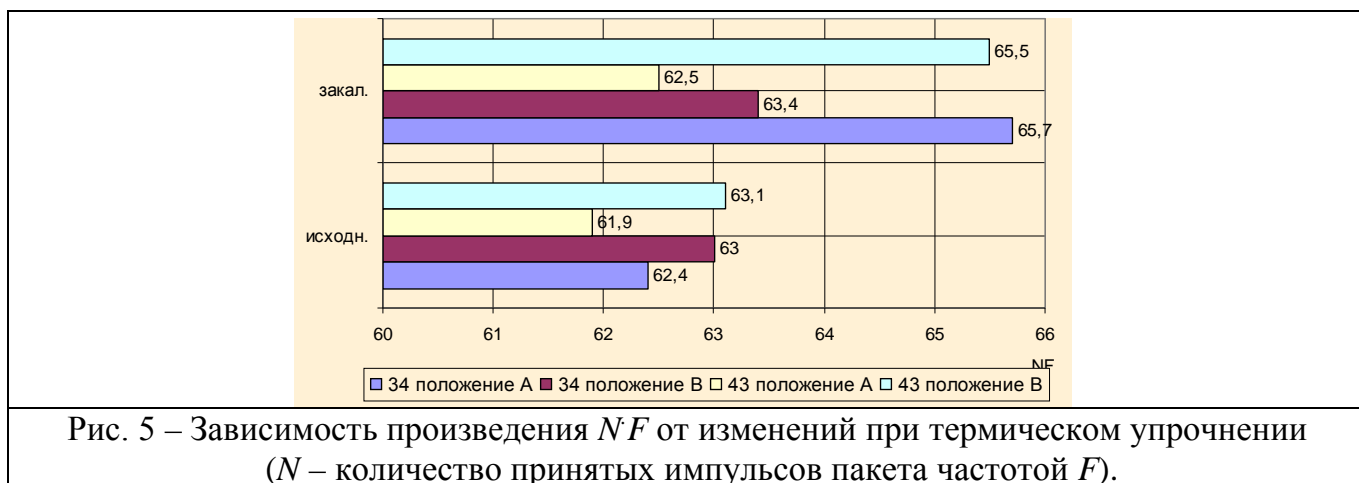


Рис. 5 – Зависимость произведения NF от изменений при термическом упрочнении (N – количество принятых импульсов пакета частотой F).

В четвертой Главе описываются эксперименты, показывающие тесную связь характеристик сигналов акустической эмиссии (АЭ) со структурными неоднородностями материала и с развитием локализации пластической деформации при нагружении металлических образцов растяжением. Теория пластической деформации подразумевает дискретность процессов на всех стадиях деформации, следовательно, при испускании энергии в ультразвуковом диапазоне превалирует дискретная АЭ. Поэтому в работе использовался метод локализации по разности времен прихода сигналов.

Комплекс состоял из испытательной машины *Instron-1185*, акустико-эмиссионной системы СЦАД 16.02 и установки спекл-видеосъемки для визуализации локализации пластической деформации. В работе использовались образцы из стали 09Г2С толщиной 2 мм, шириной 12 мм, длиной рабочей части 50 мм при общей длине 145 мм. Перед испытаниями образцы отжигались. Преобразователи АЭ (ПАЭ) устанавливались на недеформируемых площадках на расстоянии 80 мм рядом с захватами испытательной машины. Скорость нагружения образца – 1 мм/мин. Работа АЭ комплекса, испытательной машины *Instron-1185*, а также установки спекл-видеосъемки синхронизированы по времени при проведении эксперимента. Ошибка в синхронизации не превышает 1 секунды.

Для визуального представления картины локализации, зарегистрированный аппаратурой сигнал отображается точкой на линии, соединяющей 2 ПАЭ. При построении зависимости в каждый момент времени получаем распределение координат сигналов АЭ по времени испытания объекта – картину локализации источников АЭ. Погрешность определения координаты зависит от точности определения времени прихода сигнала на ПАЭ. Суммарный счёт АЭ при каждом испытании достигал 6 тысяч и более сигналов. Из них менее трети локализуется в рабочей зоне образца (рис. 6). Штриховыми линиями выделена рабочая часть образца, увеличивающаяся в связи с деформацией в течение времени испытания.

Кривая σ - ε деформации стали 09Г2С содержит упругий участок, площадку текучести и стадию параболического деформационного упрочнения. Параметры сигналов АЭ соответствуют этим стадиям. Анализ данных регистрации АЭ позволяет выделить эти стадии в процессе испытания. Сигналы, регистрируемые в начале процесса, являются, в основном, откликами микродеформаций вследствие трения

захватов испытательной машины о поверхность площадок образца. Эти сигналы имеют наибольшую активность и амплитуду.

На стадии площадки текучести отчётливо наблюдается развитие локализации пластической деформации в виде движения полос скольжения Чернова-Людерса. Этот процесс был зафиксирован спекл-видеосъёмкой. Движение полос сопровождалось локализацией АЭ из соответствующих зон излучения. Для подтверждения соответствия показаний, была вычислена скорость перемещения полосы скольжения по данным локализации АЭ и спекл-видеосъёмки на некотором отрезке времени (рис. 6 – вставка). Скорость движения равна 0,8 мм/с в обоих случаях. Ширина зоны излучения на образце, которая составляет 20...23 мм, совпадает с шириной трека АЭ на картине линейной локализации. Это подтверждает соответствие описываемых явлений.

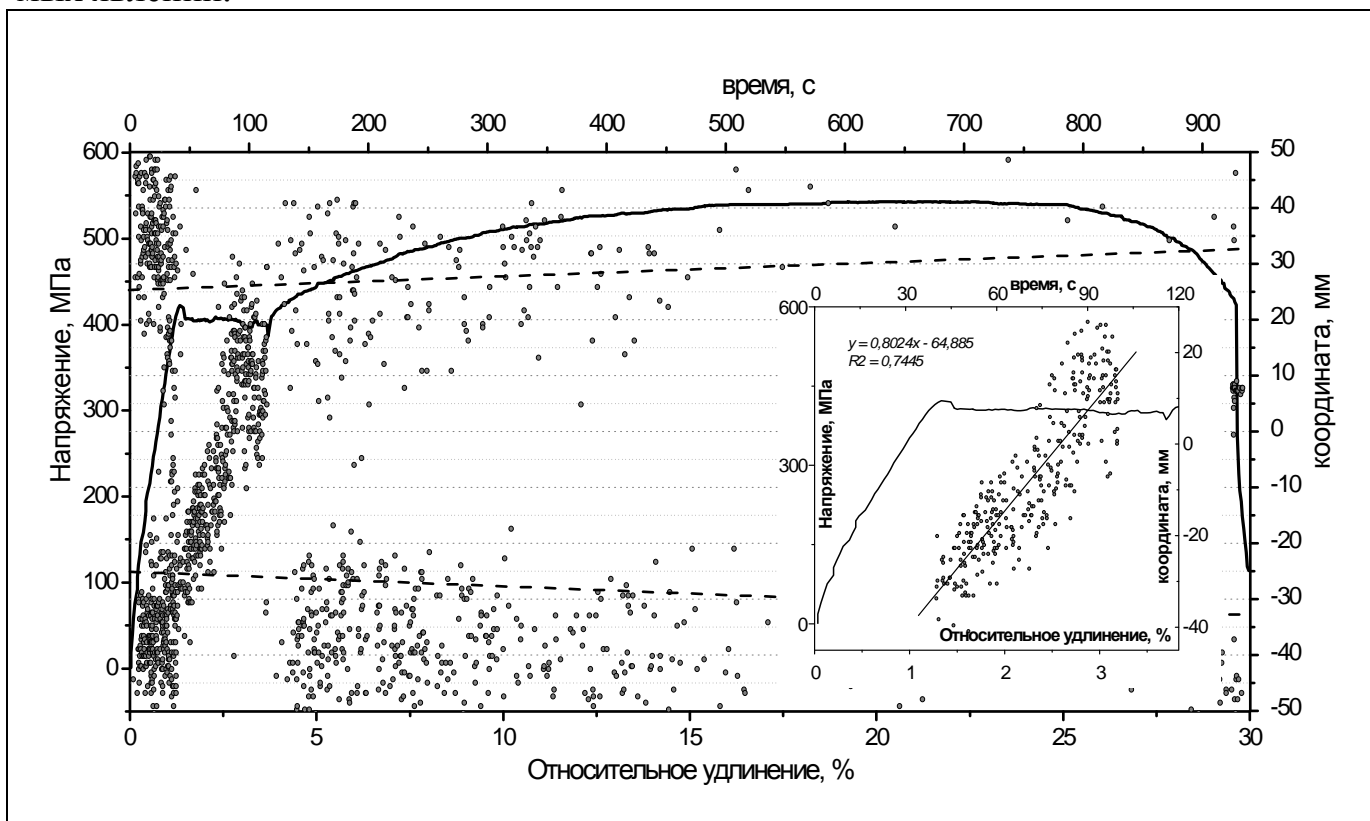


Рис. 6 – График нагружения σ - ε образца совмещённый с локализацией сигналов АЭ по времени. На вкладке – определение скорости движения полосы локализации

Локализация деформации на стадии площадки текучести происходила с участием двух полос (рис. 7). При этом замечено, что энергия АЭ между полосами делится таким образом, что суммарная её величина, остаётся постоянной. Двигаясь навстречу друг другу полосы сближаются и, в конечном итоге аннигилируют. Такая схема развития пластической деформации характерна для всех образцов исследуемого материала, но взаимное соотношение координат источников множественной АЭ (полос деформации Чернова-Людерса) во времени – индивидуально.

На рис. 8 представлены совмещённая диаграмма кривой нагружения и локализации АЭ, а также слайды из спекл-видеосъёмки нагружаемого образца, выбранные в моменты времени t_1 , t_2 и t_3 на площадке текучести, показывающие соответствующие наблюдаемые явления.

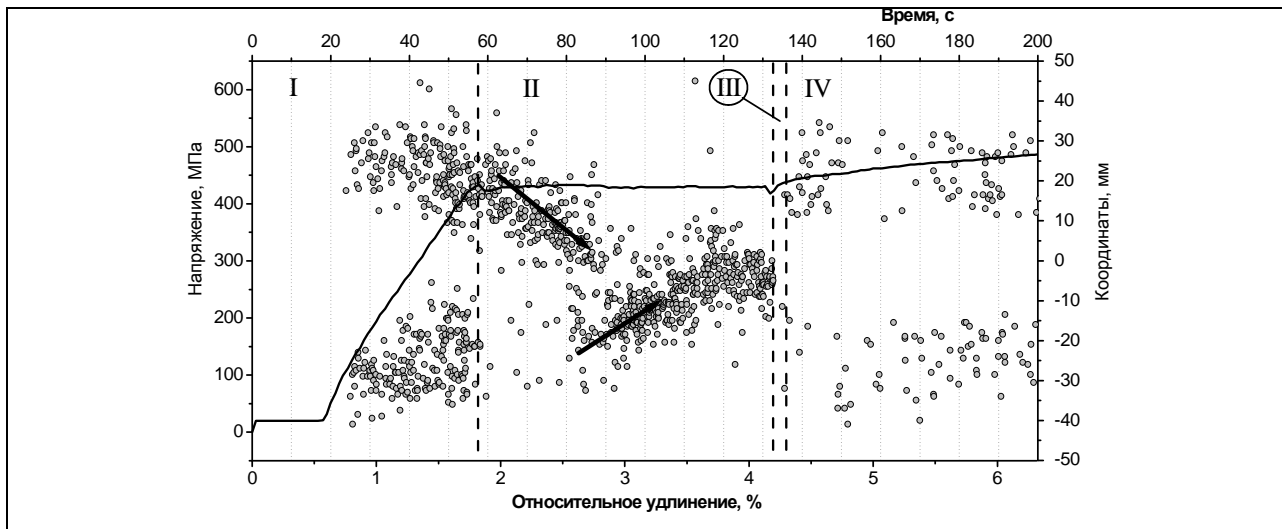


Рис. 7 – Схема движения полос локализации деформации на стадии площадки текучести. I – стадия упруго-пластическая; II – площадка текучести; III – "зона молчания"; IV – стадия параболического упрочнения.

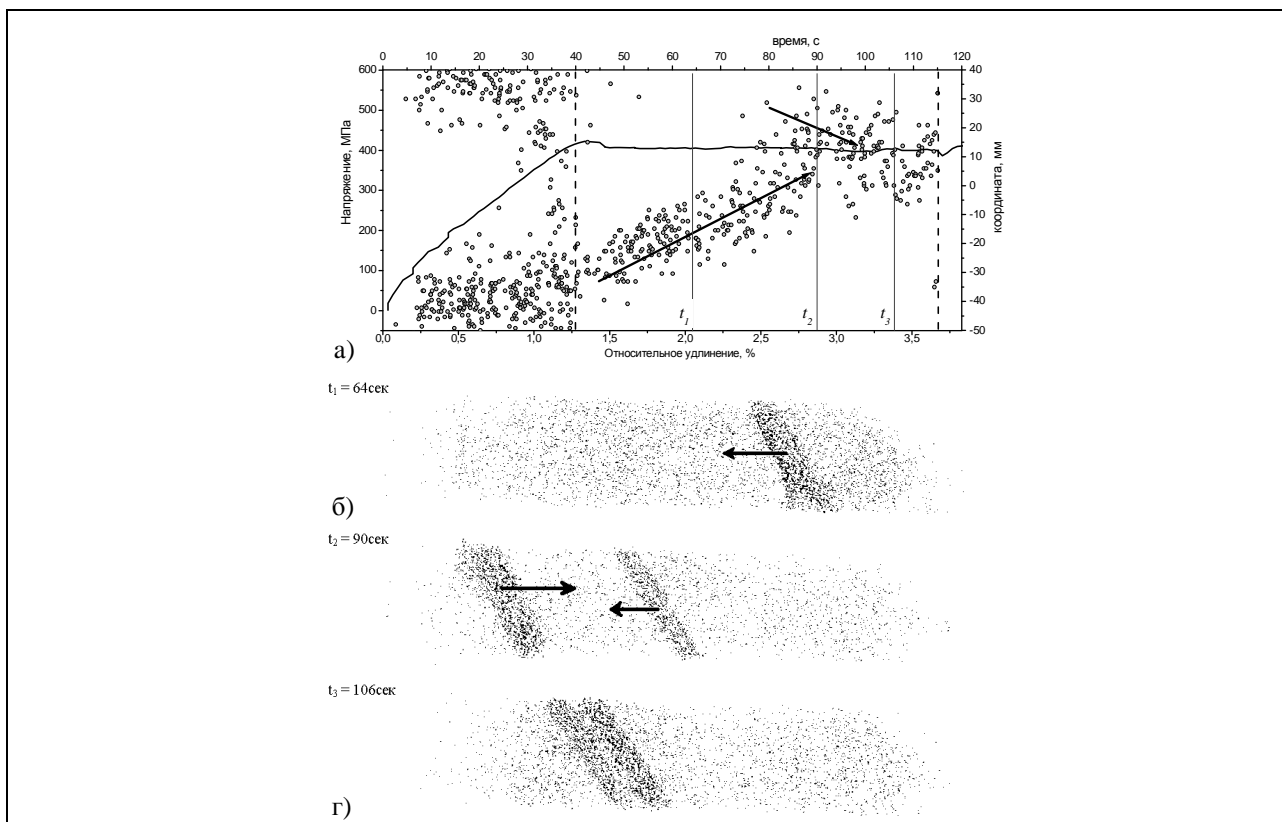


Рис. 8 – Картина локализации пластической деформации методами АЭ и спеклфотографии на упруго-пластической стадии и площадке текучести. а) σ - ε график, совмещённый с локализацией сигналов АЭ по времени (штриховой линией выделен интервал движения полос до момента их аннигиляции); б), в), г) – слайды спекл-видеосъемки в моменты $t_1=64$ с; в) $t_2=90$ с; г) $t_3=106$ с.

После завершения стадии площадки текучести активность АЭ резко снижается до нуля на 5...10 с при заданной скорости нагружения ("зона молчания" в начале параболического упрочнения). Стадии развития пластической деформации отображаются также изменением амплитуд, которые на площадке текучести имеют меньший разброс значений, а при разрушении – максимальный уровень.

На всех образцах получены картины линейной локализации АЭ, на которых можно чётко выделить интервалы времени, соответствующие стадиям пластической деформации на кривой σ – ε . Предварительный анализ основных параметров сигналов АЭ показывает, что между ними, и процессами, протекающими при пластической деформации, имеется определённая взаимосвязь. В частности, построив картину локализации АЭ и используя дополнительные данные об амплитудах и активности сигналов можно следить за движением полос деформационного упрочнения на стадии площадки текучести, определить их скорость и, при необходимости, восстановить скорость нагружения образца. С некоторой вероятностью можно прогнозировать место образования шейки и разрыва образца, не заканчивая испытание полным разрушением, что может найти практическое применение при постановке экспериментов.

В **пятой Главе** приведены результаты исследований параметров АЭ сигналов в образцах и рельсах со сварными швами при остывании после сварки, исследования взаимодействия движущегося поезда с конструкцией моста и рельсами, в которых возникают напряжения сжатия-растяжения под действием стоячей волны. Для исследований воздействия термонапряжённого состояния на параметры АЭ сигналов создан лабораторный стенд и методика исследований. В экспериментах использовали образцы из стали 65Г со сварными швами и образцы с боковым цилиндрическим отверстием. Для имитации дефектной сварки в сварной шов внедрялись материалы с коэффициентом линейного расширения, отличающимся от коэффициента расширения стали (графит, титан, вольфрам и алюминий). Образцы нагревались и охлаждались в диапазоне, включающем фазовое превращение. Напряжения в образцах создавали нагревом газовой горелкой с измерением температур пирометром RAYTXS LTR CF1.

Для различных состояний образцов (исходное, сварка качественная, сварка дефектная) описаны анализируемые параметры сигналов АЭ (форма, спектры, суммарный счёт), которые сопоставлялись с кривой охлаждения. АЭ наблюдалась в диапазоне температур остывания от 500°С до 100°С. Контроль при температуре выше 700°С невозможен в связи с высоким уровнем непрерывной АЭ.

На рис. 9 представлены зависимости для некоторых измерений, наиболее наглядно показывающих характеристики объекта в разных состояниях. Большинство сигналов от качественного сварного шва имеют амплитуды до 200 мВ, в то время как дефектный шов явно выделяется более высокими значениями амплитуд. О повышении энергии источника АЭ, которая зависит от внутренних напряжений в структуре дефектного сварного шва также говорит увеличившийся в 6 раз суммарный счёт.

Во второй части пятой Главы описана схема работы (рис. 10) и результаты контроля сварных стыков рельсов на рельсосварочном предприятии (РСП-29 ЗСЖД). Представлен результат расчёта температурного поля в зоне сварного соединения. Показана возможность проведения неразрушающего контроля сварных соединений на рельсосварочной линии сразу после процесса сваривания и снятия града (рис. 11) по изменению потоковых характеристик сигналов АЭ. По результатам работы создано методическое обеспечение для мониторинга процесса остывания соединения рельсов после контактно-стыковой сварки плавлением основанное на анализе постоянства потоковых характеристик сварного шва.

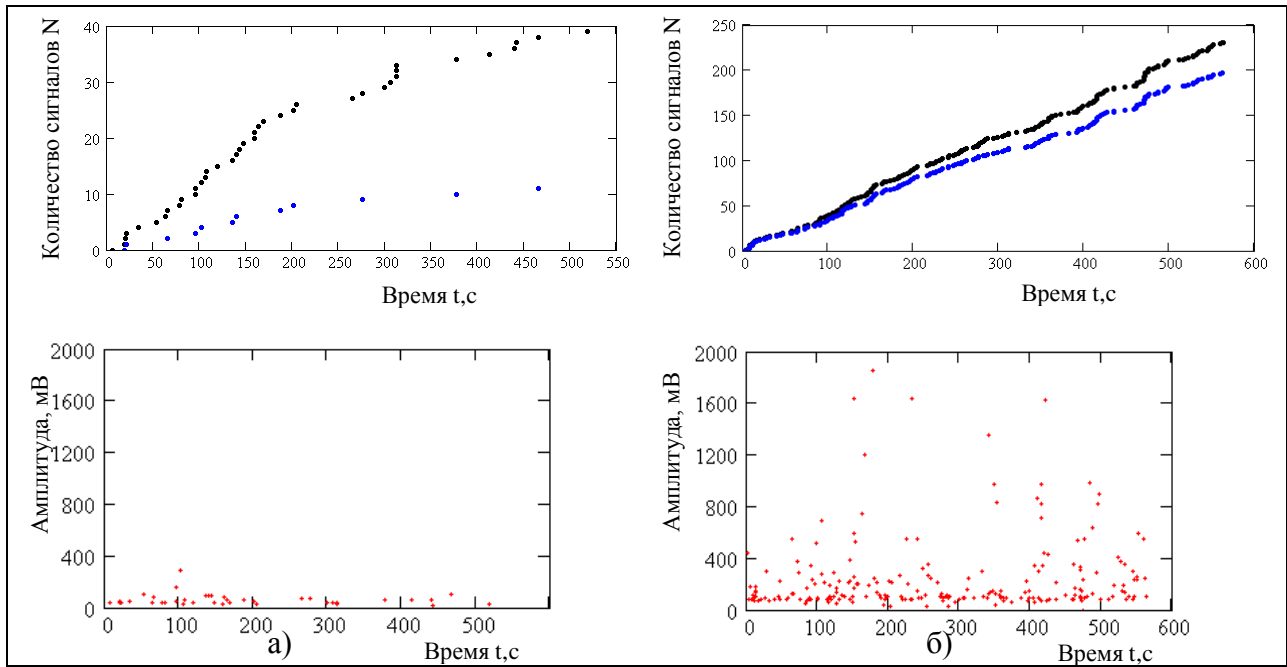


Рис. 9 – Суммарный счёт и амплитуды сигналов за время испытаний при остывании сварного шва: а) - обычный сварной шов; б) - дефектный сварной шов

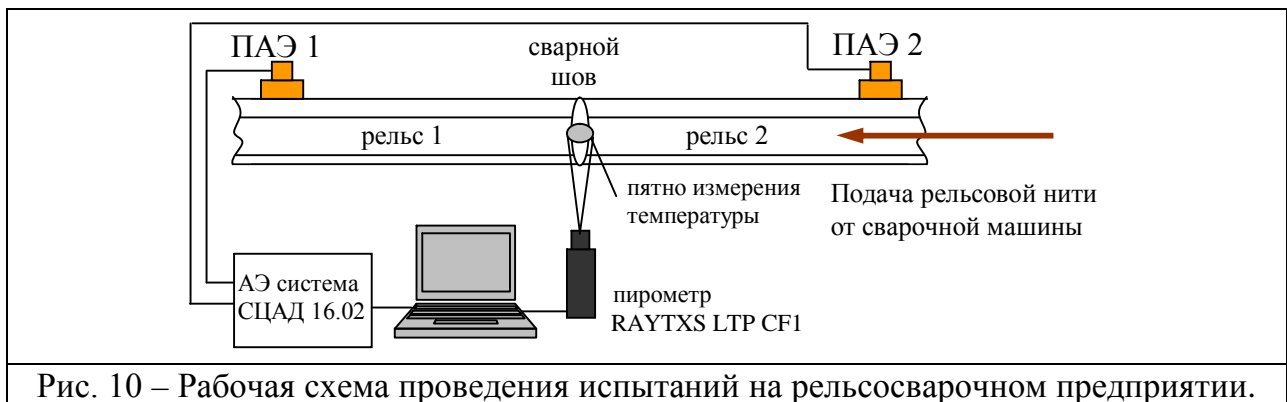
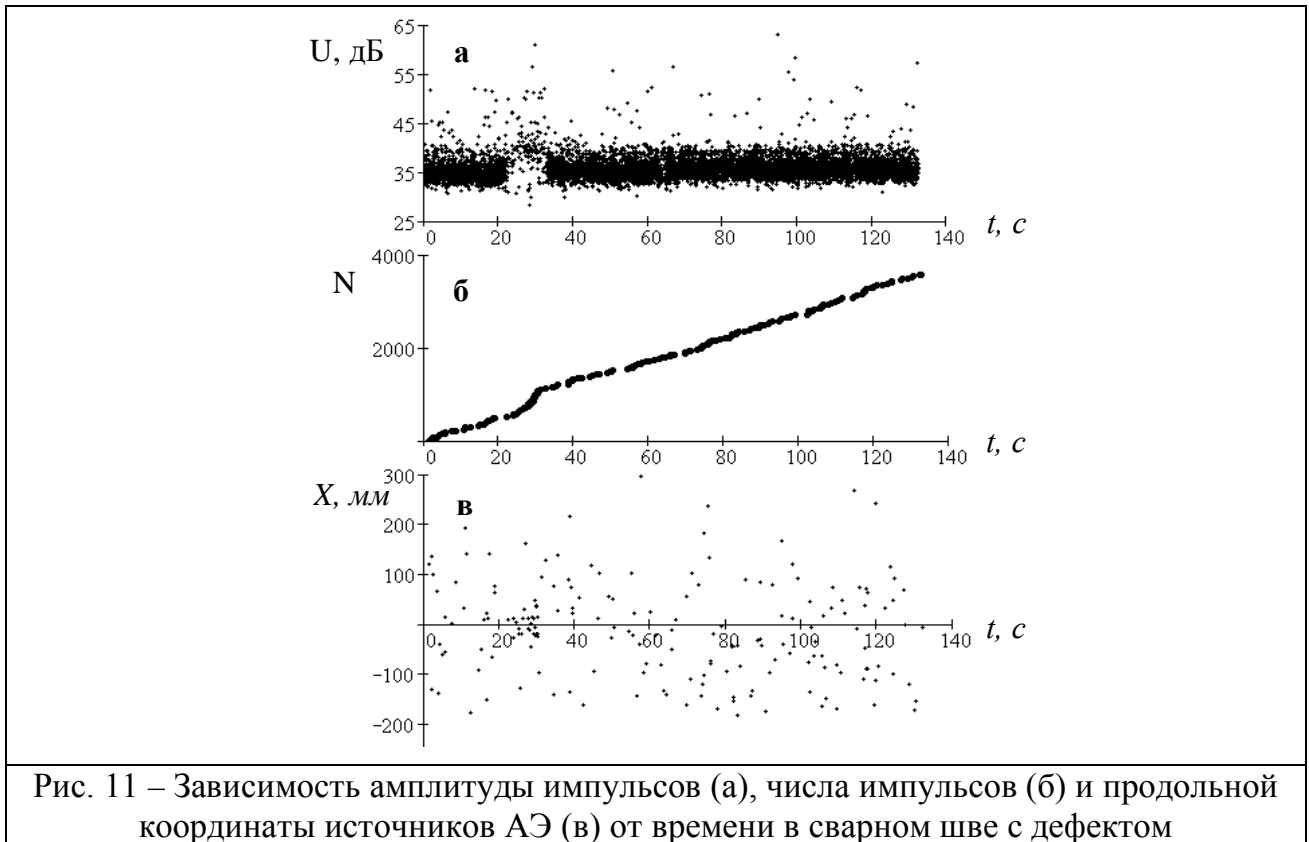


Рис. 10 – Рабочая схема проведения испытаний на рельсосварочном предприятии.

Для исследования напряженно-деформированного состояния рельсов на мосту при проходе поезда использовалась тензометрическая система, синхронизированная с системой регистрации АЭ сигналов с точностью ~ 5 мкс. Съёмный тензопреобразователь для измерений продольных деформаций устанавливался на шейку рельса вблизи нейтральной оси. При проходе поезда по мосту картины напряженно-деформированного состояния для рельсов, расположенных на различных участках пролета моста различались, что объясняется возникновением резонанса по длине пролета моста $L=110$ м на изгибной волне в рельсе. Ее скорость C_{a_0} оценена по формуле для изгибной волны в пластине:

$$C_{a_0} = \sqrt{2\pi f d} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}, \quad (7)$$

где f – частота волны, d – поперечный размер рельса, E – модуль упругости, ρ – плотность стали, ν – коэффициент Пуассона. При периоде волны $\sim 25 \dots 35$ с, определённом по данным тензометрии, частоте $f \approx 0,03 \dots 0,04$ Гц, $h \approx 0,2$ м, $E = 20 \cdot 10^{10}$ Па, $\rho = 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³, $\nu = 0,29$ скорость составляет $C_{a_0} \approx 7 \dots 8$ м/с. При этом длина волны $\lambda \approx 220 \dots 250$ м $\approx 2L$. Это подтверждает предложенное объяснение деформации рельсов. Максимальная деформация наблюдается в центре пролета моста, а минимальная соответствует участкам рельсов на опорах (узлы стоячей волны).



Тензометрия рельсов, расположенных на поверхности балластной призмы пути, подтверждает предположение об изгибе конструкций моста. При проходе поезда по рельсу, лежащему на балластной поверхности, уровень продольных деформаций был существенно ниже. Таким образом, исследования деформаций в рельсах, находящихся под поездной нагрузкой показывают, что рельсы, уложенные на мосту, эксплуатируются с существенно большей амплитудой циклических нагружений, чем рельсы, расположенные на балластной призме и поэтому требуют более тщательного контроля по выявлению развивающихся дефектов усталостного типа. Уровень напряжений в рельсах на мосту действительно достаточен для АЭ контроля в условиях проходящего поезда.

В связи с повышенными шумами в момент прохода поезда по рельсу все локализованные сигналы от источников АЭ, были выявлены до захода поезда на рельс, либо после ухода поезда с рельса. Однако моменты включения и выключения системы на регистрацию определяются соотношением продольной и поперечной деформаций конструкций моста. Прием и регистрацию акустико-эмиссионных сигналов начинают при скорости изменения продольной деформации отличной от нуля, а прекращают – при скорости изменения поперечной деформации отличной от нуля и возобновляют после прохода поезда прием акустических сигналов при скорости изменения поперечной деформации равной нулю, а прекращают при скорости изменения продольной деформации равной нулю.

В **Приложениях** приведены акты внедрения из дирекции по ремонту вагонов Западно-Сибирской железной дороги и рельсосварочного предприятия и справка об использовании разработок в учебном процессе.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Создана расчётная модель процесса распространения упругих волн через прессовое соединение, позволяющая исследовать основные информативные параметры акустических волн (частота, амплитуда) в зависимости от величины натяга, определяемого зазором между кольцом и шейкой оси, акустических свойств слоя между двумя сопрягаемыми деталями, геометрии соединения. Показано, что для прессового соединения, выполненного через слой воздуха, оптимальным является использование резонансного метода на низких частотах с передаточной характеристикой $H(f) \sim D^2R$, соответствующей частотам резонанса по толщине кольца и диаметра шейки оси. Для соединения через слой масла или лака оценивать натяг следует с использованием эхо-импульсного метода в мегагерцевом диапазоне.

2. Доказано, что возможен контроль натяга по величине коэффициента отражения с использованием поперечной горизонтально поляризованной волны на высоких частотах, обеспечиваемый уменьшением скорости ультразвуковых волн вследствие роста тангенциальных напряжений в кольце при увеличении натяга. При этом отсутствует зависимость от акустических свойств промежуточной среды, через которую выполнено прессовое соединение. Разработаны рекомендации по выбору рабочих частот, крутизны кривой чувствительности и уровней сигналов при проектировании методик акустического интегрально-резонансного метода контроля плотности посадки колец на ось.

3. Экспериментально показано, что изменение степени натяга сопрягаемых деталей ведёт к увеличению основных регистрируемых параметров спектроэхограмм (число импульсов, амплитуда) при реализации интегрально-резонансного метода. Исследовано влияние размеров и конфигурации искусственных дефектов, а также термической обработки образцов среднеуглеродистой стали на параметры спектроэхограмм.

4. Получены картины линейной локализации АЭ в образцах из Стали 09Г2С указывающие на 4 стадии развития деформации, 3 из которых соответствуют стадиям пластической деформации на кривой $\sigma-\varepsilon$. Обнаружен эффект исчезновения сигналов АЭ - «зона молчания» - в области пластических деформаций и аналогичный известному эффекту Кайзера. Показано, что изменение в характере поведения параметров сигналов акустической эмиссии (активность, амплитуды) характеризует переход между стадиями кривой $\sigma-\varepsilon$ на образцах из стали 09Г2С. Падение активности до нуля показывает завершение площадки текучести и предсказывает переход к стадии параболического деформационного упрочнения. Источником сигналов АЭ на стадии площадки текучести являются полосы локализованной деформации Чернова-Людерса. Предложен метод определения скорости развития локализованной деформации на площадке текучести по картине локализации АЭ, с использованием данных об амплитудах и активности сигналов.

5. Показана возможность обнаружения дефектов стыка рельсов в термонапряжённом состоянии на ранней стадии их развития с использованием метода АЭ в диапазоне температур остывания от 500°C до 100°C. Установлено, что по спектрам АЭ сигналов, отклонений в монотонности роста суммарного счёта и максимальных амплитуд, можно судить о дефектности сварного соединения. По результатам работы создано методическое обеспечение для мониторинга процесса остывания рель-

сов после контактно-стыковой сварки плавлением, основанное на анализе постоянства потоковых АЭ характеристик. Разработанная методика испытана на РСП-29 Западно-сибирской железной дороги.

6. Обоснован способ регистрации акустических сигналов в рельсах по скорости изменения продольной и поперечной деформаций, обуславливающих достаточность уровня напряженно-деформированного состояния, создаваемого весом проходящего поезда для АЭ диагностирования. Способ запатентован, и методика применена для диагностирования рельсов на железнодорожном мосту через р. Обь в г. Новосибирске.

7. Результаты исследований, проведенных в диссертации, используются в учебном процессе СГУПС при повышении квалификации специалистов по акустическому и акустико-эмиссионному контролю в вагонных ремонтных депо.

Основные публикации по теме диссертации

В рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Муравьев Т.В., Зуев Л.Б. Особенности акустической эмиссии при развитии полосы Чернова-Людерса в образцах из низкоуглеродистой стали // ЖТФ. 2008. Т. 78, № 8. С. 135-139.
2. Муравьев В.В., Муравьев Т.В. Расчет процесса передачи акустического сигнала через трибосопряжение внутреннего кольца подшипника и оси колесной пары // Дефектоскопия. 2007. №2. С.16-26.
3. Муравьев М.В., Муравьев В.В., Муравьев Т.В. К возможности диагностирования рельсов в эксплуатации акустико-эмиссионным методом // Дефектоскопия. 2008. №1. С. 42-50.
4. Муравьев М.В., Муравьев В.В., Степанова Л.Н., Муравьев Т.В. Способ диагностирования рельсовых плетей металлического моста и устройство для его осуществления. Патент РФ на изобретение №2284519. БИ. № 27. 27.09.2006. С. 13.

В других научных изданиях:

5. Муравьев М.В., Муравьев В.В., Муравьев Т.В. Разработка АЭ методики контроля рельсов в эксплуатации // Вестник СГУПС. 2005. Новосибирск. №12, с. 62-72.
6. Козытник и.и., Муравьев Т.В. Определение натяга внутренних колец буксовых подшипников на шейке оси колёсной пары вагона акустическим методом // Вестник СГУПС. 2005. Новосибирск. №12, с. 73-81.
7. Vitaly Muraviev, Timofey Muraviev. Diagnostics of Railway Objects USING Acoustic Emission Technique // International conference nde for safety. November 7-9, 2007. european federation for ndt, prague, Czech. 2007. P. 175-182.
8. Муравьев Т.В. Определение напряжений на поверхности колец буксового подшипника тензометрическим методом // Сборник тезисов докладов новосибирской межвузовской научной студенческой конференции "Интеллектуальный потенциал Сибири". 16-17 мая 2002 года. Новосибирск. НГАСУ. 2002. с.62.
9. Муравьев Т.В. Исследование деформации колец буксового подшипника тензометрическим методом // Тезисы докладов студенческой конференции «Дни науки – 2002». Новосибирск. СГУПС. 2002. с. 84.
10. Муравьев Т.В. Исследование дефектности и структуры цилиндрических образцов методом ультразвукового цифрового сканирования // Материалы научно-технической конференции «Наука и молодежь XXI века». 27-29 октября 2002 г. Новосибирск. СГУПС. 2003. с. 93-96.
11. Муравьев Т.В. Акустико-эмиссионная диагностика сварных соединений с помощью термического нагружения // Тезисы докладов студенческой конференции «Дни науки – 2003». Новосибирск. СГУПС. 2003. с. 48.

12. Муравьев Т.В. Разработка методики определения качества сварных соединений с помощью акустико-эмиссионной диагностики // Материалы научно-технической конференции "Наука и молодежь XXI века". 29-30 октября 2003г. Новосибирск. СГУПС. 2004. с.102-103
 13. Муравьев Т.В. Повышение надежности обнаружения дефектов в сварных стыках рельсов акустико-эмиссионным методом // Сборник тезисов докладов Новосибирской межвузовской научной студенческой конференции "интеллектуальный потенциал Сибири". 19-20 мая 2004. Новосибирск. НГАСУ. 2004. с. 54.
 14. Муравьев В.В., Муравьев Т.В.. Акустико-эмиссионное диагностирование образования и развития трещин при охлаждении сварного соединения // 2-я Евразийская научно-практическая конференция "Прочность неоднородных структур" 20-22 апреля 2004. М.: МИСиС. 2004. С. 152.
 15. Муравьев Т.В. Повышение выявляемости дефектов при акустико-эмиссионном диагностировании сварных соединений металлоконструкций // Материалы научно-производственного форума «Экологические проблемы и техногенная безопасность строительства, эксплуатации и реконструкции нефтегазопроводов. Новые технологии и материалы». 1-4.03.2005г. Томск. Изд-во ТПУ. 2005г. с. 175.
 16. Муравьев В.В., Алексеев А.Б., Муравьев Т.В., Бехер С.А. Контроль сварных соединений акустико-эмиссионным методом в процессе остывания шва после сварки. //Материалы XVII российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика». 5-11 сентября 2005 г. Екатеринбург. УПИ - ИФМ УрО РАН. 2005, Т2-35, Д331
 17. Муравьев В.В., новиков а.в., Муравьев Т.В. Автоматизированные средства диагностики деталей подвижного состава и конструкций пути //сборник докладов 9-й международной конференции «Градиентные структурно-фазовые состояния в сталях и сплавах», 24 мая 2006 г. Новокузнецк. изд-во сибГИУ, 2006. с. 34-38
 18. Муравьев В.В., Бехер С.А., Муравьев Т.В., Алексеев А.Б. Контроль качества электроконтактной сварки рельсов акустико-эмиссионным методом в процессе остывания шва // труды 7-ой научно-практической конференции «Безопасность движения поездов» 26-27 октября 2006 г. М.: Изд-во МИИТ, 2006. III-29.
 19. Муравьев Т.В. диагностика качества трибосопряжения внутреннего кольца подшипника и оси колесной пары // труды 7-ой научно-практической конференции "Безопасность движения поездов". 26-27 октября 2006 г. М.: Изд-во МИИТ, 2006, VI-38.
 20. Муравьев Т.В. создание модели распространения акустического сигнала в трибосопряжении внутреннего кольца подшипника и оси колесной пары // 1-я всероссийская научно-техническая конференция «измерение, контроль и диагностика». 22-24 апреля 2010 г. Ижевск. изд-во ижгту, 2010. с. 137-141.
 21. Муравьев Т.В. наблюдение развития очагов локализации пластической деформации в образцах из низкоуглеродистой стали // 1-я всероссийская научно-техническая конференция «измерение, контроль и диагностика». 22-24 апреля 2010 г. Ижевск. изд-во ижгту, 2010. с. 50-54.
 22. Муравьев Т.В. Влияние напряжений в прессовых и сварных соединениях железнодорожных деталей на характеристики акустических сигналов при неразрушающем контроле // 6-я Российская конференция «Механика микрон неоднородных материалов и разрушение». 24-28 мая 2010 г. Екатеринбург, ИМАШ УрО РАН, 2010.
-