

На правах рукописи

Бехер Сергей Алексеевич

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ СИГНАЛОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И
ЕЕ ПОТОКОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРИ ДИАГНОСТИРОВАНИИ
МЕТАЛЛА ОСЕЙ КОЛЕСНЫХ ПАР

специальность 05.02.11 - «Методы контроля и диагностика в машиностроении»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Новосибирск - 2004

Работа выполнена в Сибирском государственном университете путей сообщения

Научный руководитель: заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Муравьев Виталий Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Москвин Виктор Николаевич


кандидат физико-математических наук,
с. н. с. Иевлев Игорь Юрьевич

Ведущая организация - Научно-исследовательский институт интроскопии при Томском политехническом университете

Защита состоится **"28" апреля** 2004 г. в **14⁰⁰** часов на заседании диссертационного совета Д218.012.04 в Сибирском государственном университете путей сообщения по адресу: 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, **191** (тел/факс: (383-2) 28-74-86. E-mail: beher@stu.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Сибирского государственного университета путей сообщения.

Автореферат разослан **"26" марта** 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  Герахимов СИ.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

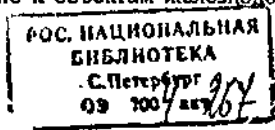
Актуальность работы.

Оси колесных пар вагонов находятся под действием значительных нагрузок, связанных с взаимодействием колеса и рельса. Вращение колесной пары трансформирует статические напряжения от веса вагона в циклические. Возникающие при движении вертикальные и горизонтальные ускорения, удары о стыки приводят к дополнительному динамическому нагружению. Поскольку в материале оси обычно присутствуют металлургические, технологические и эксплуатационные микродефекты, являющиеся очагами зарождения трещин, то в условиях эксплуатации достаточно высока вероятность образования и быстрого развития усталостных дефектов, которые при неблагоприятных факторах способны привести к разрушению оси колесной пары.

Используемые при периодическом диагностировании металла осей средства магнитного и ультразвукового контролен ориентированы на выявление значительных и критических дефектов. В некоторых случаях активно растущие малозначительные дефекты с высоким коэффициентом концентрации напряжений способны привести к разрушению оси за время между периодическими ремонтами.

В материале осей колесных пар, отработавших более 15 лет, накапливаются усталостные повреждения, которые не всегда обнаруживаются средствами магнитной и ультразвуковой дефектоскопии. Вопрос об их безопасной эксплуатации может быть решен только в результате создания и широкого внедрения средств неразрушающего контроля, чувствительных к малозначительным развивающимся дефектам. Таким образом, актуальной является задача выявления растущих трещин, в том числе находящихся на начальной стадии эволюции.

Метод акустической эмиссии (АЭ), основанный на регистрации механических волн, сопровождающих процессы образования, развития и роста дефектов, в том числе малозначительных, недостаточно проработан с точки зрения обработки сигналов АЭ применительно к объектам железнодорожного транс-



порта. Результаты исследований акустической эмиссии в объектах разных типов имеют существенные количественные, а иногда и качественные различия.

Цель исследования:

Разработать методику акустико-эмиссионного диагностирования металла осей колесных пар железнодорожных вагонов при периодическом освидетельствовании в депо с использованием алгоритма определения времени прихода, погрешности и скорости нарастания переднего фронта сигнала, а так же экспериментальных закономерностей амплитудного и пространственного распределений импульсов при пластической деформации и росте усталостной трещины.

Задачи исследования:

1. Исследовать комплекс информативных параметров, составляющих образ источника акустической эмиссии и отражающий амплитудные, временные и частотные свойства развивающейся несплошности в стальных образцах и оси колесной пары.

2. Разработать математический алгоритм вычисления времени прихода сигнала и оценки его информативности с достаточной достоверностью для испытания лабораторных образцов и диагностирования осей колесных пар.

3. Определить численные параметры и вид функции, описывающей амплитудное распределение сигналов акустической эмиссии, возникающей в стальных образцах при монотонном нагружении до разрушения и при испытаниях на усталость.

4. Исследовать при статическом и циклическом нагружении образцов из стали осей вагонов закономерности изменения числа сигналов акустической эмиссии при увеличении нагрузки, росте зоны пластической деформации материала и развитии трещины.

5. Экспериментально и теоретически определить условия распространения импульсов акустической эмиссии в металле оси колесной пары вагона. Рассчитать необходимое количество преобразователей акустической эмиссии и разработать способ их расстановки на поверхности объекта контроля для определения координат источников в материале оси.

6. Провести акустико-эмиссионные испытания дефектных и бездефектных осей колесных пар в условиях вагоноремонтного депо, выполнить тензометрические измерения. Используя полученные данные разработать методику акустико-эмиссионного контроля осей колесных пар вагонов.

Научная новизна:

1. Разработан математический алгоритм вычисления времени прихода импульсов к преобразователю для повышения достоверности определения координат источников акустической эмиссии. Алгоритм позволяет обрабатывать сигналы, состоящие из нескольких мод с различными скоростями распространения, определять погрешность измерения времени и оценивать скорость нарастания переднего фронта.

2. Обнаружено, что амплитудное распределение сигналов акустической эмиссии в стальных образцах описывается суперпозицией двух экспоненциальных распределений. Первое распределение содержит до 85% всех зарегистрированных импульсов со средней амплитудой на входе предварительного усилителя около 80 мкВ, что на порядок меньше средней амплитуды импульсов второй составляющей.

3. Вычислена линейная корреляция объема пластически деформируемого материала с углом наклона графической зависимости числа импульсов акустической эмиссии к оси нагрузок. Определена корреляция нагрузки начала локальной пластической деформации с нагрузкой, соответствующей росту активности акустической эмиссии из этой области. По результатам испытаний на усталость получено распределение мгновенных значений нагрузок, при которых происходит излучение импульсов акустической эмиссии.

Практическая значимость и реализация результатов работы:

Предложен и реализован алгоритм обработки импульсов АЭ для использования в неразрушающем контроле и научных исследованиях. Алгоритм позволяет проводить контроль на объектах, обладающих значительной дисперсией ультразвуковых волн, в условиях сильно затянутых передних фронтов, малых амплитуд сигналов и наличия нескольких скоростей распространения. Ал-

горитм анализа сигналов используется при проведении лабораторных работ и чтении лекций в курсе «Физические основы акустико-эмиссионного контроля».

Разработана и внедрена в вагонном депо на станции Инская (ВЧД-8 ЗСЖД) методика акустико-эмиссионного контроля осей колесных пар железнодорожных вагонов для выявления развивающихся дефектов во всем объеме оси.

Личный вклад автора состоит в постановке задач исследования; разработке вспомогательных устройств и средств сопряжения аппаратурных комплексов; написании программного обеспечения; создании методик обработки сигналов, используемых при проведении лабораторных экспериментов и промышленных испытаний; в анализе результатов экспериментов.

Настоящая работа проводилась при поддержке аспирантского гранта (Указание МПС России от 18.03.2000 № 47У), в соответствии с планом НИОКР МПС России 2002 - 2003 гг. и Программой научно-технического сотрудничества Сибирского государственного университета путей сообщения, СО РАН и Железными дорогами регионов Сибири, Дальнего Востока по совершенствованию технических средств при обеспечении снижения эксплуатационных расходов.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математический алгоритм обработки импульсов акустической эмиссии, основанный на анализе средних значений модуля сигнала и позволяющий определять времена начала импульсов, их погрешности для каждого импульса и средние скорости нарастания переднего фронта.

2. Результаты экспериментальных исследований амплитудного распределения сигналов акустической эмиссии в стальных образцах, позволяющие установить зависимость количества регистрируемых импульсов от значений порога и коэффициента усиления приемных каналов аппаратуры.

3. Значения параметров линейной корреляция объема пластически деформируемого материала с углом наклона кривой числа импульсов акустической эмиссии к оси нагрузок. Статистическое распределение мгновенных значений нагрузок соответствующих возникновению акустической эмиссии от ус-

талостной трещины.

4. Методика акустико-эмиссионного контроля осей колесных пар при освидетельствовании в депо для выявления развивающихся дефектов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается:

- физической обоснованностью решаемых задач;
- большим объемом экспериментальных данных и сопоставлением полученных результатов с результатами других авторов;
- использованием современной сертифицированной и поверенной измерительной аппаратуры, нескольких взаимодополняющих методик измерений и методов статистической обработки результатов;
- сходимостью с результатами ультразвукового и магнитопорошкового контроля.
- применением фундаментальных положений акустики и механики деформируемого твердого тела.

Апробация работы:

Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: XX Уральская региональная конференция "Контроль технологий, изделий и окружающей среды физическими методами". Екатеринбург. 2001; Международная конференция "Разрушение и мониторинг свойств металлов". Екатеринбург. 2001; XVII Петербургская конференция "Ультразвуковая дефектоскопия металлоконструкций". Санкт-Петербург. 2001; Научно-практическая конференция ученых транспортных вузов "Актуальные проблемы Транссиба на современном этапе". Новосибирск. 2001; XVI российская научно-техническая конференция "Неразрушающий контроль и диагностика". Санкт-Петербург. 2002; Региональная научно-практическая конференция "Вузы Сибири и дальнего востока - ТРАНССИБУ". Новосибирск. 2002; Международная конференция "Разрушение и мониторинг свойств металлов". Екатеринбург. 2003.

Публикации.

Автором опубликовано 16 печатных работ, из них 11 работ по теме дис-

сертации.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка литературы из 102 наименований, четырех приложений. Диссертационная работа содержит 145 страниц машинописного текста, включая 5 таблиц и 49 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, поставлена цель и сформулированы основные задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе содержатся обзорные сведения о конструкции и условиях эксплуатации осей колесных пар грузовых вагонов. Приведены описания часто встречающихся усталостных дефектов и механизмов их образования. Выполнен аналитический обзор развития и современного состояния средств и методов диагностики осей колесных пар. Отмечено, что современная система контроля автоматизирована недостаточно, многие операции, влияющие на достоверность результатов контроля, выполняются оператором вручную. Контроль областей колесной пары, склонных к образованию дефектов, проводится при чувствительности, позволяющей обнаруживать уже развитые трещины значительных размеров. Определена потребность в автоматизированном комплексе неразрушающего контроля с высокой чувствительностью к развивающимся дефектам во всем объеме оси.

Проанализированы современные работы, направленные на изучение акустической эмиссии в стальных образцах и ее применение в неразрушающем контроле. Рассмотрена математическая модель источника акустической эмиссии. На примере этой модели показана связь информативных параметров сигналов со свойствами развивающейся несплошности. Описаны некоторые методы определения типа источника по результатам акустико-эмиссионных испы-

таний. В результате проведенного обзора определена возможность выявления развивающихся дефектов в оси колесной пары акустико-эмиссионным методом.

Сравнение экспериментальных результатов различных авторов позволило обнаружить значительные расхождения численных данных, полученных в акустико-эмиссионных испытаниях. Это связано с различием свойств испытываемых материалов, форм образцов и деталей, используемой аппаратуры. Поэтому необходимы предварительные испытания лабораторных образцов с целью получения амплитудных характеристик акустической эмиссии и ее потоковых параметров при развитии трещины и локальной пластической деформации в материале осей колесных пар.

При проведении экспериментов и промышленных испытаний важным этапом обработки результатов является достоверное определение координаты источника в значительно ограниченном объеме материала. Для этого требуется не только фиксировать время прихода сигнала с минимальной погрешностью, но и определять величину этой погрешности. В научной литературе данная тема освещена недостаточно, мало внимания уделено разработке алгоритмов анализа сигналов, которые позволили бы оценивать погрешность измерения времени прихода и скорость нарастания переднего фронта импульса. В тоже время современная АЭ аппаратура позволяет фиксировать и проводить многофакторный анализ информативных параметров сигналов, характеризующих энергетическое содержание источника. Параметры, используемые при составлении диагноза, подбираются индивидуально для каждого объекта контроля или исследования, поскольку форма объекта оказывает на них значительное влияние.

Во второй главе представлен алгоритм обработки сигналов акустической эмиссии для определения времени прихода, погрешности и скорости нарастания переднего фронта; приведены результаты теоретического анализа и математического моделирования предлагаемого алгоритма. Определено влияние геометрии объекта контроля на форму сигналов и амплитудные информативные параметры импульсов акустической эмиссии, установлена корреляция среднеквадратичного отклонения сигнала с числом пересечений сигналом ли-

нии нулевого уровня.

Важной характеристикой источника акустической эмиссии является его координата. Знание месторасположения источника в объекте контроля позволяет проводить дискриминацию и кластеризацию сигналов, выполнять подтверждающий контроль другими методами. В неразрушающем контроле с использованием дискретной акустической эмиссии определение координат источников основывается на измерении разности времен прихода на разнесенные в пространстве преобразователи. Одной из основных погрешностей определения координат является неточность вычисления времени начала импульса. С целью уменьшения этой погрешности и повышения достоверности определения координат источников был предложен специальный алгоритм обработки сигналов акустической эмиссии. Для анализа волнового пакета используется функционал, сопоставляющий сигналу функцию отношения - K_j по формуле (1). Полученная функция принимает максимальное значение (K_{max}) в момент времени (T_{max}), соответствующий началу импульса в пределе бесконечно большого значения отношения сигнал/шум. Характерный вид сигнала и функции отношения приведены на рисунке 1.

$$K_j = \frac{S_{j+Jcp} - S_j}{S_j} = \frac{S_{j+Jcp}}{S_j} - 1, \quad (1)$$

где S_j — среднее модуля сигнала на интервале точек от j до $j+Jcp$;

Jcp — количество точек, по которым проводится усреднение сигнала.

Проведенный аналитический расчет и математическое моделирование сигналов с различным уровнем шума позволили установить, что смещение вычисляемого времени начала импульса от истинного ($t_{умчн}$) связано с максимальным значением функции отношения. Для импульсов с длительностью переднего фронта больше интервала усреднения ($T_\phi > \Delta T$) зависимость имеет вид равенства (2), а для импульсов с относительно короткими фронтами ($T_\phi < \Delta T$) вид неравенства (3).

$$t_{умчн} = \frac{2 \cdot s_{умчн}}{a} = \frac{\Delta T}{K_{max}}, \quad (2)$$

$$t_{\text{умоч}} \leq \frac{\Delta T}{K_{\text{max}}}, \quad (3)$$

где $s_{\text{шум}}$ - среднеквадратичное отклонение модуля шума, мкВ;

a - скорость нарастания переднего фронта сигнала, мкВ/мкс;

ΔT - временной интервал усреднения, мкс;

K_{max} - максимальное значение функции сравнения.

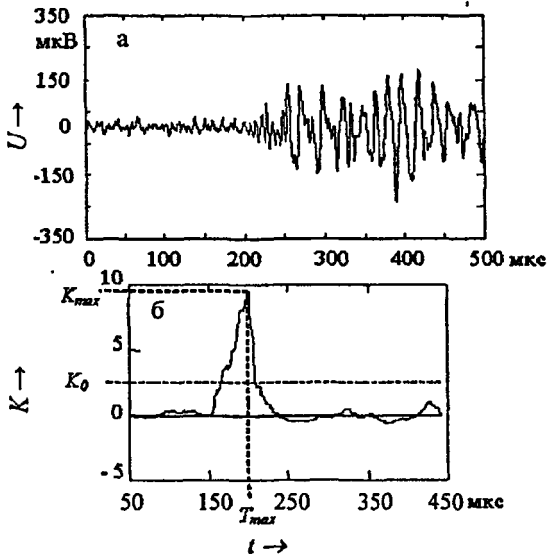
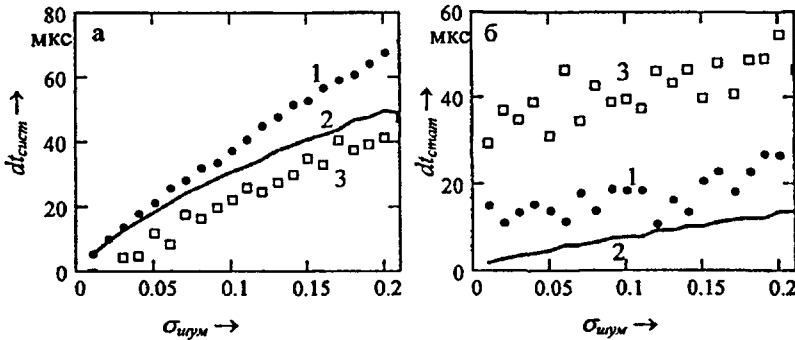


Рисунок 1 - Сигнал АЭ (а) и функция сравнения (б), построенная по формуле (1)

Погрешность определения времени предлагаемым алгоритмом анализировалась одновременно с погрешностью метода плавающего порога, у которого менялся коэффициент ($k_{\text{пор}}$) — отношение уровня порога к среднеквадратичному отклонению шума. На рисунке 2 представлены результаты математического моделирования для сигналов с длительностью переднего фронта 120 мкс и единичной амплитудой при различных уровнях шума.

Систематическая погрешность (среднее смещение времени для группы подобных сигналов) пороговым методом при $k_{\text{пор}} < 3,5$ может быть меньше, чем

у алгоритма основанного на анализе функции отношения. Однако статистический разброс определяемого времени начала импульса относительно среднего при любых значениях коэффициента порога у предлагаемого алгоритма является наилучшим. Подобные зависимости были получены при варьировании длительности нарастания переднего фронта сигналов. Для правильного определения координат источников акустической эмиссии необходимо минимизировать обе погрешности, так как систематическая описывает достоверность определения координат, а вторая (статистическая погрешность) определяет возможность объединения источников в группы для их совместной обработки.



1 - метод плавающего порога ($k_{пор} = 3,5$), 2 - алгоритм, основанный на анализе функции сравнения, 3 — метод плавающего порога ($k_{пор} = 4,0$)

Рисунок 2 — Зависимости среднего сдвига времени начала сигнала — $dt_{сум}$ (а) и среднеквадратичного отклонения — $dt_{стан}$ (б) от уровня шума

В случае значительных систематических погрешностей определения начала сигнала, когда длительность переднего фронта превышает интервал усреднения ($T_{\phi} > \Delta T$), может быть введена поправка с использованием значения максимума функции и формулы (2). Результат моделирования алгоритма с учетом поправки показал, что таким способом может быть достигнуто среднее смещение времени прихода значительно меньше, чем у порогового метода (рисунок 3).

Формулы (2) и (3) также позволяют сделать оценку статистической погрешности, для этого подставим вместо среднего значения модуля шума, сред-

неквадратичное отклонение среднего по J_{cp} измерениям:

$$\Delta t = \frac{2 \cdot \sigma_{ш2}}{a \cdot k_{шрм}} = \frac{\Delta T}{K_{max} \cdot k_{шрм}}, \quad (4)$$

где $k_{шрм}$ - коэффициент зависящий от вида амплитудного распределения шума (для равномерного распределения - $J_{cp}/2$, для модуля гауссова шума — $\sqrt{1,77 \cdot J_{cp}}$).

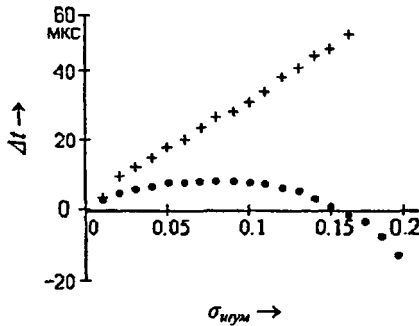


Рисунок 3 – Зависимость систематической погрешности времени прихода импульса от отношения величины шума к амплитуде сигнала для метода с плавающим порогом (+) и для предлагаемого метода (•)

Таким образом, использование предложенного алгоритма позволяет определять координаты источника акустической эмиссии значительно точнее, чем в методе с плавающим порогом. По известному максимуму функции сравнения с использованием формулы (4) может быть вычислен интервал определения времени начала импульса, оценка степени информативности зарегистрированного сигнала. При анализе результатов акустико-эмиссионного контроля часто встает вопрос выделения полезной информации. При этом мешающий фон создают не только посторонние шумы, но и сигналы от источников акустической эмиссии, координаты которых определены абсолютно неверно или с большой погрешностью. Такая ситуация встречается достаточно часто, так как амплитудное распределение сигналов имеет вид близкий к экспоненциальному. Функция сравнения (1) дает возможность оператору АЭ комплекса варьировать степень информативности обрабатываемых сигналов, анализировать достовер-

ность полученных результатов.

Для оценки энергетического содержания излучения источника акустической эмиссии применяют целую серию информативных параметров: максимальное значение импульса, MARSE (Измеренная площадь под огибающей импульса - measured area of the rectified signal envelope), среднее квадратичное отклонение, энергию колебаний. Существенное влияние на эти величины оказывают геометрия и акустические свойства объекта контроля. По способу определения все параметры разделяются на две группы. Первая группа параметров определяется в одной точке сигнала или на коротком временном интервале относительно длительности импульса. К ним относятся амплитуда импульса, среднее квадратичное отклонение, вычисленное в начальной части импульса. Вторая группа основывается на анализе временного отрезка, сравнимого со временем затухания акустической волны в стальном материале. Каждая группа имеет свою собственную область применения.

Информативные параметры первой группы хорошо описывают источники акустической эмиссии, расположенные в протяженных объектах, для которых выполняются условия:

$$L \gg \frac{1}{\delta_3}, \quad (5)$$

$$L \gg c \cdot \tau_{AЭ}, \quad (6)$$

где L — протяженность объекта контроля, м;

δ_3 - коэффициент затухания акустических волн в объекте контроля, 1/м;

c - скорость акустических волн, м/с;

$\tau_{AЭ}$ — длительность АЭ импульса без учета реверберационных процессов, с.

Для объектов, размеры которых меньше или сравнимы с характерным расстоянием, на котором затухают акустические волны, амплитуда является случайной величиной со значительной дисперсией (более 20 %). Интегральные параметры, наоборот, имеют достаточно сильную корреляцию (0,99) с энергетическим содержанием первоначальной волны от источника. Например, в средней части оси колесной пары, в которой для поверхностных волн выполняется условие (6), сигналы должны характеризоваться максимальной амплитудой. В

лабораторных образцах, для которых нарушаются оба условия (5) и (6), наименьший статистический разброс, связанный с геометрией образца, имеют интегральные параметры.

Исследована корреляция среднеквадратичного отклонения сигнала и числа пересечений линии нулевого уровня. При малых значениях среднеквадратичного отклонения, пока амплитуда регулярной составляющей сигнала меньше уровня шума, среднее число пересечений нулевого уровня равно произведению характерной частоты шума на период наблюдения (для белого шума частота равна половине частоты дискретизации). Если амплитуда сигнала повышается над уровнем шума, уменьшается время, в течение которого шум может достигать нулевого уровня и давать вклад в полное число пересечений нулевого уровня. Дальнейшее увеличение среднеквадратичного отклонения приводит к тому, что число пересечений нулевого уровня асимптотически стремится к произведению некоторой средней частоты сигнала на временной интервал наблюдения. Границы применимости описанного выше механизма задаются следующим выражением (7).

$$A_c < A_w / \sin(\omega \cdot \Delta/2), \quad (7)$$

где A_w - амплитуда шума, мВ;

A_c - амплитуда сигнала, мВ;

ω - характерная круговая частота сигнала, рад/с;

Δ - время дискретизации АЦП, с.

Рассмотренные информативные параметры сигнала соответствуют единичному акту акустической эмиссии и характеризуют текущее состояние источника. При акустико-эмиссионных испытаниях излучающий объем материала претерпевает значительные изменения и, следовательно, меняется характер сигналов. Для описания процесса развития источника акустической эмиссии необходимо применять потоковые характеристики сигналов: число импульсов, суммарный счет, скорость суммарного счета, активность, амплитудные и временные распределения. Для определения типа источника по результатам акустико-эмиссионных испытаний требуются знания свойств потоковых характе-

ристик и закономерностей их изменения при развитии источника. Такие данные могут быть получены только в результате лабораторных экспериментов на образцах.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований акустической эмиссии в образцах из осевой вагонной стали при статическом нагружении и испытаниях на усталость: определены зависимости числа импульсов акустической эмиссии из области материала от нагрузки и пластической деформации, исследованы закономерности амплитудного распределения сигналов и распределения нагрузок, соответствующих актам акустической эмиссии при циклическом нагружении.

В работе провели испытания 15-ти плоских образцов из осевой стали толщиной 9 мм. В середине рабочей части образца был выполнен искусственный V-образный концентратор с углом раскрытия 90° , глубиной 2 мм и радиусом при вершине 0,01 мм. Механическое одноосное нагружение образцов осуществлялось на установке для испытания материалов INSTRON 8800. Акустическую эмиссию регистрировали системой СЦАД 16.03. С противоположных сторон от концентратора на образец устанавливали два преобразователя таким образом, чтобы по времени прихода определять продольную координату источника акустической эмиссии. Исследования состояли из двух серий экспериментов. В первой серии образцы растягивали монотонно возрастающей нагрузкой до разрушения (рисунок 46). Во второй серии прикладывали циклически изменяющуюся нагрузку.

Рассмотрены закономерности потоковых характеристик акустической эмиссии. При растяжении образцов возникают две области материала с различными механическими напряжениями. В процессе нагружения первым начинает пластически деформироваться материал вблизи от концентратора напряжений. Низкая активность сигналов акустической эмиссии объясняется локальностью пластической деформации, сосредоточенной в окрестности концентратора (прямая I на рисунке 4а). При дальнейшем повышении нагрузки весь образец переходит в стадию пластического деформирования. Значительно увеличивает-

ся количество источников акустической эмиссии, поэтому активность регистрируемых сигналов значительно возрастает (прямая 2 на рисунке 4а). Таким образом, число импульсов АЭ, возникающих в рабочей части образца, является суперпозицией двух линий. Первая прямая начинается при 55 кН, вторая при 105 кН.

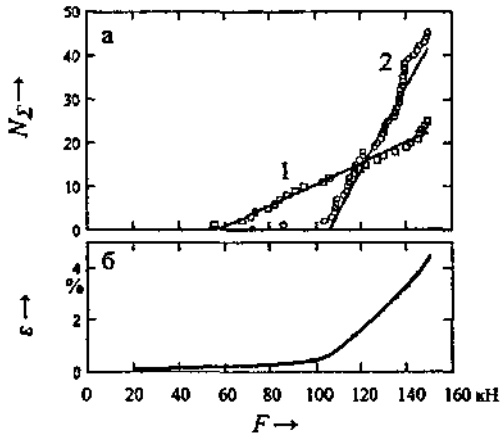


Рисунок 4 - Зависимость числа импульсов - N_{Σ} (а) (источники вблизи концентратора — 1; вдали от концентратора — 2) и относительной деформации образца вдали от концентратора — ε (б) от нагрузки — F
прямые линии - результат аппроксимации

Регрессионный анализ выполнили для источников акустической эмиссии, расположенных в трех частях образца с различными протяженностями (/.): вблизи от концентратора (- 5 мм; 5 мм), вдали от концентратора (30 мм; 70 мм) и (- 70 мм; - 30 мм). Экспериментальные данные аппроксимировали линейной зависимостью:

$$N = a \cdot L \cdot S \cdot (F - F_0), \quad (8)$$

где //—число импульсов акустической эмиссии;

F - растягивающее усилие, кН,

F_0 - параметр аппроксимации, кН;

a - коэффициент аппроксимации, $\sqrt{(\text{кН} \cdot \text{мм}^3)}$;

S — площадь поперечного сечения образца, 252 мм^2 ;

L - длина анализируемой части образца, мм.

Таблица 1 - Коэффициенты линейной аппроксимации зависимости числа импульсов АЭ от нагрузки

$L, \text{ мм}$	$a, 10^{-3} \cdot 1/(\text{кН} \cdot \text{мм}^3)$	$F_0, \text{ кН}$
10 (от – 5 до 5 мм)	9,2	57
40 (от – 30 до – 70 мм)	9,6	101
40 (от 30 до 70 мм)	9,4	105

Результаты аппроксимации приведены в таблице 1. Из которой следует, что значения тангенса угла наклона суммарного счета с осью нагрузок пропорциональны протяженности анализируемой части образца. Вычисленный по экспериментальным данным коэффициент линейной корреляции составил 0,96. Таким образом, количество зарегистрированных импульсов АЭ линейно зависит от нагрузки и объема деформируемого материала. Начало локальной пластической деформации в материале образца соответствует возникновению сигналов акустической эмиссии из этой области. Нагрузка начала локальной текучести материала определялась по пересечению оси нагрузок с линией числа сигналов, определенной методами регрессионного анализа.

Понимание связи амплитудного распределения с характером перестройки структуры материала позволяет оптимальным образом настроить измерительную систему (коэффициенты усиления, пороги дискриминации) и определить численные значения уровней браковки. В данной работе для аппроксимации экспериментальных данных применяли суперпозицию двух экспоненциальных распределений. Первое из них описывает группу сигналов с относительно небольшими амплитудами, второе - распределение сигналов со значительными амплитудами. Предпосылкой выбора такой функции распределения послужили следующие экспериментальные данные:

- сигналы различных групп разнесены во времени, то есть при статическом нагружении образца сначала регистрируются сигналы низкоамплитудной груп-

пы, а затем появляются сигналы высокоамплитудной группы;

- источники сигналов из различных групп часто разнесены в пространстве, источники со значительной амплитудой сигналов, как правило, сосредоточены вблизи концентратора.

Аппроксимация экспериментально полученной функции распределения (рисунок 5) проводилась методом максимального правдоподобия с использованием теоретической функции, заданной в следующем виде:

$$Fr(A) = 1 - \alpha_1 \cdot \exp\left(-\frac{A}{A_1}\right) - \alpha_2 \cdot \exp\left(-\frac{A}{A_2}\right), \quad (9)$$

где A - амплитуда импульсов АЭ, мкВ;

A_1, A_2 - параметры амплитудного распределения, характеризующие среднюю амплитуду импульсов, мкВ;

α_1, α_2 - параметры амплитудного распределения, характеризующие вероятность появления сигналов со средними амплитудами A_1, A_2

В результате обработки данных по 10 образцам, были получены следующие значения коэффициентов аппроксимации в формуле (9): $\alpha_1 = 0,84 \pm 0,07$; $A_1 = 85$ мкВ (± 20); $\alpha_2 = 0,16 \pm 0,07$; $A_2 = 840$ мкВ (± 190). Следовательно, сигналы первой группы со средней амплитудой 85 мкВ (на входе предварительного усилителя) являются доминирующими, их доля в общем количестве составляет 84 %. Среднее значение высокоамплитудных сигналов около 840 мкВ. Экспериментальные данные и результат аппроксимации представлены на рисунке 5 в полулогарифмическом масштабе.

Циклическое нагружение образцов проводилось растягивающей силой, которая изменялась по синусоидальному закону с частотой от 3 до 5 Гц. Наличие шумоизолирующего войлочного слоя с большой величиной собственной деформации в силовой системе установки обуславливало необходимость создания минимального усилия цикла 18..20 кН. Максимальное значение нагрузки приходилось на область малоциклового усталости и составляло от 90 до 100 кН. Все образцы испытывались до образования трещины длиной от 5 до 7 мм, что соответствовало 20..30 тысячам циклов.

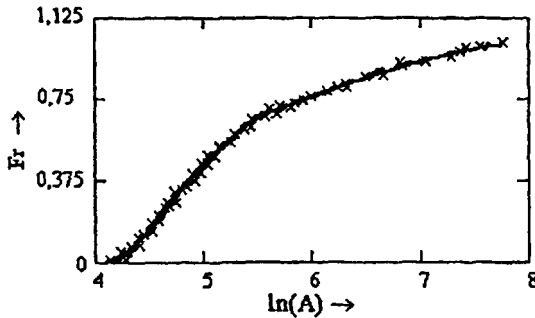
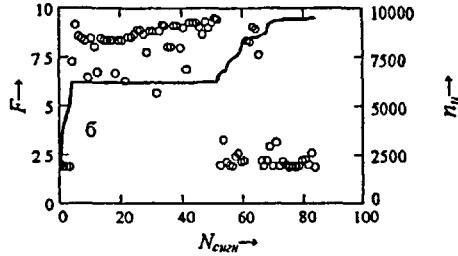


Рисунок 5 - Амплитудное распределение импульсов акустической эмиссии
 X - экспериментальные данные,
 — - аппроксимация двумя экспоненциальными распределениями

Результаты тензометрии позволили установить, что деформация образца, измеренная при минимальной нагрузке в цикле, монотонно возрастает от цикла к циклу. Зависимость числа импульсов акустической эмиссии от времени в общем случае подобна кривой деформаций, однако в определенные моменты времени наблюдается локальное возрастание активности в несколько раз. Были обнаружены два различных типа сигналов акустической эмиссии в образцах с растущей усталостной трещиной, различающиеся иницирующими их нагрузками. На рисунке 6 одновременно представлены зависимости мгновенного значения растягивающей силы и порядкового номера цикла, которые соответствуют актам АЭ, от порядкового номера сигнала АЭ.

Для сигналов АЭ первого типа характерны относительно невысокие значения средней активности АЭ (меньше $0,1 \text{ } \frac{\text{суб}}{\text{с}}$), при этом внутри цикла нагружения сигналы возникают, когда значение растягивающего усилия близко к минимальному (до 14... 16 % максимальной нагрузки.). Второй тип сигналов возникает при высоких нагрузках (от 80 % максимальной нагрузки) и отличается на порядки большими значениями активности сигналов АЭ. Механические импульсы от источника второго типа способны создавать катастрофическое нарастание числа сигналов АЭ. Необходимо отметить также и тот факт, что все полученные в экспериментах сигналы возникали в момент возрастания нагруз-

ки на образец.



○ - сила (F), действующая на образец в момент излучения сигнала АЭ; --- номер цикла ($n_{\text{ц}}$) от порядкового номера сигнала ($N_{\text{сигн}}$)

Рисунок 6 – Зависимость номера цикла и нагрузки на образец внутри цикла от номера зарегистрированного импульса акустической эмиссии

В результате экспериментальных исследований получены зависимости числа импульсов от нагрузки и деформации, функция амплитудного распределения акустической эмиссии, возникающей при локальной и общей пластической деформации материала, а также при развитии усталостной трещины.

В четвертой главе представлены результаты исследования акустических свойств оси колесной пары, анализ продольных механических напряжений оси при нагружении и результаты акустико-эмиссионных испытаний осей колесных пар бывших в эксплуатации, необходимых для разработки методики контроля.

Полученные в результате испытаний сигналы на преобразователе, расположенном в средней части оси, состоят из серии повторяющихся импульсов с передним фронтом меньше 10 мкс. Для предподступичной части оси и шейки, которые расположены с другой стороны ступицы колеса, характерными являются одиночные импульсы с временем нарастания переднего фронта больше 100 мкс. Это связано с тем, что источник акустической эмиссии излучает поверхностные, продольные и поперечные волны. Амплитуда поверхностных волн на расстоянии r от источника уменьшается из-за расхождения пучка в \sqrt{r} раз медленнее объемных. Поэтому поверхностные волны дают основной вклад в сигнал на преобразователе акустической эмиссии, установленный в средней части оси. Наличие повторяющихся импульсов связано с несколькими возмож-

ными путями распространения волны из одной точки в другую по поверхности цилиндра. Упругая поверхностная волна, попадая в область прессового соединения переизлучает продольные и поперечные волны, которые частично проникают в колесо и в предподступичную часть оси. Установленный с внешней стороны от колеса преобразователь регистрирует плавно возрастающие сигналы с затянутыми передними фронтами. Измеренные скорости распространения акустических импульсов составили для поверхностных волн 2950 м/с (± 15 м/с), для продольных волн—5900 м/с (± 22 м/с).

С целью определения координат источников АЭ в оси колесной пары был реализован алгоритм, использующий шесть преобразователей на оси и по одному на каждом диске колеса (рисунок 7). Ось разбивается на пять зон. Первая и вторая внешние зоны образованы шейками и предподступичными частями, третья и четвертая включают подступичные части оси. Пятая зона это вся средняя часть оси. Внутри каждой зоны координаты определяются двумя преобразователями, с использованием алгоритмов линейной локализации. Для разделения актов АЭ по зонам используется комплексный алгоритм, основанный на анализе длительности переднего фронта и времени прихода сигналов. Вычисление этих параметров сигналов производится с использованием алгоритма, основанного на анализе функции сравнения и описанного во второй главе.

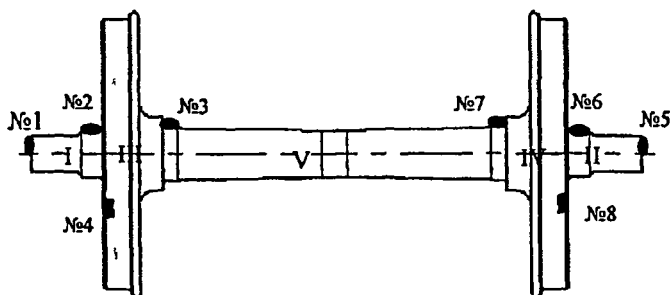


Рисунок 7 - Схема расстановки ПАЭ на колесной паре для определения координат источников АЭ в оси и локационные зоны (I, II, III, IV, V)

Для акустико-эмиссионных испытаний использовался специально разра-

ботанный стенд, обеспечивающий максимальную вертикальную нагрузку 200 кН на каждую шейку оси с упором на колеса. В местах контакта захватов и упоров стенда с колесной парой устанавливали резиновые прокладки.

Максимальная допустимая статическая нагрузка в эксплуатации на одну шейку составляет 103 кН. При полной загрузке вагона возникают механические напряжения в шейке 33 МПа, в галтельном переходе - 41 МПа, в подступичной части оси - 30 МПа, в средней части - 49 МПа. В процессе движения вагона появляется дополнительная динамическая сила, которая может превышать статическую в несколько раз. Соответствующие циклические напряжения в материале оси изменяются случайным образом, их максимальные значения описываются функцией распределения, быстро убывающей в сторону высоких напряжений. Согласно нормативной документации при расчете на долговечность осей к разрушающим относят напряжения превышающие половину предела усталостной прочности, который в различных сечениях оси составляет: в шейке - 150 МПа, в подступичной части оси - 130 МПа, в средней части - 180 МПа.

Выполнен расчет напряженного состояния оси колесной пары, при нагружении на испытательном стенде. Численные значения соответствующих максимальных растягивающих упругих напряжений при величине прикладываемой нагрузки 100 кН составляют: шейка — 52 МПа, галтель — 71 МПа, подступичная часть - 42 МПа, средняя часть - 74 МПа. В поперечном сечении реализуется ситуация характерная для чистого изгиба. При этом, в секторе с углом раскрытия 90° возникают напряжения больше 71% от максимального в верхней части оси, с углом 72° больше 81%, 60° - 87%. Так как в верхней части оси реализуются максимальные растягивающие напряжения, а в середине оси нулевые, необходимо проверять ось колесной пары последовательно, поворачивая ее вокруг оси вращения на определенный угол, зависящий от величины максимальной прикладываемой нагрузки. Выполненные расчеты напряженного состояния показали, что при максимальной нагрузке испытания 240 кН напряжения, превышающие половину усталостной прочности, реализуются в секторе с углом 90° . Это требует четырех нагружений оси. При максимальном усилии испыта-

ния 200 кН эти напряжения реализуются в секторе с углом 72° , это соответствует пяти нагружениям оси. Соответственно, 190 кН обеспечивает испытание оси за шесть нагружений с поворотом на 60° .

Испытания осей колесных пар бывших в эксплуатации проводились в вагонном депо на станции Инская Западно-Сибирской железной дороги (таблица 2). Две оси имели дефекты, подтвержденные штатными методами. В средней части первой оси магнитопорошковым методом выявлена трещина длиной 6 см. При акустико-эмиссионном испытании зарегистрировали 8 сигналов с амплитудой больше 500 мкВ на входе предварительного усилителя в центре третьей зоны (рисунок 8).

Таблица 2 - Результаты АЭ контроля осей колесных пар вагонов

номер оси	Параметры АЭ			координата источника, мм	Результаты магнитопорошкового (МПК) и ультразвукового (УЗК) контролей
	N_{Σ}	N_{Σ} $A > 500 \text{ мкВ}$	$A_{\text{ср}}$ мкВ		
3932-186	93	15	1200	120 (± 15)	забракован УЗК: шейка, $K_d = 3 \text{ дБ}$,
19409-29	41	0	89	-	годен
1507-87	107	0	84	-	годен
56304-29	46	8	690	1160 (± 20)	забракован МПК: середина оси, поперечная трещина длиной 6 см
92140-5	64	0	132	-	годен

Испытания оси с дефектом, выявляемым ультразвуковым дефектоскопом в шейке оси, показали наличие достаточно активных источников акустической эмиссии в этом месте. Было зарегистрировано 15 импульсов акустической эмиссии из области шейки, амплитуды принятых сигналов больше 700 мкВ.

При нагружении бездефектных осей основное внимание уделено потенциальным источникам сигналов акустической эмиссии, расположенным в местах прессового соединения колес и внутренних колец буксовых подшипников с осью. Испытания показали, что количество сигналов, связанных с процессами

трения и пластического деформирования, сильно изменяется от нагружения к нагружению от единиц до сотен. При этом не было обнаружено источников акустической эмиссии с амплитудами импульсов больше 300 мкВ.

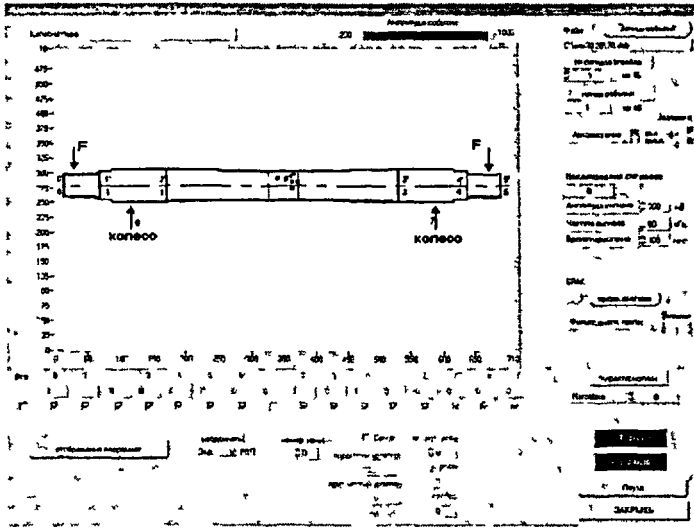


Рисунок 8 - Зарегистрированные координаты источников акустической эмиссии в оси с дефектом в средней части в окне программы системы СЦАД

В результате выполненного комплексного исследования разработана и внедрена в вагонном депо ст. Инская (ВЧД-8) методика акустико-эмиссионного диагностирования металла осей колесных пар вагонов.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработан алгоритм определения времени прихода сигналов АЭ, основанный на анализе функции сравнения среднего значения модуля сигнала на двух соседних интервалах. Предложенный алгоритм позволяет работать с многомоновыми сигналами, определять погрешность времени прихода и интегральную длительность переднего фронта, отбраковывать малоинформативные сигналы. Для лабораторных образцов погрешность определения времени прихода составляет меньше 3 мкс.

2. Выявлено влияние геометрии и акустических свойств объекта на амплитудные параметры сигналов акустической эмиссии. Относительная погрешность определения локальных информативных параметров (амплитуда, средне-

квадратичное отклонение на интервале) в объекте со значительным влиянием реверберационных процессов может достигать 50 %. В этом случае более эффективно вычислять интегральные информативные параметры: энергию, MARSE, среднеквадратичное отклонение на длительности сигнала. В противном случае амплитуда является более устойчивой величиной, а интегральные параметры имеют напротив значительную до 30 % погрешность.

Обнаружена корреляция количества пересечений линии нулевого уровня с амплитудой акустико-эмиссионного импульса. Механизм ее возникновения основан на взаимодействии сигнала с высокочастотным шумом аппаратуры. Установлен критерий применимости механизма, в котором анализируются: амплитуда и частота сигнала, временная и амплитудная дискретизация аналогово-цифрового преобразователя акустико-эмиссионной системы.

3. Получен вид теоретического распределения и его численные параметры, описывающие амплитудное распределение сигналов акустической эмиссии, возникающих при испытании стальных образцов. Амплитудное распределение сигналов акустической эмиссии в стальных образцах описывается суперпозицией двух экспоненциальных распределений. Первое распределение содержит до 85% всех зарегистрированных импульсов. Их средняя амплитуда на входе предварительного усилителя составляет около 80 мкВ, что на порядок меньше средней амплитуды импульсов второй составляющей. Эти данные позволяют определить необходимые для испытания коэффициенты усиления и пороги срабатывания аппаратуры, а так же восстановить полное количество сигналов акустической эмиссии на основе экстраполяции данных в испытаниях с меньшей абсолютной чувствительностью.

4. Найдены закономерности начала локальной пластической деформации в материале образца и появления активности сигналов акустической эмиссии, а так же установлена корреляционная связь объема пластически деформируемого материала с числом импульсов.

5. Определены два диапазона нагрузок, в пределах которых происходит излучение акустико-эмиссионных сигналов во время испытаний на усталость стальных образцов. Нижний диапазон, связанный с закрытием трещины, начинается от минимальных нагрузок цикла и заканчивается при величине 14... 16 % максимальной нагрузки. Верхний диапазон реализуется вблизи максимального усилия растяжений, причем нижняя граница диапазона расположена на 80 % от максимума. Возникающие при этом сигналы акустической эмиссии связаны с ростом усталостной трещины.

6. Исследованы акустические свойства металла оси колесной пары,

влияющие на параметры сигналов акустической эмиссии, предложена схема расстановки преобразователей, состоящая из 8 приемников сигналов, из них 6 на оси и по одному на каждом колесе. Разработан алгоритм определения источников сигналов, разбивающий ось на 5 зон с линейной локализацией и использованием двух преобразователей на дисках колес для исключения посторонних сигналов.

7. Проведены акустико-эмиссионные испытания осей колесных пар вагонов с нагружением на специально разработанном стенде, установленном в вагонном депо. Рассчитано напряженное состояние оси колесной пары при нагружении на испытательном стенде. На ее основе получены зависимости минимального количества нагружений оси при акустико-эмиссионном испытании от максимальной нагрузки испытания. При четырех нагружениях с поворотом оси на 90° максимальная нагрузка должна составлять около 240 кН на шейку, при пяти нагружениях (угол поворота - 72°) — максимальная нагрузка 200 кН. Тензометрия оси, проведенная на испытательном стенде, подтвердила расчетные данные. Обнаружены источники сигналов акустической эмиссии в средней части и в шейке, подтвержденные соответственно магнитопорошковым и ультразвуковым методами. В результате выполненных исследований разработана и внедрена в вагонном депо ст. Инская методика акустико-эмиссионного контроля осей колесных пар при периодическом освидетельствовании в депо.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Бехер С.А. Моделирование электрического импульса АЭ на основе начальной формы механического возмущения. Сборник трудов международной конференции "Разрушение и мониторинг свойств металлов": (ИМАШ, Екатеринбург, 26-30 мая 2003 г.), с. 62 - 63.

2. Муравьев В.В., Муравьев М.В., Бехер С.А. Влияние условий нагружения на информативные параметры и спектр сигналов акустической эмиссии в образцах из углеродистых сталей. - Дефектоскопия. 2002. № 7. с. 10 - 20.

3. Муравьев В.В., Муравьев М.В., Бехер С.А. Применение новой методики обработки сигналов для повышения точности локализации источников АЭ. - Дефектоскопия. 2002. № 8. с. 15 - 28.

4. Муравьев В.В., Муравьев М.В., Бехер С.А. Связь накопленной поврежденности в конструкционных сталях с акустическими параметрами сигналов. "Разрушение и мониторинг свойств металлов": Тезисы докладов международной конференции (ИМАШ, Екатеринбург, 16-19 мая 2001 г.), Под ред. Смирно-

ва СВ. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН: 2001 г., с. 118-119.

5. Муравьев В.В., Муравьев М.В., Бехер С.А. Оценка накопленной повреждаемости металлических конструкций акустическими методами для определения остаточного ресурса. "Ультразвуковая дефектоскопия металлоконструкций" Сборник докладов XVII Петербургской конференции (Санкт-Петербург-Репино, 6-8 июня 2001 г.), Санкт-Петербург, 2001 г., с. 61-65.

6. Муравьев М.В., Бехер С.А. Повышение достоверности неразрушающего контроля методом акустической эмиссии посредством увеличения точности локализации источников сигнала. "Актуальные проблемы Транссиба на современном этапе": Тезисы научно-практической конференции ученых транспортных вузов (Новосибирск, 21-23 октября 2001 г.), Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2001, 1с

7. Муравьев В.В., Муравьев М.В., Бехер С.А. Влияние условий нагружения на информативные параметры и спектр сигналов акустической эмиссии в образцах из углеродистых сталей, "Актуальные проблемы Транссиба на современном этапе": Тезисы научно-практической конференции ученых транспортных вузов (Новосибирск, 21-23 октября 2001 г.), Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2001, 1 с.

8. Муравьев В.В., Муравьев М.В., Бехер С.А. Исследование структуры сигналов акустической эмиссии с целью повышения точности локализации дефектов. СПб 2002 г. Труды XVI российской научно-технической конференции "Неразрушающий контроль и диагностика": Санкт-Петербург, 9-12 сентября 2002 г. 9 с.

9. Муравьев В.В., Муравьев М.В., Бехер С.А. Снижение уровня шумов при испытаниях методом акустической эмиссии. Труды XVI российской научно-технической конференции "Неразрушающий контроль и диагностика": Санкт-Петербург, 9-12 сентября 2002 г. 8 с.

10. Муравьев В.В., Муравьев М.В., Бехер С.А. Экспериментальное исследование влияния вида разрушения металлических материалов на характер акустической эмиссии. "Разрушение и мониторинг свойств металлов": Сборник трудов международной конференции (ИМАШ, Екатеринбург, 26-30 мая 2003 г.), с. 63.

П. Муравьев В.В., Бояркин Е.В., Власов К.В., Бехер С.А., Козятник И.И., Применение метода акустической эмиссии для обследования мостов. "Разрушение и мониторинг свойств металлов": Сборник трудов международной конференции (ИМАШ, Екатеринбург, 26-30 мая 2003 г.), с. 85.