На правах рукописи

Травкин Андрей Александрович

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ИСТОЧНИКОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ЛИТЫХ ОБЪЕКТОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ СТАЛИ 20ГФЛ

05.02.11 – Методы контроля и диагностика в машиностроении

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2013

Работа выполнена на кафедре технологий сварки и диагностики в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **БИГУС Георгий Аркадьевич**

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор **БАРЗОВ Александр Александрович** профессор МГУ им. М.В. Ломоносова

кандидат технических наук **ЛЮТОВ Михаил Аркадьевич** Заместитель директора по науке ООО «Вектор»

Ведущая организация: **ОАО НТЦ «Промышленная безопасность»** (г. Москва)

Защита состоится 26 декабря 2013г. в _____ на заседании диссертационного совета **Д 212.141.01** в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская д.5.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим присылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баума

Телефон для справок: 8 (499) 267-09-63.

Автореферат разослан « » ноября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, доцент Коновалов А.В.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана
2039236
Травкин А.А. Разработка м

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Российская Федерация занимает третье место по протяженности железнодорожных путей общего пользования, имеет разветвленную железнодорожную транспортную сеть. Большинство грузовых и пассажирских перевозок осуществляется по железной дороге. Железнодорожным транспортом перевозят различные категории грузов, в том числе и грузы, относящиеся к категории опасных. Аварии на железнодорожном транспорте представляют опасность окружающей среде, сопряжены с тяжелыми экономическими потерями, особенно в случае перевозки взрывопожароопасных и химически опасных грузов. Поэтому, обеспечение безопасности при осуществлении железнодорожных перевозок является важной задачей.

В последнее время вопрос обеспечения безопасности железнодорожных перевозок стал особенно актуальным вследствие увеличения количества сходов с рельс грузовых железнодорожных вагонов. Железнодорожный вагон – сложное техническое устройство, состоящее из элементов, испытывающих разный уровень нагружения в процессе эксплуатации. Сход с рельс железнодорожных вагонов в большинстве случаев сопряжен с отказом наиболее нагруженного элемента конструкции железнодорожного вагона – боковой рамы тележки (Рис. 1).

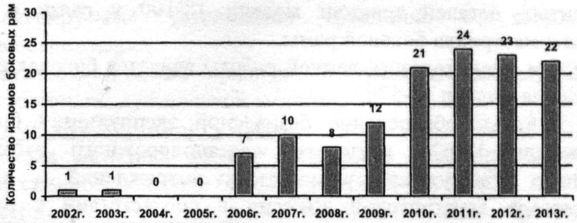


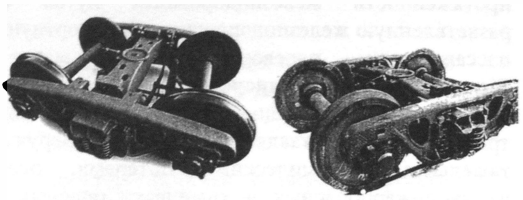
Рис. 1. Количество изломов боковых рам тележек грузовых вагонов за 2001г. – 2013г. (по данным на апрель 2013г.)

Большая часть отказов боковых рам тележек грузовых железнодорожных вагонов относятся к производственно - деградационным, т.к. сопряжены с развитием усталостных трещин в местах локальной концентрации напряжений, связанных с наличием металлургических дефектов.

На сегодняшний день для оценки технического состояния боковой рамы применяется метод акустической эмиссии. Разработана методика акустико-эмиссионного контроля литых деталей грузовых железнодорожных вагонов, обеспечивающая безопасную эксплуатацию железнодорожного вагона по условию эксплуатационной живучести за счет обнаружения усталостных повреждений во время межремонтного осмотра. Данная методика регламентирует технологический процесс проведения акустико-эмиссионного контроля боковых рам тележки модели 18-100.

им. Н.Э. Баумана
Библиотека

Начиная с 2004 года ОАО «РЖД» вводит в эксплуатацию новую конструкцию тележки модели 18-578, отличающуюся от старой повышенными динамическими и прочностными показателями (Рис. 2). Повышение прочностных и динамических показателей достигается изменением материала и конструкции боковой рамы. Модификация конструкции боковой рамы обусловлена изменением сечения в концевых частях с двутаврового на коробчатое. Боковая рама для тележки модели 18-100 отливается из стали 20ГЛ, а боковая рама тележки 18-578 изготавливается из стали 20ГФЛ.



а) б)

Рис. 2. Тележка грузового вагона модели 18-100 с боковой рамой двутаврового (а) и модели 18-578 с боковой рамой коробчатого сечения (б)

В связи с изменением материала и конструкции боковой рамы браковочные критерии, используемые при акустико-эмиссионном контроле тележки модели 18-100, не позволяют достоверно оценивать качество литых деталей тележки новой модификации. Актуальность данной работы обусловлена необходимостью актуализации методики акустико-эмиссионного контроля литых деталей тележки модели 18-100 в связи с изменением конструкции и материала боковой рамы.

Объектом исследования данной работы является боковая рама тележки грузового вагона модели 18-578.

Цель работы: обеспечение безопасной эксплуатации боковой рамы тележки модели 18-578 грузового железнодорожного вагона за счет своевременного обнаружения усталостных повреждений и их оценки с помощью метода акустической эмиссии в соответствии с разработанной методикой акустико-эмиссионного контроля.

Достижение поставленной цели осуществлялось решением следующих задач:

1. Определение дефектоскопических признаков обнаружения усталостных повреждений с помощью метода акустической эмиссии в процессе статических испытаний.

2. Оценка степени опасности усталостного повреждения с известными дефектоскопическими признаками.

3. Создание методики оценки источников акустической эмиссии при акустико-эмиссионном контроле боковых рам тележек грузовых железнодорожных вагонов модели 18-578 на основе разработанных критериев.

Основу для решения данных задач составили труды ведущих специалистов и ученых: Н.П. Алешина, Г.А. Бигуса, Ю.П. Бородина, С.И. Буйло, В.М. Горицкого, Ю.Б. Дробота, В.И. Иванова, В.С. Ивановой, Г.Б. Муравина, О.М. Недзвецкой, А. Поллок, Т.П. Севериновой, В.Ф. Терентьева, М.А. Хамстад, В.В. Шипа и других.

В процессе решения поставленных задач получены следующие результаты, представляющие научную новизну:

1) Показано, что в процессе циклического нагружения приращение длины трещины на величину усталостной бороздки в стали 20ГФЛ генерирует сигнал акустической эмиссии амплитудой 45 – 47 дБ при значении порогового коэффициента интенсивности напряжений K_{th}=16,5 $МПа\sqrt{м}$.

2) Определено, что при распространении усталостной трещины излучается симметричная волна Лэмба нулевого порядка на частоте 412 кГц, распространяющаяся с фазовой скоростью 1720 м/с, и антисимметричная волна Лэмба нулевого порядка на частоте 125 кГц, распространяющаяся с фазовой скоростью 3150 м/с.

3) Обнаружено изменение соотношения доли высокочастотной к низкочастотной оставляющей в спектре сигнала акустической эмиссии от усталостной трещины по мере её развития от 0,13 до 1,39.

4) Установлено, что минимальный размер усталостной трещины, выявляемой при статических испытаниях боковых рам тележек грузовых вагонов, составляет 0,25 мм.

Защищаемые положения

1. Результаты экспериментальных исследований процессов развития усталостных повреждений с помощью метода акустической эмиссии.

2. Зависимость спектральных характеристик сигналов акустической эмиссии, генерируемых усталостной трещиной, от стадии развития усталостного повреждения.

3. Дефектоскопические признаки и критериальные оценки степени опасности источников акустической эмиссии.

Практическая значимость работ

Разработана методика оценки источников акустической эмиссии при акустико-эмиссионном контроле боковых рам тележек модели 18-578.

Достоверность результатов подтверждена в ходе экспериментальных исследований на образцах, вырезанных из литой детали тележки модели 18-578, испытанных на динамической разрывной машине в условиях циклического и статического нагружения. Сопоставление результатов фрактографии изломов с результатами обработки акустико-эмиссионных данных, зарегистрированных в процессе испытаний, указывают на совпадение предположений с окончательными выводами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на XV, XVII Международной конференции "Современные методы и средства НК и ТД" (Ялта, 2007, 2009 г.г.), XXVII тематическом семинаре «Диагностика оборудования и трубопроводов компрессорных станций» (пос. Небуг Краснодарского края, 2008 г.), II-ой Конференции с Международным участием «Совершенствование и функционирование систем в области промышленной безопасности, неразрушающего контроля, технического диагностирования и энергоэффективности» (Бодрум, 2012 г.), III Международной научно-технической конференции «Акустическая эмиссия. Роль метода в системах комплексного мониторинга технического состояния опасных

производственных объектов» (Москва, 2012 г.), на научных семинарах кафедры «Технологии сварки и диагностики» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 научных работ, из них 3 в печатных изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и списка цитируемой литературы, включающего 70 наименований. Содержание диссертации изложено на 131 машинописном листе, включая 44 рисунка, 3 таблицы.

Первая глава является обзорной и содержит основные сведения о технологии изготовления литых деталей тележек грузовых железнодорожных вагонов, о наиболее вероятных технологических дефектах и возможных местах их расположения.

Традиционная технология производства ответственных деталей тележек грузовых железнодорожных вагонов – боковых рам и надрессорных балок – предусматривает выплавку (в электрических и мартеновских печах) стали марки 20ГФЛ, выпуск металла в разливочный ковш, заливку форм и термообработку литых изделий. Для получения качественной отливки необходимо в процессе ее производства обеспечить соблюдения целого ряда требований к технологическим параметрам. Каждый из этих параметров ограничивается достаточно узким диапазоном допустимых значений, выход за пределы которого приводит к появлению различных дефектов и снижению качества литья. Засоры от размывания формы, газовые поры, кристаллизационные трещины – типичные дефекты, присущие стальному литью.

В процессе эксплуатации литые детали испытывают циклические вертикальные нагрузки от веса вагона и горизонтальные нагрузки от сил инерции, возникающих в процессе разгона и торможения.

При воздействии циклических эксплуатационных нагрузок в областях концентрации внутренних напряжений, соответствующих, как правило, местам расположения технологических дефектов, наблюдается развитие усталостных трещин, приводящих в дальнейшем к разрушению конструкции (Рис. 3).

Для обеспечения безопасной эксплуатации боковую раму кроме приемочного контроля подвергают периодическому обследованию на предмет выявления эксплуатационных дефектов с помощью вихретокового, феррозондового, визуального и измерительного контроля. Данные методы обнаруживают только поверхностные и подповерхностные дефекты и не предназначены для поиска дефектов конструкции, удаленных от поверхности.

Рис. 3. Типовой макроизлом боковой рамы

Для обнаружения внутренних дефектов могут применяться рентгенографический и ультразвуковой контроль. Выявляемость трещин

рентгенографическим контролем сильно зависит от ориентации дефекта относительно направления просвечивающего луча, а в случае ультразвукового контроля – от отношения «сигнал» / «шум», которое, при наличии большого количества переотражений зондирующего импульса из-за крупнозернистости литой структуры боковой рамы, имеет низкое значение. Кроме того, сложность конструкции боковой рамы, представляющая из себя коробчатое изделие переменной толщины с множеством ребер жесткости и технологических отверстий неправильной формы, наличие грубой необработанной поверхности обуславливают большие трудозатраты при проведении обследования рентгенографическим или ультразвуковым методом.

Таким образом, на основании анализа причин разрушения боковых рам и применимости методов неразрушающего контроля было предложено использовать метод акустической эмиссии для обнаружения и оценки усталостных повреждений при техническом обследовании литых деталей.

Вторая глава раскрывает физическую природу явления акустической эмиссии, возможность применения этого явления для контроля технического состояния конструкций.

Метод акустической эмиссии, основанный на регистрации упругих колебаний, генерируемых развивающимися в объекте контроля дефектами, широко применяется для определения уровня дефектности конструкций. По сравнению с другими методами неразрушающего контроля метод обладает рядом преимуществ, среди которых следует выделить высокую чувствительность к развивающимся дефектам, возможность определения технического состояния всей конструкции без перемещения преобразователей и выявление дефектов, склонных к развитию, следовательно, оказывающих влияние на целостность конструкции. К недостаткам метода относятся трудоемкость выделения сигналов, генерируемых дефектами, из помех, сложность интерпретации акустико-эмиссионной информации и необходимость проведения предварительных исследовательских работ для разработки методики оценки степени опасности источников акустической эмиссии для каждого объекта диагностирования. Целью предварительных работ при разработке методики оценки источников акустической эмиссии является создание базы данных по акустико-эмиссионным портретам (совокупностям параметров процесса излучения акустико-эмиссионных сигналов) соответствующим определенному техническому состоянию конструкции, которое характеризуется степенью близости к предельному состоянию. Для большинства конструкции, работающих в условиях циклического нагружения, критерием наступления предельного состояния является нарушение целостности конструкции, произошедшее в результате накопления и развития усталостных повреждений. Размер усталостной трещины является одним из определяющих признаков технического состояния конструкции. Задачей предварительных исследовательских работ при разработке методики акустико-эмиссионного контроля является определение взаимосвязи между размером усталостной трещины и параметрами процесса излучения ультразвуковых волн при её распространении. Имея совокупность акустико-эмиссионной

информации, полученной в процессе предварительных исследований, характеризующей техническое состояние конструкции с усталостным повреждением известного размера, появляется возможность проводить анализ акустико-эмиссионных данных при проведении диагностики, оценивать степень опасности источников акустической эмиссии путем сравнения параметров сигналов от зарегистрированных источников с параметрами сигналов, характерных для процесса распространения усталостных повреждений известных размеров.

Усталостная трещина в конструкции является концентратором напряжений. Теоретически, напряжение в вершине трещины приближается к бесконечности, в реальных условиях напряжение в вершине трещины ограничено пределом текучести. Таким образом, формируется зона пластической деформации - область в вершине трещины, в которой напряжение достигает предела текучести (Рис. 4).

Основными механизмами генерирования сигналов акустической эмиссии при росте трещины являются рост зоны пластической деформации, скачок трещины и трение берегов трещины.

Акустическая эмиссия при пластической деформации обусловлена дислокационными процессами, происходящими в металле, следовательно, количество сигналов акустической эмисии при пластическом деформировании прямо пропорционально объему метталла, подверженному пластической деформиромации. Зная значение акустической эмиссивности (число излученных импульсов акустической эмиссии из единичного объема) для исследуемого материала, можно оценить количество сигналов акустической эмиссии, генерируемых ростом зоны пластической деформации:

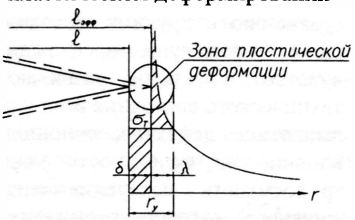


Рис. 4. Распределение напряжений в вершине трещины

$$N = \pi r_y^2 b I \,, \qquad 1.1$$

где $r_y = \dfrac{K_I^2}{2\pi\sigma_T^2}$ - размер зоны пластической деформации в вершине трещины, b - ширина трещины, I - акустическая эмиссивность материала, K_I - коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины, σ_T - предел текучести стали 20ГФЛ.

Механизм генерирования сигналов акустической эмиссии при росте трещины значительно отличается от механизмов возникновения акустико-эмиссионных сигналов при пластической деформации. Известно, что для усталостного роста трещины характерна прерывистость. Скачкообразность роста трещин связана с тем, что для того, чтобы трещина длиной l могла распространяться на некоторую длину, необходимо, чтобы в зоне деформации у вершины трещины на некотором участке длиной Δl была исчерпана пластичность. Скачок трещины, возникающий после исчерпания пластичности

на всей длине зоны пластической деформации, сопровождается массовым высвобождением энергии упругой деформации и образованием новой зоны пластической деформации.

Для процесса распространения трещины, который проявляется в виде микроразрывов и сопровождается появлением новых поверхностей, характерна высокоамплитудная акустическая эмиссия. На примере физической модели роста трещины известно, что амплитуда единичного импульса акустической эмиссии пропорциональна (в среднем) скачку трещины. При развитии трещины происходит перемещение точек среды. Это приводит к генерированию в среде ступенчатого акустического импульса. Амплитуда излучаемого сигнала связана с величиной перемещения исследуемой точки среды u_m.

Перемещение точки на поверхности разрыва согласно механике твердого тела:

$$u_m = 2a\frac{(1-\nu)^2\sigma}{E}, \text{ где} \qquad 1.2$$

a - длина трещины, ν - коэффициент Пуассона; E - модуль Юнга, σ - номинальное напряжение.

Из выражения (1.2) получаем прямую пропорциональную зависимость амплитуды сигнала акустической эмиссии от величины скачка трещины:

$$U_m = k_1 a \qquad 1.3$$

Уточненное соотношение между увеличением длины трещины и наблюдаемыми при этом амплитудами сигналов акустической эмиссии имеет вид:

$$U_{mi} = k_2(\Delta a)^{3/2}, \text{ где} \qquad 1.4$$

Δa - увеличение длины трещины за время i - го скачка; k_2 - коэффициент пропорциональности; U_{mi} - амплитуда сигнала акустической эмиссии во время i - го скачка.

Сигналы акустической эмисси от процесса трения берегов трещины обусловлены механическим взаимодействием микронеровностей поверхностей разрыва. Известно, что амплитуда сигналов акустической эмиссии от трения берегов трещины пропорциональна максимальному сжимающему усилию P_{max}, площади S контакта берегов трещины и уменьшается с ростом длительности τ соответствующего участка разгрузки из-за снижения динамичности процесса смыкания.

На основе указанной гипотезы для значения амплитуды сигналов акустической эмиссии, возникающих в процессе трения берегов трещины, можно записать:

$$U = k\frac{P_{max}l}{\tau}(1-R), \text{ где} \qquad 1.5$$

l - длина трещины; R - коэффициент асимметрии цикла.

На основании сделанного обзора для разработки механизмов регистрации усталостных повреждений и создания системы оценки степени их опасности были выбраны наиболее информативные параметры процесса излучения ультразвуковых волн, связанные с реальными физическими процессами

повреждаемости в материале, - количество сигналов акустической эмиссии и их амплитуда.

В третьей главе приводятся результаты экспериментальных исследований поведения усталостных повреждений в процессе циклических и статических испытаний. Целью экспериментальной работы являлось создание критериальной базы для оценки усталостных повреждений, образующихся в процессе эксплуатации в боковой раме в условиях циклического нагружения, при проведении акустико-эмиссионного контроля литых деталей. Для разработки критериев оценки степени опасности источников акустической эмиссии при акустико-эмиссионном контроле боковой рамы тележки вагона необходимо установить связь между дефектами, возникающими в конструкции литых деталей, и параметрами процесса излучения ультразвуковых колебаний, генерируемых этими дефектами в процессе нагружения при статических испытаниях. Для достижения поставленной цели были обозначены следующие задачи экспериментальной работы:

1) выращивание усталостной трещины в образцах под действием циклических нагрузок. Этот этап испытаний моделировал развитие усталостных трещин в конструкции боковой рамы тележки грузового вагона в процессе эксплуатации под действием циклических вертикальных нагрузок от веса вагона и горизонтальных нагрузок от сил инерции, возникающих в процессе разгона и торможения.

2) испытание образцов с усталостной трещиной в условиях квазистатического нагружения с непрерывной регистрацией акустико-эмиссионной информации от процессов усталостных повреждений. Этот этап испытаний соответствовал процедуре проведения акустико-эмиссионного контроля боковой рамы. При этом фиксировались наиболее информативные параметры процесса излучения ультразвуковых волн, связанные с реальными физическими процессами повреждаемости в материале, - количество сигналов акустической эмиссии и их амплитуда.

3) определение степени опасности источника акустической эмиссии, связанного с усталостным повреждением путем оценки длительности роста усталостной трещины. Определенное при этом количество циклов до достижения трещиной критического размера характеризует живучесть образца, степень опасности источника акустической эмиссии, связанного с данным усталостным повреждением, и определяет время эксплуатации конструкции до следующего акустико-эмиссионного освидетельствования.

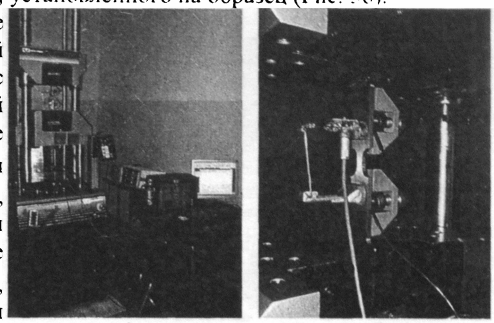
Испытательная установка состоит из разрывной машины Instron 300DX и акустико-эмиссионной системы ALine-32D (Рис. 5а).

Образцы (Рис. 6) с концентратором напряжения подвергались циклическим испытаниям на растяжение. Концентратор напряжения выполнен проволочно-эрозионной резкой. Образцы вырезались из боковых рам тележек грузовых вагонов модели 18-578, изготовленных из стали 20ГФЛ, и подвергались механической обработке.

Сигналы акустической эмиссии, сопровождающие процесс испытаний, записывались с помощью двух акустико-эмиссионных преобразователей,

установленных на образец. Изменение нагрузки фиксировалось в режиме реального времени в акустико-эмиссионной системе через параметрический канал с помощью экстензометра, установленного на образец (Рис. 5б).

Циклическое нагружение в области малоцикловой усталости проводили с контролируемой величиной напряжения $\Delta\sigma = 2\sigma_a = 0{,}74\sigma_B$ (где σ_B - предел прочности при статическом растяжении), коэффициентом асимметрии цикла $R_\sigma = 0$ (знакопостоянное отнулевое растяжение), изменением амплитуды напряжения цикла по треугольному закону, со скоростью нагружения 1,6 кН/с.



а) б)

Рис. 5. Общий вид испытательной установки (а) и образец, зажатый захватами испытательной машины с установленным экстензометром и преобразователями акустической эмиссии (б)

Величина испытательного напряжения была выбрана с учетом значений локальных напряжений наиболее нагруженных участков боковой рамы, определенных по результатам анализа напряженно-деформируемого состояния конструкции при воздействии эксплуатационных нагрузок.

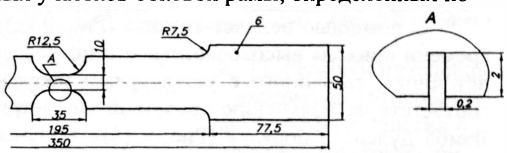


Рис. 6. Образец для испытаний

На этапе выращивания усталостной трещины в каждом цикле во временном интервале возрастания нагрузки были зафиксированы сигналы от процесса распространения усталостного повреждения. Установлено, что сигнал акустической эмиссии, регистрируемый в пределах каждого цикла, соответствует продвижению трещины на величину усталостной бороздки (Рис. 7).

а) б)

Рис. 7. Электронная топограмма усталостной зоны излома образца, показывающая бороздчатый микрорельеф (а), и регистрация сигналов акустической эмиссии от процесса формирования бороздчатого микрорельефа

Было установлено увеличение доли высокочастотной составляющей по мере развития усталостного повреждения (Рис. 8).

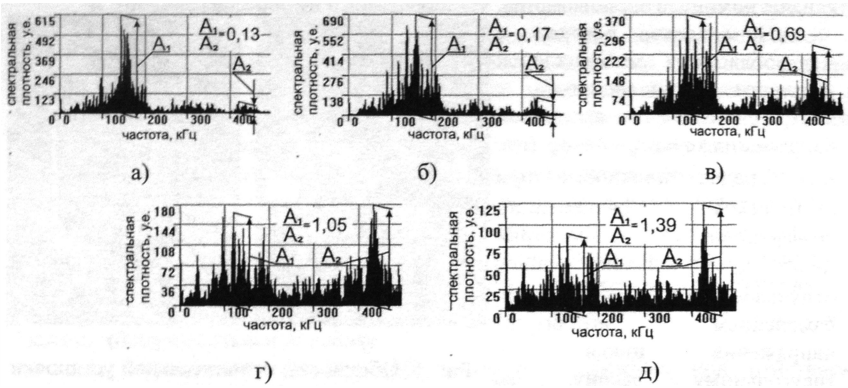


Рис. 8. Спектральная плотность сигнала акустической эмиссии от процесса развития усталостной трещины на различных этапах её роста; а) после 6500 циклов, длина трещины 0,15 мм., б) после 7600 циклов, длина трещины 0,45 мм., в) после 8200 циклов, длина трещины 0,55 мм., г) после 9000 циклов, длина трещины 0,7 мм., г) после 9200 циклов, длина трещины 0,9 мм

С помощью вейвлет-анализа (Рис. 9 (а)) было установлено, что разница времени прихода высокочастотной и низкочастотной составляющей сигнала от источника, связанного с усталостным повреждением, составляет 20 мкс, что соответствует излучению трещиной симметричной и антисимметричной волн Лэмба нулевого порядка (Рис. 9 (б)). Излучение симметричной волны Лэмба нулевого порядка происходит на частоте 412 кГц, излучение антисимметричной волны Лэмба нулевого порядка – на частоте 125 кГц.

Таким образом, с помощью вейвлет-анализа представляется возможным по разнице времени прихода высокочастотной и низкочастотной составляющей сигнала от источника, связанного с ростом усталостной трещины, определять удаление усталостного повреждения от преобразователя акустической эмиссии, а по соотношению плотности энергии между высокочастотной и низкочастотной составляющей оценивать размер усталостной трещины.

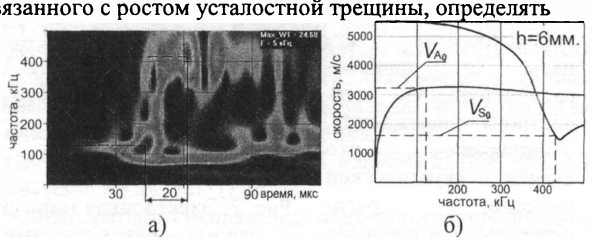


Рис. 9. Вейвлет спектрограмма сигнала от процесса развития усталостной трещины (а) и дисперсионные кривые волн Лэмба нулевого порядка для волновода толщиной 6 мм (б)

В процессе экспериментальных исследований был определен минимальный размер усталостного повреждения, при котором генерируемые им сигналы акустической эмиссии превышали амплитудный порог дискриминации при статических испытаниях. Таким образом, была произведена оценка чувствительности акустико-эмиссионного контроля в условиях диагностирования боковых рам тележек грузовых вагонов. Минимальный размер усталостной трещины, выявляемой при статических испытаниях боковых рам тележек грузовых вагонов, составил 0,25 мм. (Рис. 10).

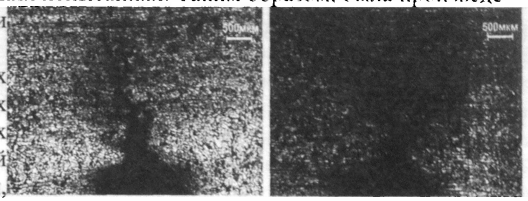


Рис. 10. Усталостная трещина в образце (1 и 2 сторона образца) перед проведением статических испытаний

При статических испытаниях максимальная нагрузка на 20 % превышала нагрузку при циклических испытаниях. В процессе статических испытаний были зафиксированы сигналы акустической эмиссии (Рис. 11):

- во время предварительного нагружения;
- в процессе превышения испытательной нагрузки циклических испытаний на 4%;
- при выдержках на уровне превышения испытательной нагрузки циклических испытаний на 4% и 8%;
- при сбросе нагрузки.

Рис. 11. Графики изменения амплитуды сигналов акустической эмиссии с наложенным графиком нагружения при статическом испытании образца с усталостной трещиной

Были сформулированы следующие дефектоскопические признаки обнаружения усталостной трещины длиной 0,25 мм., зафиксированные в Таблице 1.

Таблица 1.

Дефектоскопические признаки обнаружения усталостной трещины длиной 0,25 мм

№	Дефектоскопический признак	Амплитуда, дБ	Количество сигналов
1.	Наличие сигналов в процессе предварительного нагружения.	37,5	19
2.	Наличие сигналов в процессе превышения эксплуатационной нагрузки.	37,5	3
3.	Наличие сигналов на сбросе нагрузки	41	4

В процессе испытаний образца было установлено изменение механизма разрушения. На начальном этапе разрушение развивалось по усталостному механизму в условиях плоской деформации. По мере увеличения длины трещины и при переходе к плоскому напряженно-деформированному

состоянию усталостный характер разрушения сменяется механизмом объединения микропор. Сигналы акустической эмиссии от процесса формирования ямочного микрорельефа начинают регистрироваться за 100 циклов до разрушения. По мере приближения к разрушению амплитуда сигналов акустической эмиссии от процесса формирования бороздчатой структуры уменьшается, а амплитуда сигналов акустической эмиссии от процесса формирования ямочного микрорельефа увеличивается (Рис. 12).

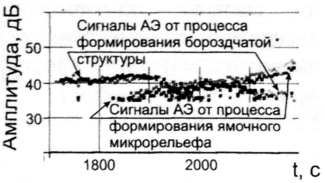


Рис. 12. График изменения во времени амплитуды сигналов акустической эмиссии от процесса формирования бороздчатой структуры и ямочного микрорельефа

В спектре сигнала акустической эмиссии от процесса формирования ямочного микрорельефа отмечено возрастание доли низкочастотных составляющих и появление составляющей на частоте 300 кГц по отношению к сигналу от процесса формирования бороздчатой структуры (Рис. 13).

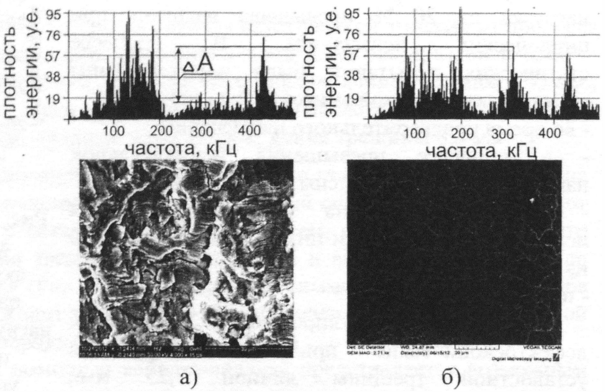


Рис. 13. Спектральная плотность сигналов акустической эмиссии от процесса формирования бороздчатой структуры (а) и ямочного микрорельефа (б) и соответствующие электронные топограммы

Четвертая глава посвящена разработке приложения к методике акустико-эмиссионного контроля боковых рам и надрессорных балок тележек модели 18-100, регламентирующего процесс оценки источников акустической эмиссии при акустико-эмиссионном контроле боковых рам тележек модели 18-578.

Существующая методика акустико-эмиссионного контроля литых деталей грузовых железнодорожных вагонов разработана для обследования боковых рам и надрессорных балок тележек модели 18-100, изготавливаемых из стали 20ГЛ. В связи с изменением конструкции и материала боковой рамы появилась необходимость корректировки существующей методики в части оценки источников акустической эмиссии, выявляемых в процессе акустико-эмиссионного контроля.

На основании экспериментальных исследований было установлено соответствие между усталостным повреждением, характеризуемым линейными

размерами, и источником акустической эмиссии, характеризуемым количеством сигналов и их амплитудой. Таким образом, степень опасности источника акустической эмиссии, связанного с ростом усталостной трещины, может быть оценена по количеству сигналов, излучаемых источником, и их амплитуде. Количество сигналов акустической эмиссии, излучаемых источником, и значение их амплитуды являются браковочными признаками при оценке источников акустической эмиссии при проведении акустико-эмиссионного контроля литых деталей грузовых вагонов.

Для распространения результатов экспериментальных исследований, полученных на образцах, на реальные конструкции литых деталей грузовых вагонов боковая рама в зависимости от уровня напряженно-деформируемого состояния и вероятности расположения металлургических дефектов разбивается на 36 зон с различными конфигурациями и критериями дефектности (Рис. 14.)

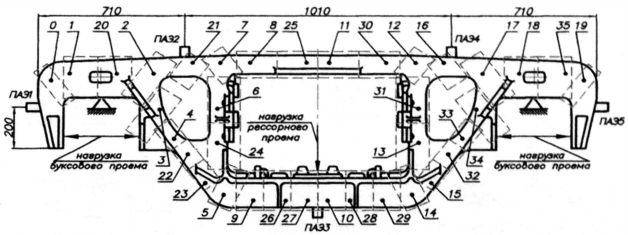


Рис. 14. Схема акустико-эмиссионного контроля боковой рамы модели 18-578

В работе Т.П. Севериновой «Расчетно-теоретическое обоснование живучести боковых рам и надрессорных балок с допустимыми дефектами», реализуя концепцию обеспечения безопасной эксплуатации по условию эксплуатационной живучести, путем интегрирования уравнения скорости роста усталостной трещины эквивалентной реальным дефектам конструкции боковой рамы, определен минимальный размер усталостной трещины, выявление которой обеспечит безопасную эксплуатацию боковой рамы в межремонтный период (2 года) до следующего обследования. Данный размер усталостного повреждения составил 2 мм. Таким образом, принимая для боковой рамы размер недопустимого дефекта равным чувствительности акустико-эмиссионного контроля, обеспечивается безопасная эксплуатация конструкции боковой рамы в межремонтный период с коэффициентом надежности равным 8. Коэффициент надежности учитывает рассеяние скоростей роста трещин, обусловленное рассеянием характеристик роста трещин в материале.

Для зон боковой рамы с максимальным значением внутренних напряжений и максимальной вероятностью возникновения металлургических дефектов браковочное количество импульсов акустической эмиссии и их амплитуда соответствуют параметрам процесса излучения акустических волн от усталостных повреждений минимальных размеров, зафиксированных

методом акустической эмиссии при статическом испытании образцов. Браковочные критерии для других зон корректируются в зависимости от изменения уровня внутренних напряжений и вероятности возникновения металлургических дефектов. Создание критериальной системы оценки источников акустической эмиссии по данному принципу обеспечивает выявление усталостных повреждений, которые приводят к разрушению конструкции боковой рамы в межремонтный период до следующего проведения акустико-эмиссионного обследования.

Критерии браковки боковой рамы тележки 18-578 приведены в Таблице 2.

Таблица 2.

Критерии браковки боковой рамы тележки 18-578

Номер зоны контроля	Наименование зоны контроля	Критерий браковки (пороговое число импульсов)*
0	Внешний угол левого буксового проема	10
1	Опорная поверхность левого буксового проема	10
2	Внутренний угол левого буксового проема	5
3	Внешняя часть левого технологического окна	5
4	Наклонная плоскость левая	10
5	Левый нижний угол рессорного проема	5
6	Левая стойка рессорного проема	15
7	Левый верхний угол рессорного проема	10
8	Верхний пояс рессорного проема слева	15
9	Нижний пояс рессорного проема слева	10
10	Нижний пояс рессорного проема справа	15
11	Верхний пояс рессорного проема справа	15
12	Правый верхний угол рессорного проема	10
13	Правая стойка рессорного проема	10
14	Правый нижний угол рессорного проема	5
15	Наклонная плоскость правая	10
16	Внешняя часть правого технологического окна	10
17	Внутренний угол правого буксового проема	5
18	Опорная поверхность правого буксового проема	10
19	Внешний угол правого буксового проема	10
20	Опорная поверхность левого буксового проема	10
21	Внешняя часть левого технологического окна	10
22	Наклонная плоскость левая	10
23	Наклонная плоскость левая	10
24	Левая стойка рессорного проема	10
25	Верхний пояс рессорного проема слева	15
26	Нижний пояс рессорного проема слева	15
27	Нижний пояс рессорного проема слева	15
28	Нижний пояс рессорного проема справа	15

29	Нижний пояс рессорного проема справа	10
30	Верхний пояс рессорного проема справа	15
31	Правая стойка рессорного проема	15
32	Наклонная плоскость правая	10
33	Наклонная плоскость правая	10
34	Внешняя часть правого технологического окна	5
35	Опорная поверхность правого буксового проема	10

* Подсчет импульсов ведется для сигналов с амплитудой превышающей 37 дБ.

Практическое применение методики акустико-эмиссионного контроля литых деталей тележек грузовых железнодорожных вагонов реализовано на базе акустико-эмиссионного комплекса A-Line 32D. Анализ акустико-эмиссионной информации производится в автоматическом режиме. Литая деталь подлежит браковки при регистрации из зоны расположения источника акустической эмиссии импульсов в количестве, превышающем или равном количеству импульсов определенному в соответствии с таблицей 1 для каждой зоны, при этом на экране акустико-эмиссионной системы зона расположения такого источника закрашивается красным цветом (Рис. 15).

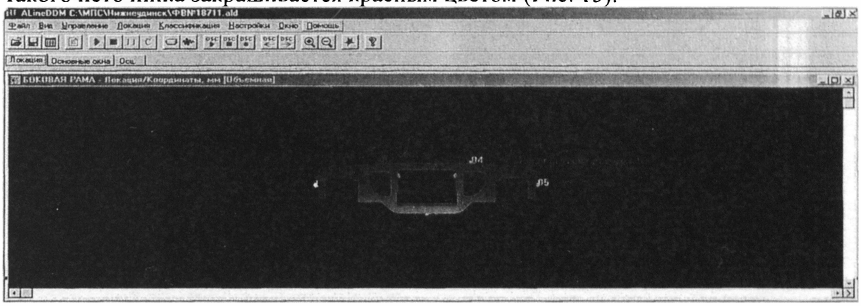


Рис. 15. Пример индикации результатов акустико-эмиссионного контроля боковой рамы с зарегистрированными источниками сигналов акустической эмиссии в областях опорной поверхности левого буксового проема и внешнего угла правого буксового проема

Основные выводы и результаты:

1. С помощью данных акустической эмиссии была произведена регистрация процесса распространения трещины. Для усталостного механизма распространения повреждения (приращение длины трещины на величину шага бороздки за каждый цикл) характерно генерирование по одному сигналу акустической эмиссии амплитудой 45 - 47 дБ в пределах каждого цикла при достижении коэффициента интенсивности напряжений значения $K_{th} = 16{,}5 МПа\sqrt{м}$.

2. С помощью спектрального анализа сигналов акустической эмиссии, генерируемых усталостной трещиной, произведено разделение этапов формирования бороздчатой структуры и ямочного микрорельефа.

3. При проведении экспериментальных исследований было установлено появление и постепенное преобладание высокочастотной составляющей в спектре сигнала акустической эмиссии от усталостной трещины по мере увеличения её длины.
4. С помощью вейвлет - анализа было установлено, что волновой пакет, излучаемый усталостной трещиной, состоит из симметричной и антисимметричной волн Лэмба нулевого порядка, имеющих различные частотные характеристики и значения фазовой скорости.
5. Было исследовано поведение образцов с усталостными трещинами, подвергавшихся статическим нагружениям. Определен минимальный размер усталостного повреждения, выявляемого в условиях статических испытаний. Определена связь между усталостным повреждением, характеризуемым линейными размерами, и параметрами процесса излучения акустических волн от усталостной трещины в процессе статических испытаний. Получены критерии, по которым трещина может быть обнаружена в процессе статических испытаний.
6. Разработана методика оценки источников акустической эмиссии, позволяющая определять местоположение, размер усталостного повреждения и возможность дальнейшей эксплуатации конструкции в автоматическом режиме.

Публикации по теме диссертации:

1. Бигус Г.А., Травкин А.А., Даниев Ю.Ф. Вейвлет - анализ сигналов акустической эмиссии при диагностике конструкций // Сварка и диагностика. 2012. №4. С. 34 - 38.

2. Бигус Г.А., Бородин Ю.П., Травкин А.А. Исследования процессов усталости с помощью метода акустической эмиссии // В мире неразрушающего контроля. 2013. № 1 (59). С. 17 – 18.

3. Бигус Г.А., Галкин Д.И., Травкин А.А. Возможности метода акустической эмиссии для оценки поврежденности металла технологических трубопроводов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2011.№ 11.С.44.

4. Бигус Г.А., Травкин А.А. Неразрушающий контроль сварных соединений, выполненных контактной сваркой // Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: Материалы XVII Международной конференции; Ялта – Киев, 2009. С. 154 - 155.

5. Перспективы использования метода акустико-эмиссионного контроля при проведении технического диагностирования сварных конструкций / А.А. Травкин [и др.] // Диагностика оборудования и трубопроводов компрессорных станций: Материалы XXVII тематического семинара (пос. Небуг Краснодарского края, 8 - 13 сентября 2008). Москва, 2009. Т. 2. С. 77 - 87.

6. Бигус Г.А., Бородин ЮП., Травкин А.А. Исследование процессов усталости с помощью метода акустической эмиссии // Акустическая эмиссия. Роль метода в системах комплексного мониторинга технического состояния опасных производственных объектов: Труды и программы конференции 12 – 16 ноября 2012. Москва, 2013. С 210 – 214.