На правах рукописи

БОБРОВ АЛЕКСЕЙ ЛЕОНИДОВИЧ

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Томск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО СГУПС)

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Степанова Людмила Николаевна

Официальные оппоненты: Мерсон Дмитрий Львович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», научно-исследовательский институт прогрессивных технологий, директор

Смирнов Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Кузбасский технический университет им Т.Ф. Горбачева», профессор кафедры «Технология машиностроения»

Башков Олег Викторович, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре Государственный Технический Университет», заведующий кафедрой «Материаловедение и технология новых материалов»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Алтайский государственный университет»

Защита диссертации состоится «13» февраля 2018 года в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: Россия, 634028, г. Томск, ул. Савиных, д. 7, ауд. 215.

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

Автореферат разослан «__» ноября 2017 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
к. т. н., доцент Шевелева Елена Александровна

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования.

Современные методы неразрушающего контроля (НК) позволяют решать диагностические задачи с высокой надежностью для объектов достаточно простой формы, имеющих однородную структуру и свойства. Вместе с тем существует ряд объектов контроля конструктивно сложных, неоднородных по структуре и имеющих внутренние допустимые дефекты – литые металлические изделия для транспорта, тяжелого машиностроения, которые имеют низкую контролепригодность для большинства методов контроля.

Литые детали – это объекты которые имеют сложную форму, неоднородность структуры, нерегулярное и неравномерное напряженно-деформированное состояние в разных локальных участках объекта и другие особенности. Поэтому, с методической точки зрения, такие объекты относятся к наиболее обобщенному случаю в практике НК и оценки ресурса и в этой связи представляют научный интерес при решении задачи оценки технического состояния на разных этапах их жизненного цикла.

Одним из наиболее перспективных методов, тесно связанных с определением динамики развития дефектов является метод акустической эмиссии (АЭ). Исследования возможностей АЭ метода с использованием современной быстродействующей аппаратуры позволяют приступить к разработке методологических подходов, обеспечивающих эффективную работу систем технической диагностики, направленных на контроль технического состояния деталей в процессе их жизни, включая оценку остаточного ресурса или срока службы изделий.

Разработка подходов к АЭ контролю состояния объектов литейного производства в течение их жизненного цикла требует теоретических, экспериментальных и прикладных исследований на примере распространенных типов литых объектов массового производства, позволяющих обобщить результаты и статистически оценить результаты исследований.

Степень разработанности темы исследования

Исследования в области применимости АЭ метода для НК технических объектов на разных стадиях их жизненного цикла проводятся давно. В нашей стране и за рубежом решением этого вопроса занимаются достаточно большое число ученых. Несколько крупных научных школ проводят активные исследования физических процессов формирования АЭ и методов ее регистрации в ме-

таллических объектах. Ученые, внесшие наибольший вклад в знания о явлении АЭ металлическх и других материалов и объектов: Г. А. Бигус, С. И. Буйло, С. П. Быков, И. Э. Власов, В. А. Грешников, В. А. Гуменюк, Ю. Б. Дробот, В. И. Иванов, В. Н. Куранов, Д.Л. Мерсон, В. В. Муравьев, А. Я. Недосека, В. В. Носов, С.В. Панин, В. В. Поляков, Г. А. Сарычев, Н. А. Семашко, А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, В. А. Стрижайло, А. С. Трипалин, В. М. Шихман, А. А. Юдин и многие другие. Активно занимались исследованиями метода АЭ такие зарубежные ученые, как H. L. Dunegan, D. O. Harris, M. A. Hamstad, K. Ono, C. B. Scruby, H. N. G. Wadley и многие другие.

Метод АЭ активно используется для контроля состояния сосудов, трубопроводов и аппаратов, работающих под давлением. Многие исследователи проводят совершенствование методик контроля деталей и конструкций более сложной формы. В процессе работы с такими изделиями и конструкциями исследователи сталкиваются с рядом проблем:

- различная контролепригодность методов НК применительно к конкретным объектам диагностики и ее неравномерность по объему сложного изделия;
- низкая эффективность большинства методов контроля в связи с необходимостью сканирования объекта, в том числе, по труднодоступным участкам;
- сложности в регистрации, обработке и интерпретации полученных данных ввиду косвенной связи измеряемых параметров с характеристиками, влияющими на надежность технического объекта;
- низкая сопоставимость результатов контроля различными методами НК.

Применение метода АЭ для определения необратимых процессов в металлических объектах сложной формы является одним из самых перспективных в контексте обозначенных проблем.

Цель работы: разработка методологических принципов АЭ контроля и критериев оценки состояния литых деталей сложной формы, с низкой контролепригодностью.

Для достижения этой цели в работе поставлены следующие основные **задачи:**

– анализ характеристик технического состояния литых стальных деталей сложной формы и их изменения в процессе эксплуатации, определение основных факторов развития опасных дефектов и методов их распознавания;

– выделение параметров АЭ, позволяющих определять тип развивающегося источника;

– исследование связи стадии развития активных источников в литых деталях с характеристиками сигналов АЭ при механическом нагружении;

– определение оптимальных параметров АЭ контроля и разработка методов получения и обработки АЭ данных, способных повысить достоверность контроля стальных объектов с низкой контролепригодностью и большим количеством акустических помех;

– разработка автоматизированной методики, позволяющей использовать наиболее точный способ определения координат источников в деталях сложной формы с неоднородной структурой;

– экспериментальные исследования АЭ параметров, описывающих состояние потенциальных источников разрушения литых деталей подвижного состава и определение достоверности выбранных значимых критериев, связанных с техническим состоянием ОК;

– разработка методических принципов продления срока службы и определения ресурса литых деталей сложной формы с использованием метода АЭ.

Научная новизна исследований.

В качестве параметра АЭ введен теоретически и экспериментально обоснованный коэффициент взаимной корреляции сигналов от источника. Установлено, что коэффициент взаимной корреляции сигналов от источника при начальном и стационарном росте трещины превышает значение 0,5, а при ускоренном росте трещины снижается. При этом источники не связанные с ростом трещин имеют коэффициент взаимной корреляции сигналов ниже 0,25.

Обосновано применение методики вероятностной оценки точности локации источников АЭ, основанной на выборе способа определения времени прихода в зависимости от максимальной амплитуды и времени нарастания для каждого сигнала. Установлено что для сигналов с большой амплитудой и малым временем нарастания более точно определяет координаты пороговый способ, а для сигналов с малой амплитудой и большим временем нарастания – двухинтервальный.

Предложена методика и аппаратура регистрации дискретной и непрерывной АЭ, которая в сочетании с обязательной установкой приемников в наиболее нагруженных местах с неравномерно распределенными непряжениями изделий позволяет повысить информативность и

чувствительность АЭ контроля.

Установлена эмпирическая зависимость между характеристиками сигналов АЭ при статическом и циклическом нагружении изделия из литой низколегированной стали и параметрами развивающегося дефекта, что позволяет идентифицировать развивающиеся трещины размером от 10 мм^2 и более, составляющих от 0,1 % площади сечения в литых деталях сложной конструкции.

Установлено, что разные типы источников АЭ имеют различные значения среднего коэффициента взаимной корреляции сигналов принимаемых одним приемником, коэффициента взаимной корреляции максимальной амплитуды сигналов принимаемых разными приемниками и отношение высокоамплитудных сигналов к общему числу сигналов от источника, что позволяет использовать эти параметры для идентификации различных источников.

Обосновано применение способа определения технического состояния литых деталей сложной формы на основе модифицированного интегрального метода оценки источника с использованием энергии сигналов от источника, коэффициента взаимной корреляции между сигналами и с учетом нагруженного состояния зоны источника.

Обоснована модель вероятностного метода оценки остаточного ресурса изделия на основе распределения Вейбулла, экспериментальные исследования позволили использовать такие параметры АЭ как суммарный коэффициент корреляции между сигналами, энергия и напряжения в области источника в качестве критериев оценки состояния деталей, имеющих сложное и неравномерное нагруженное состояние.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретически обосновано и экспериментально доказано, что коэффициент взаимной корреляции сигналов АЭ от источника, принятых в разный моменты времени и коэффициент корреляции амплитудных параметров сигналов принятых разными приемниками можно эффективно использовать для идентификации источников.

Предложена методика и аппаратура регистрации дискретной и непрерывной АЭ, которая в сочетании с обязательной установкой приемников в наиболее нагруженных местах неравномерно нагруженных изделий позволяет повысить информативность и чувствительность АЭ контроля.

Разработана статистическая модель оценки параметров ресурса АЭ методом для деталей сложной формы на основе распределения Вейбулла с заданной вероятностью безотказной работы.

Разработаны принципы использования статистических данных для контроля технических объектов с использованием параметров сигналов АЭ, получаемых в результате контроля с учетом неравномерно нагруженного состояния литых деталей сложной формы.

В работе использован обширный экспериментальный и статистический материал для определения дефектности технических объектов сложной формы на примере литых деталей подвижного состава. Приведены результаты экспериментов, доказывающие эффективность применения дополнительных параметров для оценки АЭ методом состояния объектов из низкоуглеродистых и низколегированных сталей, а также методики контроля литых деталей сложной формы.

Экспериментально доказано, что испытания с использованием повторных нагружений объектов (до 10 циклов), дают более достоверные данные о состоянии источников АЭ.

Методология и методы исследования.

При выполнении диссертационного исследования использованы теоретические и экспериментальные методы, включая моделирование физических процессов, методы статистического анализа, эмпирические данные физических экспериментов на образцах и реальных технических изделиях. Подавляющее большинство экспериментальных данных получено в ходе физического эксперимента на объектах с применением разрушающих и неразрушающих методов контроля. Обработка данных проведена с помощью математического статистического аппарата, в том числе с использованием специализированных программ.

Положения, выносимые на защиту.

1. Предложена методика распознавания источников АЭ с использованием количественной оценки коэффициента взаимной корреляции волновых пакетов сигналов от источника, коэффициента взаимной корреляции амплитуд сигналов принятых разными приемниками и доли локализованных сигналов от источника.

2. Разработана методика выбора метода определения времени прихода сигналов АЭ в зависимости от собственных параметров сигнала, таких как

максимальная амплитуда и время нарастания, с использованием формулы Байеса.

3. Для неравномерно нагружаемых объектов предложен способ регистрации и параллельной записи непрерывной и дискретной АЭ в наиболее нагруженных участках контроля, повышающий чувствительность к дефектам на начальной стадии их развития.

4. Методика проведения испытаний, повышающая информативность АЭ контроля и достоверность оценки состояния литых деталей использующая регулируемую скорость нагружения для минимизации потерь сигналов АЭ и повторные нагружения до 10 циклов для повышения точности определения величины развивающихся трещин.

5. Модифицированный интегральный критерий определения технического состояния литых деталей сложной формы с использованием энергии и корреляционного параметра сигналов АЭ с учетом величины нагрузки.

6. Вероятностная методика оценки остаточного ресурса стальных литых деталей сложной формы на основе энергетических и корреляционных параметров сигналов АЭ с учетом их неравномерного напряженного состояния.

Личный вклад. Все основные теоретические исследования и выводы диссертации получены соискателем самостоятельно. Экспериментальные данные получены в группе при непосредственном участии соискателя.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность полученных результатов обеспечена открытой публикацией научных работ, на основании которых она написана, публичным обсуждением теоретических и экспериментальных результатов на конференциях, семинарах, рецензированием большинства статей, опубликованных в научных изданиях. Кроме того, достоверность подтверждается использованием утвержденных методик выполнения измерений и контроля, использованием поверенного оборудования, применением при теоретических исследованиях методов и законов, признанных научным и техническим сообществом, а также достаточным объемом экспериментальных исследований и удовлетворительной сходимостью теоретических выкладок и экспериментов. В процессе расчетов и анализа математических зависимостей применялись стандартные пакеты программ, позволяющие обрабатывать информацию (MathCad, Cosmos и др.).

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались: на XVI российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика» (г. Санкт-Петербург, сентябрь 2002 г.); XVII российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика» (г. Екатеринбург, 5–11 сентября 2005 г.); VI Всероссийской научно-технической конференции «Политранспортные системы» (г. Новосибирск, 21–22 апреля 2009 г.); Международной научно-практической конференции «Инновационные факторы развития Транссиба на современном этапе» (г. Новосибирск, ноябрь 2012 г.); VIII Международной научно-технической конференции «Подвижной состав XXI века: идеи, требования, проекты» (г. Санкт-Петербург, 3–7 июля 2013 г.); Международной научно-практической конференции «Эксплуатационная надежность подвижного состава» (ОАО «НИИТКД», г. Омск, 18 октября 2013 г.), VIII Всероссийской научно-технической конференции «Политранспортные системы» (г. Новосибирск, 21–22 ноября 2014 г.); III Всероссийской с международным участием научно-практической конференция по инновациям в неразрушающем контроле «SibTest» (г. Томск, 27-31 июля 2015 г.), IX Российской научно-технической конференции «Механика, ресурс и диагностика материалов и конструкций» (г. Екатеринбург, 12-14 декабря 2015 г.), XXI Всероссийской конференции по неразрушающему контролю и технической диагностике (г. Москва, 28 февраля-2 марта 2017 г.), IV Международной конференции по инновациям в неразрушающем контроле «SibTest» (г. Новосибирск, 27–30 июня 2017 г.) и других конференциях.

Публикации. В процессе выполнения диссертационной работы опубликовано 48 научных трудов, в том числе: две монографии, 18 статей в ведущих рецензируемых периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК, 14 статей и докладов, 10 тезисов докладов в других научных изданиях; получено четыре патента РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из, введения, семи глав, заключения, библиографического списка, включающего 299 источников. Диссертация изложена на 335 страницах, содержит 120 рисунков, 34 таблицы.

Основное содержание работы

Первая глава содержит обзор исследований в области АЭ контроля различных металлических объектов и методик, применяемых для поиска и

идентификации различных дефектов.

Современный уровень разработки техники и исследований в области АЭ диагностики металлических изделий и конструкций показывает, что, несмотря на большое число накопленного научного и практического материала, метод АЭ слабо изучен как инструмент, имеющий влияющие параметры контроля. Для регистрации АЭ и обработки информации мало используются методики, которые повышают надежность выявления и идентификации развивающихся дефектов в самом общем случае, т. е. когда материал имеет неоднородные акустические свойства, переменную толщину и большое число разнообразных допустимых дефектов, местоположение которых чаще имеет случайное распределение, сложную геометрическую форму.

Одним из самых сложных и обобщенных случаев для проведения АЭ контроля являются литые детали сложной формы, обладающие всеми перечисленными недостатками, затрудняющими выбор основных параметров настройки диагностических систем, выбор критериев оценки состояния объекта. Разработка и совершенствование методических аспектов АЭ контроля таких деталей позволит существенно продвинуться в направлении повышения надежности АЭ метода в целом.

Вторая глава посвящена анализу факторов, определяющих динамику развития дефектов в литых деталях. Основной целью главы является определение направлений исследований по эффективному внедрению метода АЭ для выявления и идентификации разных дефектов литых деталей сложной формы – боковых рам и надрессорных балок грузовых вагонов.

На первом этапе было проведено моделирование и экспериментальные исследования напряженного состояния литых деталей при различных видах нагрузки. Для экспериментальных исследований напряжений в литых деталях использовалась микропроцессорная тензометрическая система ММТС-64.01 (класс точности 0,2) и сертифицированные проволочные тензодатчики типа ПКС. Расчетные и экспериментальные результаты показали, что воздействие комплекса сил на литые детали тележек в процессе эксплуатации включает ударные нагрузки при наличии дефектов поверхности катания колес. Тогда, при наличии допустимых внутренних литейных дефектов и переменной толщине стенок деталей, напряжения в наиболее нагруженных участках (внутренний угол буксового проема боковой рамы, кромки технологических отверстий надрессорных балок) могут превышать предел усталости материала.

Литые детали тележек грузовых вагонов работают в сложном нагруженном состоянии и имеют источники потенциального развития усталостных трещин, которые в ряде случаев имеют случайное распределение. Это иллюстрируется наличием большого числа зон контроля с постоянно обнаруживаемыми в них усталостными трещинами (рисунок 1).

Рисунок 1 – Распределение усталостных трещин в надрессорных балках по участкам детали в % от общего числа обнаруженных при контроле магнитными методами и визуально

Используя статистические данные обнаруживаемых усталостных трещин, было установлено, что через интервал времени эксплуатации обнаруживаемые усталостные трещины по размерам (например, протяженности) распределены по экспоненциальному закону, что следует и из исследований А.К. Гурвича и В.Н. Волченко.

При анализе эффективности обнаружения трещин исходили из того, что плотность вероятности $p(l)$ обнаружения трещины определенной длины l в детали, отработавшей интервал времени Δt, является произведением плотности вероятности его существования в момент времени контроля $f(l)$ и вероятности надежности его обнаружения $g(l)$ системой «дефектоскопист-средства контроля»:

$$p(l) = f(l) \cdot g(l). \qquad (1)$$

В результате сбора экспериментальных статистических данных можно получить параметр $p(l)$ в виде распределения частоты событий. Параметр $f(l)$ удовлетворительно описывается экспоненциальным законом, а параметр $g(l)$ удовлетворяет условиям:

$$g(l) \to 0 \text{ при } l \to l_{\min},$$

где $l_{\min}$ – минимальный размер выявляемых дефектов системой «дефектоскопист–средство контроля» – ограничение метода, и

$$g(l) \to 1 \text{ при } l \to \infty.$$

При достаточно больших значениях l, если система контроля надежна, то

$$g(l) \to 1 \text{ при } l \to l_{кр},$$

где $l_{кр}$ – некоторая характерная длина трещины, выше которой этот тип дефектов обнаруживается с высокой надежностью, что приводит к тому, что

$$p(l) \sim f(l). \qquad (2)$$

Косвенно степень надежности контроля данного типа дефекта иллюстрирует низкий уровень отказов деталей в процессе эксплуатации между ремонтами – около 0,014 % от общего числа проконтролированных за этот период боковых рам и 0,001 % – для надрессорных балок.

Анализ распределения плотности вероятности развивающихся трещин нормированной длины на примере трещин наклонного пояса показывает, что расчетная функция с наибольшим коэффициентом корреляции 0,969 согласуется с экспоненциальным распределением с коэффициентом $\sigma = 27$. Кроме того, из совмещения экспериментальных данных и теоретического изменения плотности вероятности на рисунке 2 видно, что число обнаруженных и забракованных дефектов существенно превышает экспоненциальное распределение. Следовательно, в этой области при контроле ошибочно как трещины идентифицируются другие, не развивающиеся дефекты.

Аналогичное представление частоты распределения трещин по длинам во внутреннем углу буксового проема боковой рамы, как участка, испытывающего наибольшие напряжения, показало, что параметр экспоненциального распределения σ равен 16,5. Это означает, что во внутреннем углу буксовых проемов боковых рам скорость роста трещин действительно выше, чем во всех других зонах и, следовательно, подтверждается гипотеза о влиянии на развитие трещин комплексного сложно нагруженного состояния этих деталей в процессе эксплуатации.

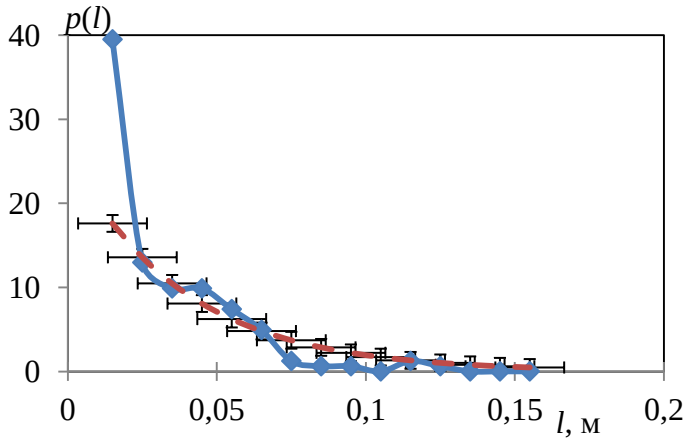

Рисунок 2 – Представление экспериментально определенной (сплошная линия) частоты и расчетной (пунктир) частоты обнаружения усталостных трещин заданной длины в наклонном поясе боковых рам

Для контроля литых деталей с целью повышения технической и экономической эффективности контроля необходимо использовать методы и методики, позволяющие идентифицировать развивающиеся и неразвивающиеся дефекты, а в наиболее нагруженных участках это необходимо делать на самых ранних стадиях развития дефектов, что потенциально возможно реализовать только АЭ методом.

Анализ разрушений боковых рам и надрессорных балок показал, что изломы носят в подавляющем числе случаев однотипный характер. Обнаруженные очаги развития усталостных трещин разделяются на три группы, которые по убыванию частоты появления можно классифицировать как:

– литейного происхождения – раковины, недоливы, неслитины и т.п.;
– не имеющие макроскопических внешних источников повреждений;
– внешнего механического повреждения.

Все изломы имеют от 8 до 25 % площади стационарной фазы развития трещины и от 30 до 50 % фазы ускоренного роста трещины. Остальную площадь излома занимает область долома (рисунок 3). Поскольку все изломы носят усталостный характер с четко различимыми стадиями усталостной деградации структурного состояния, то такого рода дефекты на стадии развития могут быть обнаружены методами НК.

Рисунок 3 – Излом боковой рамы с источником – литейным дефектом, выходящим на поверхность

Наиболее чувствительным методом контроля развивающихся дефектов является АЭ метод, который может регистрировать информацию от источников на разных, в том числе самых ранних стадиях деградации материала.

В третьей главе рассмотрены методические подходы к обеспечению высокого уровня чувствительности и теоретические вопросы обоснования значимых критериев идентификации и оценки величины обнаруживаемых дефектов.

Для повышения чувствительности контроля предложено часть приемников устанавливать в области наиболее напряженных участков. Это позволило минимизировать рассеяние энергии и регистрировать АЭ с низкой энергии из области формирования наиболее быстро развивающихся дефектов. На остальных участках, где трещины развиваются с меньшей скоростью, их можно выявлять на более поздней стадии.

Используя работы Г.А. Буденкова и О.В. Недзвецкой были рассмотрены модели формирования диаграмм направленности трещин как источников сигналов АЭ. Принцип формирования сигнала на приемнике (без учета коэффициента преобразования и его частотного распределения) приведен на рисунке 4.

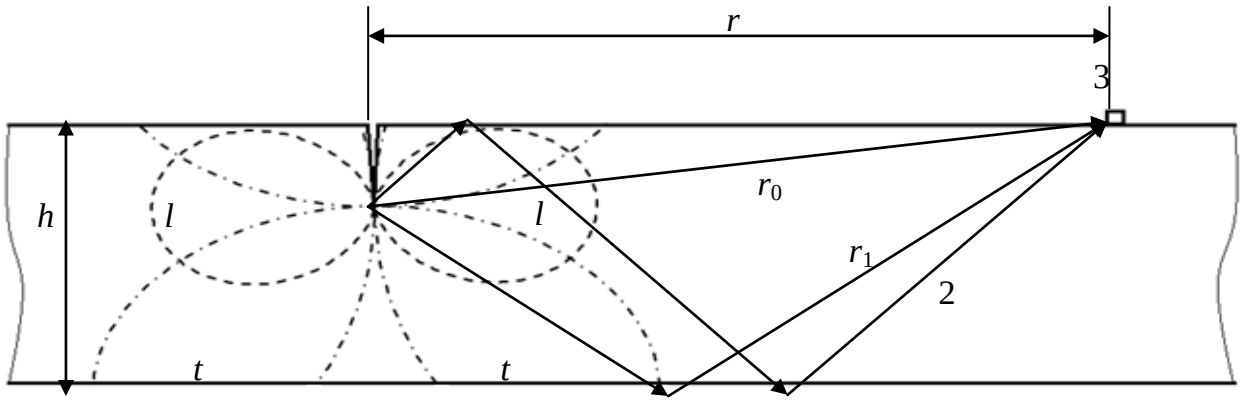

Рисунок 4 – Диаграмма направленности продольной *l* и поперечной *t* волн от приращения трещины в нормальном направлении и направления лучей прямого (0), однократно отраженного от стенки (1) и двукратно отраженного от стенок (2) объекта, достигших приемного преобразователя (3)

Описание каждого отдельного элемента амплитуды u(t) как точечного источника от развивающейся трещины перпендикулярно поверхности для продольной волны можно представить в виде:

$$u(t) = \sum_{i=1}^{k} \left[u_i(t) \cdot D_i \frac{f(\Delta S)}{r_i} \left(\frac{C_t}{C_l}\right)^2 \cdot sin^{\,2}(\theta_i) e^{-\gamma r_i} \right], \quad (3)$$

где u_i(t) – функция, огибающей волны; D_i – коэффициент прохождения волны на границах объекта; i – натуральный ряд чисел; $f(\Delta S)$ – функция, описывающая напряжения в вершине от площади приращения трещины; θ – угол отклонения продольной волны относительно направления развития трещины; r_i – расстояние, пройденное волной до приемника; γ – коэффициент затухания; C_t и C_l – скорости сдвиговой и продольной волн.

Колебания, генерируемые единичным волновым пакетом i в точке регистрации на приемнике, можно описать в виде функции от смещения времени на величину:

$$t_i = t_{\text{п}} - \frac{r_i}{C_l} + 3\delta, \tag{4}$$

при этом t_i – момент времени характеризующий первый максимум колебаний момента времени от начала записи, t_n – аппаратное время предыстории; 3δ– разность времен прихода, которую можно отождествить для идеального приемника без шумов с тройным стандартным отклонением, учитывающим неопределенность по скорости волны.

Тогда u_i на приемнике приближенно можно задать в виде нормального распределения:

$$u_i = \frac{exp\left(-\frac{(t-t_i)^2}{2\delta^2}\right)}{\delta\sqrt{2\pi}}, \tag{5}$$

где δ зависит от расстояния, так как дисперсия распределения волн по скорости волн возрастает при удалении от источника до приемника.

Пути от источника до приемника для расчета по формуле 3 описываются из геометрически заданных параметров по рисунку 4 и они представляют сумму несущих параметров r_i и θ_i, подчиняющихся следующим последовательностям.

Для прямого луча по рисунку 4 на пути от источника до приемника:

$$r_0 = \sqrt{r^2 + h^2};\ \theta_0 = arctg\left(\frac{h}{r}\right). \tag{6}$$

где r – расстояние от источника до приемника (рисунок 4); h – глубина трещины.

Для лучей, имеющих нечетное количество отражений от стенок:

$$r_i = \sqrt{r^2 + (2iH - h)^2};\ \theta_i = arctg\left(\frac{2iH-h}{r}\right), \tag{7}$$

где H – толщина участка объекта.

Для лучей, имеющих четное количество отражений от стенок:

$$r_i = \sqrt{r^2 + (2iH + h)^2};\ \theta_i = tan^{-1}\left(\frac{2iH+h}{r}\right). \tag{8}$$

Через аналогичные параметры можно выразить u_i для поперечных волн:

$$u(t) = \sum_{i=1}^{k}\left[u_i(t)\cdot D_i\frac{f(\Delta S)}{r_i}sin(\theta_i)cos^{\,2}(\theta_i)e^{-\gamma r_i}\right]. \tag{9}$$

При расчетах не учитывали коэффициент преобразования на границе сред «металл-преобразователь» и функцию, описывающую амплитудно-частотную характеристику приемника. Тогда вид волнового пакета сигнала в точке, от-

стоящей от поперечной трещины глубиной h=5 мм на расстоянии r=150 мм при напряжении в вершине трещины 100 МПа и толщине волновода H=15 мм (так как толщина стенок литых деталей в случае исследуемых литых деталей колеблется в диапазоне 10…30 мм) с учетом коэффициента затухания, равного 1 м$^{-1}$ и времени $t_п$=100 мкс будет иметь вид, представленный на рисунке 5.

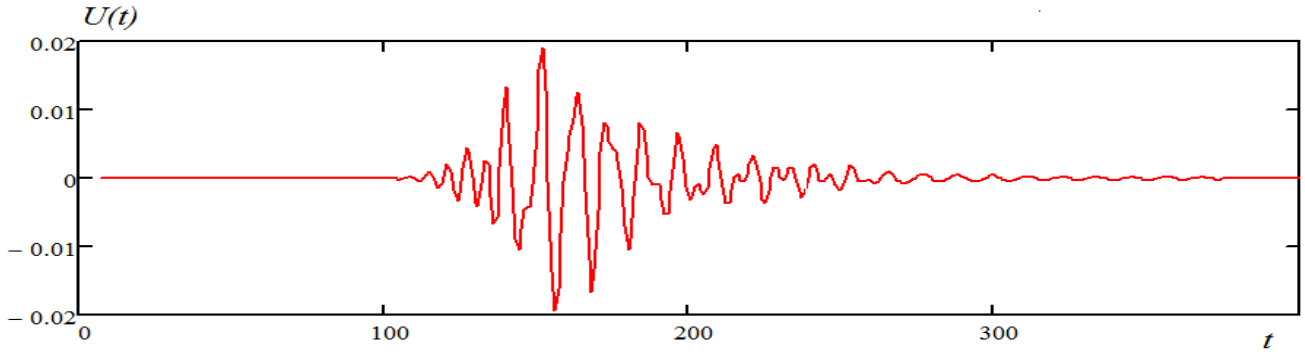

Рисунок 5 – Рассчитанный волновой пакет на приемнике сигнала с учетом акустического тракта волн от источника типа поперечной трещины, залегающей на глубине 5 мм, на расстоянии
150 мм

Варьируя параметры h и r, можно увидеть качественные изменения волновых пакетов и произвести количественную оценку их параметров. Так, если источник излучает несколько сигналов АЭ, вызванных приращением трещины, то очевидно, что все они между собой будут иметь достаточно похожие волновые пакеты.

При таком подходе параметром наиболее точно отражающим «похожесть» записанных волновых пакетов сигналов АЭ будет коэффициент взаимной корреляции разных сигналов от одного источника принятых одним приемником:

$$k_{ij} = \frac{\sum_{g=1}^{n}(a_{ig}-\overline{a_i})\cdot(a_{jg}-\overline{a_j})}{\sqrt{\sum_{g-1}^{n}(a_{ig}-\overline{a_i})^2\cdot(a_{jg}-\overline{a_j})^2}}, \qquad (10)$$

где n – общее число дискретных значений оцифрованного сигнала (в нашем случае с частотой 2 МГц); a_{ig} и a_{jg} – значения амплитуды сигналов i и j в каждой точке дискретизации g, в относительных единицах; $\overline{a_i}$ и $\overline{a_j}$ – средние значения сигналов i и j соответственно.

Расчеты коэффициента взаимной корреляции сигналов k_{ij} по формуле (10) для приращения трещины на порядок меньшую величину относительно толщины изделия или изменение направления ее продвижения на угол до 10° приводят к изменению k_{12} в пределах 0,8…1.

Исходя из представленных расчетов видно, что развитие поперечных трещин приводит к следующим отличительным последствиям, которые можно использовать при идентификации такого рода трещин:

– высокой степени корреляции между сигналами АЭ пришедшими от источников находящихся на близком друг от друга расстоянии и развивающихся в одном направлении, даже с учетом небольших изменений направления до 10° или аналогичные искривления поверхности литой детали;

– наличию продольной составляющей волны (быстрой моды) в случае распространения объемной волны, которая с учетом колебаний затухания и дифракции на препятствиях в виде литейных дефектов вносит существенную погрешность в точное определение времени прихода сигнала на приемник;

– при нахождении приемника в области Френеля акустического поля источника значение коэффициента корреляции между разными актами будет снижаться.

Из проведенных исследований следует, что корреляционные параметры сигналов АЭ можно использовать для идентификации источников, что требует экспериментального подтверждения.

Для оценки параметров развивающихся дефектов после их идентификации можно использовать эмпирические связи потоковых параметров АЭ, таких как суммарный счет, активность, энергия за период испытаний в соответствии с моделью Данегана. Основной характеристикой напряженного состояния объекта в локальной области на каждом «стационарном» этапе развития дефекта предлагается использовать E_{Σ} – суммарную энергию сигналов АЭ от развивающегося источника за время испытаний:

$$E_{\Sigma} = E_0 \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_B}\right)^n, \tag{11}$$

или для источника с концентратором:

$$E_{\Sigma} = E_0 (K_i)^n. \tag{12}$$

где определяется связь E_{Σ} с относительным напряжением при деформации без концентратора $\frac{\sigma_i}{\sigma_B}$ или с коэффициентом интенсивности напряжений K_i для источника с концентратором в виде развивающейся трещины. При этом параметры степенной зависимости для суммарного счета АЭ и энергии на разных стадиях развития дефектных структур могут иметь характерные слабо изученные тенденции при их практическом применении для контроля реальных объектов.

В четвертой главе описаны экспериментальные исследования,

полученные при АЭ испытаниях образцов из низкоуглеродистых и низколегированных сталей, направленные на установление зависимостей состояния дефектных участков различных типов по параметрам сигналов АЭ.

Так при испытаниях образцов без концентраторов установлено, что, достаточно уверенно можно разделить стадии упругой и пластической деформации по изменению энергии и активности сигналов АЭ. При этом установлено, что стабильно сигналы АЭ появляются при превышении предела выносливости материала. На стадии упругой деформации E_Σ накапливается по экспоненциальному закону (рисунок 6) и удовлетворительно описывается степенной зависисмостью. Активность $\dot{N}_\Sigma$ возрастает с увеличением напряжений (рисунок 7). На стадии пластической деформации E_Σ ведет себя нестабильно для разных образцов, а активность уменьшается. Поэтому на стадии упругой деформации можно определить факт превышения σ_{-1} и с заданной неопределенностью определить величину напряжений.

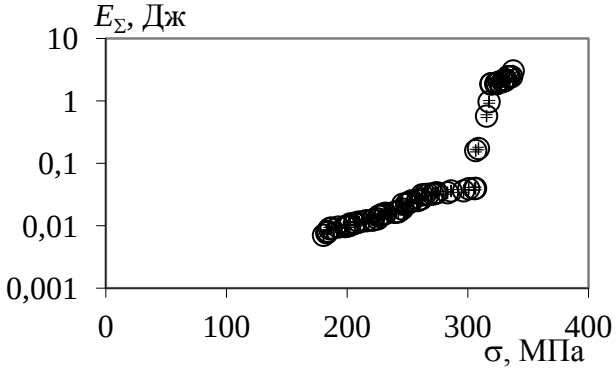

Рисунок 6 – Приращение E_Σ сигналов АЭ на стадии упругой деформации и переходе в пластическую область при статическом растяжении

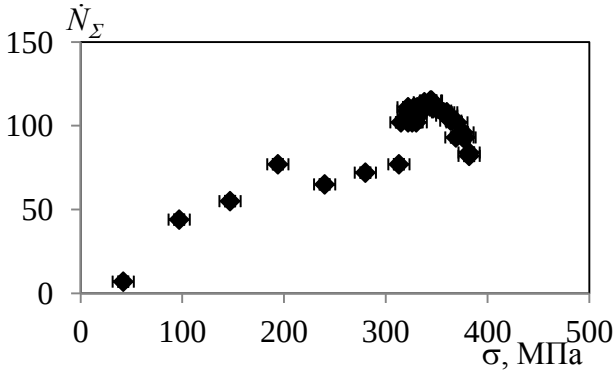

Рисунок 7 – Изменение активности сигналов АЭ от напряжения в образце при статическом растяжении

Анализ изменения потоковых параметров сигналов АЭ при наличии концентратора напряжений показывает, что суммарный счет и суммарная энергия сигналов АЭ имеют степенную зависимость, изменяющуюся на разных стадиях нагружения. Показатель степени такой зависимости, определенный из формулы (11) для низколегированных и низкоуглеродистых сталей для E_Σ изменяется в пределах от 2,6 до 7,21, а для числа зарегистрированных сигналов N_Σ – 1,75…3,5.

Показатель степени для суммарной энергии достигает максимума (рисунок 8) еще в упругой области, на стадии приближения к пределу

упругости. Показатель степенной зависимости для N_Σ на всем протяжении испытаний ниже показателя для E_Σ.

Показатель степени для суммарной энергии достигает максимума (рисунок 8) еще в упругой области, на стадии приближения к пределу упругости. Показатель степенной зависимости для N_Σ на всем протяжении испытаний ниже показателя для E_Σ. Для всех категорий сигналов проводилась оценка коэффициента их взаимной корреляции k_{ij} амплитудно-временного распределения волновых пакетов.

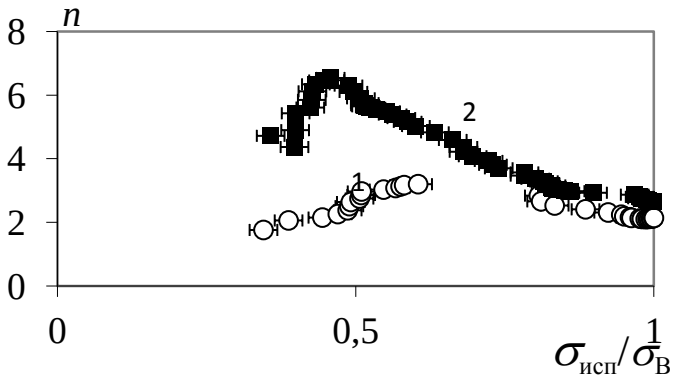

Рисунок 8 – Зависимость показателя степенной зависимости для E_Σ (*1*) и N_Σ (*2*) от величины относительного механического напряжения в области концентратора при статическом растяжении плоского образца из стали 20

Для анализа каждого исследованного образца проведена обработка всех сигналов из области концентратора и сигналов из области взаимодействия образца с нагружающим устройством, а также сигналов из других областей. Результаты этой оценки представлены на рисунке 9.

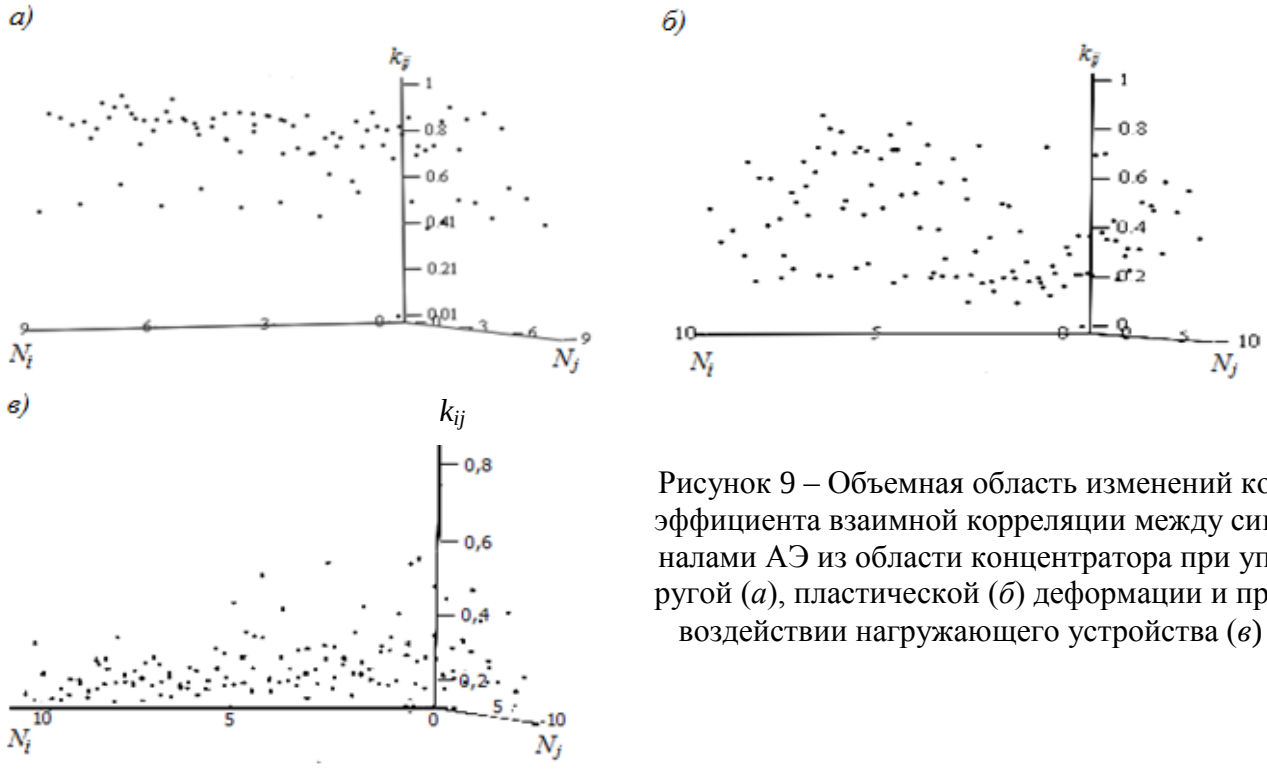

Рисунок 9 – Объемная область изменений коэффициента взаимной корреляции между сигналами АЭ из области концентратора при упругой (*а*), пластической (*б*) деформации и при воздействии нагружающего устройства (*в*)

Как видно из экспериментов со статическом растяжением металлических образцов – для идентификации источников сигналов АЭ типа трещин

целесообразно использовать коэффициент взаимной корреляции сигналов из локальной области – источника.

При циклических испытаниях при нагрузке 25 кН – число зарегистрированных сигналов N_Σ и активность $\dot{N}_\Sigma$ менялись в процессе испытания и имели три ярко выраженных максимума $\dot{N}_\Sigma$: в начальный период формирования магистральной трещины у искусственного концентратора, в период перехода скорости роста трещины к постоянному увеличению и во время, соответствующее стадии предразрушения.

Анализ результатов статических испытаний с повышенной нагрузкой (30 кН), проводимых после наработки 7..15 тысяч циклов показал связь энергии сигналов с K_i в ее вершине (рисунок 10).

Однако почти у всех образцов периодически происходят изменения активности сигналов АЭ и их энергии. Анализ структурного состояния образцов показал, что такие изменения параметров АЭ связаны с наличием литейных дефектов в виде нарушений сплошности и неоднородности структурного состояния, которые встречаются на пути трещины.

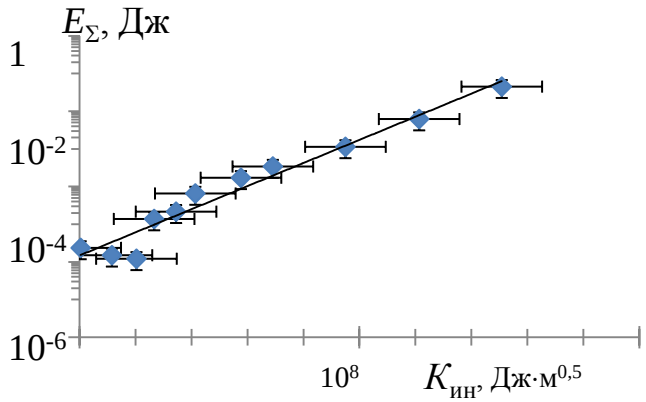

Рисунок 10 – Зависимость суммарной энергии сигналов АЭ при статических испытаниях от коэффициента интенсивности напряжений

Последующий анализ результатов статических испытаний показывает, что на стадии формирования и большей части роста трещины наблюдается зависимость числа зарегистрированных сигналов АЭ от последующего числа циклов до разрушения n_{max} при циклических испытаниях образцов. Кроме того, значения потоковых параметров АЭ циклического периода испытаний коррелируют с аналогичными параметрами каждого последующего за ним статического периода испытаний.

Таким образом, установлено, что наиболее значимыми параметрами АЭ для определения стадии развития и величины трещины являются суммарная энергия источника за время статических испытаний, коэффициент корреляции между сигналами и активность источника , которые позволяют идентифицировать участки упругой и пластической деформации и развивающейся трещины. При этом на стадиях формирования, равномерного или ускоренного роста

трещин связь E_{Σ} с $K_{ин}$ и площадью трещины $S_{тр}$ существенно зависит от наличия структурных и внутренних дефектов на пути трещины, что приводит к повышению погрешности определения параметров трещины.

Пятая глава посвящена методическим аспектам повышения достоверности АЭ контроля металлических объектов сложной формы. Такие объекты обладают высокой дисперсией параметров АЭ и существенным влиянием расстояния от источника до приемных преобразователей. Поэтому для повышения надежности контроля таких объектов необходимы способы обработки информативных параметров, позволяющие повысить точность локации, чувствительность контроля, точность определения типов и степени развития дефектов.

Как показывают расчеты и экспериментальные данные, в разных условиях контроля и при различных характеристиках сигналов АЭ (даже таких простых, как максимальная амплитуда, время нарастания, скорость нарастания) у разных способов определения времени прихода сигнала на приемники различная точность определения координат источников. Поэтому для повышения точности локации источников предложена вероятностная оценка определения координат в зависимости от влияющих на точность факторов на основе теоремы гипотез (формула Байеса):

$$P(t_i|A) = \frac{P(t_i)P(A|t_i)}{P(A)} = \frac{P(t_i)P(A|t_i)}{\sum_{i=1}^{n} P(t_i)P(A|t_i)}, \qquad (13)$$

где $P(t_i)$ – вероятность события, связанная с моментом времени прихода сигнала на i-й приемник; $P(t_i \mid A)$ – вероятность момента времени прихода сигнала на приемник в зависимости от события A, которым является влияющий параметр сигнала; $P(A)$ – вероятность случившегося события A среди различных однотипных исходов регистрации этого параметра; $P(A \mid t_i)$ – вероятность регистрации события A в зависимости от возможных исходов времени прихода сигналов на приемник.

Экспериментально полученное распределение максимальных амплитуд сигналов АЭ на рисунке 11 показывает, что вероятность определения координаты источника с высокой точностью выше для сигналов с большой амплитудой. Этот факт следует использовать при оценке достоверности локации источников АЭ на литых деталях. Обратная связь погрешности прослеживается для времени нарастания сигналов АЭ. Поэтому в роли события A формулы (13) можно использовать и максимальную амплитуду, и время нарастания.

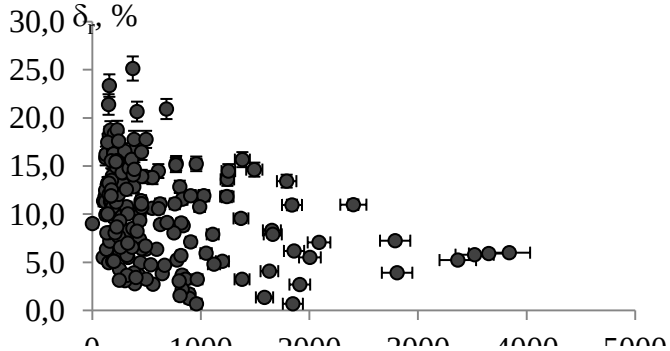

Рисунок 11 – Распределение сигналов АЭ по амплитуде и погрешности определения координат, полученное экспериментально на надрессорной балке при вдавливании индентора

Суммарная вероятность заданного значения погрешности определения времени прихода одного сигнала на приемники пьезоантенны определяется по формуле:

$$P(\Sigma t_i) = \prod P(t_i). \qquad (14)$$

где $\prod P(t_i)$ – произведение вероятностей определения времен прихода на каждый i-тый приемник.

Так, изменения вероятности определения координат с погрешностью δ_r в зависимости от максимальной амплитуды и времени нарастания зарегистрированных сигналов приведены на рисунке 12. При этом погрешность определения координат δ_r вычислена по формуле:

$$\delta_r = \frac{2\cdot\sqrt{(x_i-x_0)^2+(y_i-y_0)^2}}{(x+y)}\cdot 100\ \%, \qquad (15)$$

где x_i и y_i – координаты источника, вычисленные для i-го сигнала аналитическим путем с учетом времени прихода, определенного одним из используемых способов; x_0 и y_0 – истинные координаты источника АЭ; x и y – размеры сторон прямоугольной пьезоантенны.

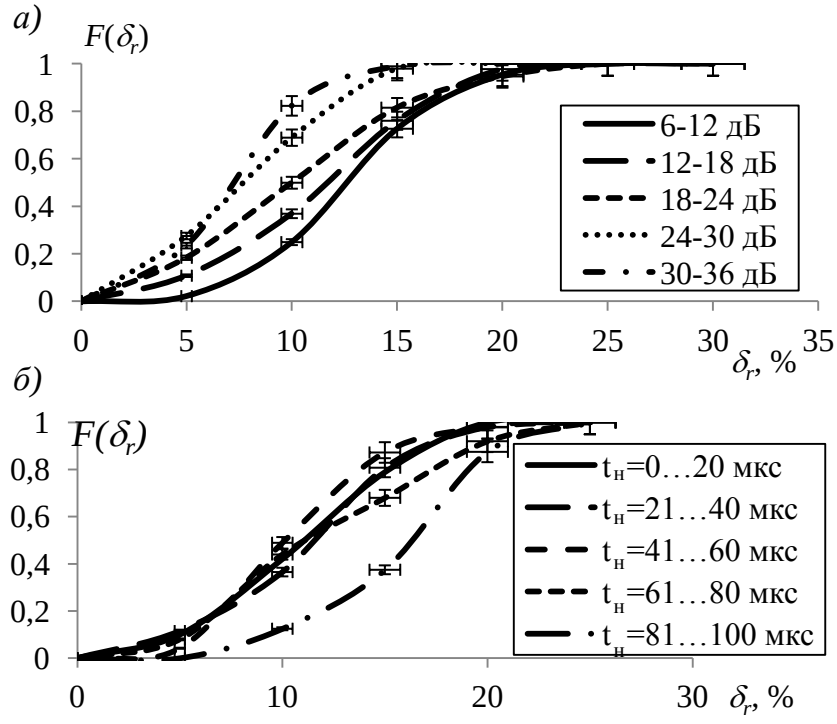

Рисунок 12 – Изменение вероятности определения координат источника с погрешностью δ_r для сигналов разной максимальной амплитудой при определении времени прихода сигналов пороговым методом (а) и различным временем нарастания сигналов при определении времени прихода методом с плавающим порогом (б)

Рассчитав вероятности для разных способов определения времени прихода сигналов АЭ, можно выделить наиболее надежный из них для заданных параметров, для разных областей сигналов

с заданной погрешностью определения координат. Картина наиболее достоверных способов определения координат источников АЭ на литой детали аналитически (с учетом координат приемников) для погрешности не менее 10 % приведена на рисунке 13. Полученное поле позволяет на основании зарегистрированных максимальной амплитуды сигналов АЭ и их времени нарастания определять наиболее достоверный способ оценки времени прихода.

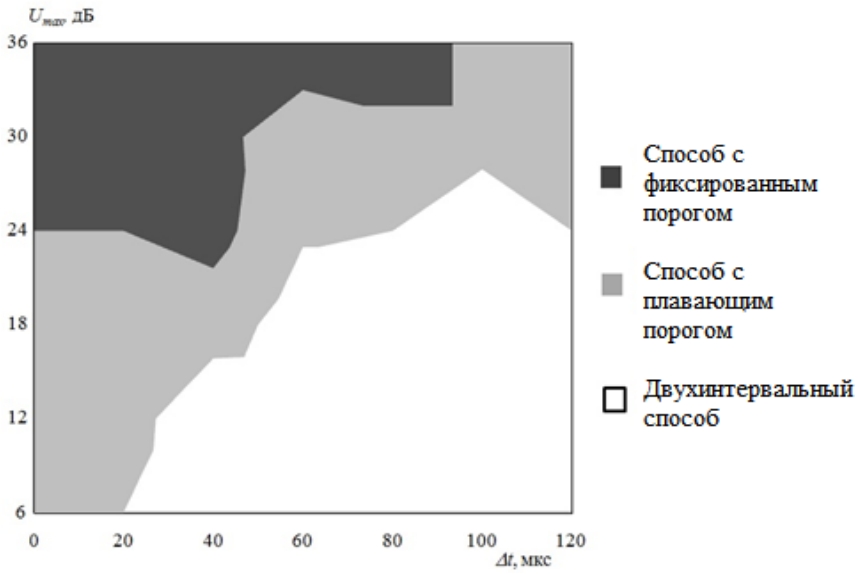

Рисунок 13 – Поле выбора способов оценки времен прихода сигналов АЭ для определения координат с погрешностью не более 10 % в зависимости от их амплитуды и времени нарастания

На следующем этапе провели оценку чувствительности каналов к развивающимся трещинам на образцах, вырезанных из отбракованных боковых рам. Образцы нагружали циклической асимметричной нагрузкой в диапазоне 0…25 кН с частотой 5 Гц. В процессе нагружения регистрировали глубину продвижения трещины, а при фиксированной толщине образцов определяли площадь ее приращения за определенное число циклов как простое произведение приращения длины на толщину образцов, которая варьировалась в диапазоне от 9 до 12 мм. На рисунке 14 приведена связь суммарной энергии сигналов АЭ при циклических испытаниях от площади развивающейся трещины. Полученный результат показывает, что E_Σ имеет связь с площадью усталостной трещины с высокой неопределенностью. При этом АЭ данные большего

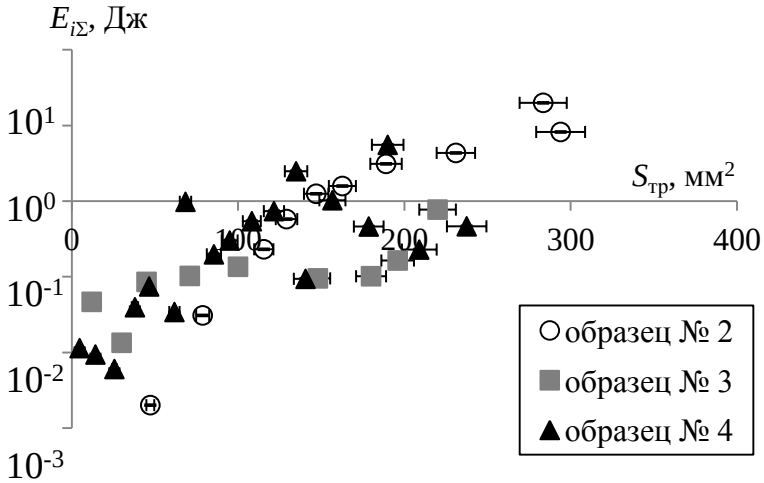

Рисунок 14 – Зависимость энергии АЭ $E_{i\Sigma}$ принятых сигналов АЭ от величины площади трещины $S_{тр}$

числа циклов нагрузки дадут более точную оценку площади трещины. Однако приращение трещины ведет себя более неоднозначно.

Таким образом, экспериментально определено, что локализованные потоки сигналов АЭ регистрируются при развитии трещин в литой низколегированной стали площадью 10 мм^2.

Кроме того, высокий уровень чувствительности каналов можно обеспечить за счет выбора места установки приемников. Основные приемные преобразователи АЭ следует устанавливать в места наиболее вероятного образования дефектов в процессе эксплуатации, а остальные преобразователи антенны устанавливать так, чтобы можно было локализовать источники в остальных потенциально опасных участках.

Установка приемников по приведенному правилу позволяет ввести три уровня оценки состояния деталей:

– первый уровень регистрирует непрерывную АЭ в местах наиболее вероятного появления источников теми преобразователями, которые установлены на этих участках;

– второй уровень регистрирует дискретные сигналы низкой энергии, которые зарегистрированы теми же самыми преобразователями и затухают на пути до более удаленных приемников;

– третий уровень позволяет регистрировать дискретные сигналы более мощной энергии, которые выделяются из шумов другими приемниками и позволяют установить координаты источника на детали.

В результате для разделения различных источников АЭ можно использовать параметр k_{sc} – коэффициент масштаба событий, который является отношением числа локализованных от источника сигналов $N_{\Sigma i}$ к общему числу сигналов (включая нелокализованные) пришедших на ближайший к источнику приемник $N_{0\Sigma i}$:

$$k_{sc} = \frac{N_{\Sigma i}}{N_{0\Sigma i}}. \qquad (16)$$

Этот коэффициент для источников с высоким содержанием сигналов с малой амплитудой и энергией будет высоким, а k_{sc} наоборот, во всех наблюдаемых случаях – менее 0,2. К таким источникам относятся участки упругой деформации и зарождающиеся трещины (рисунок 15, а).

Доля локализованных сигналов для участков пластической деформации, локальных разрушений дефектных структур и стабильно развивающейся усталостной трещины колеблется в пределах 0,2…0,8 (рисунок 15, б).

Для трещины, переходящей к стадии ускоренного роста перед рзрушением доля локализованных сигналов возрастает (рисунок 15, в) и в некоторых случаях доходит до 1.

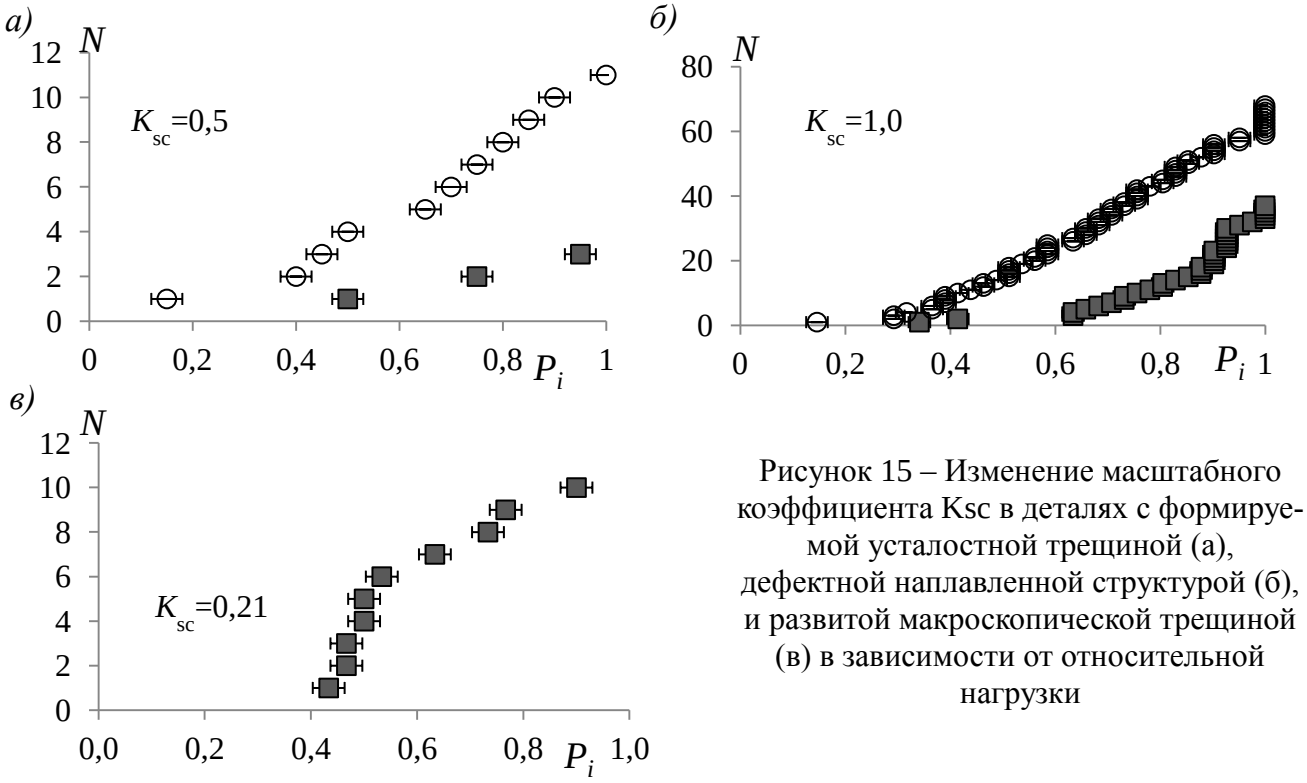

Рисунок 15 – Изменение масштабного коэффициента Ksc в деталях с формируемой усталостной трещиной (а), дефектной наплавленной структурой (б), и развитой макроскопической трещиной (в) в зависимости от относительной нагрузки

В шестой главе приведены результаты АЭ контроля литых деталей с различными пассивными и активными источниками, возникающими при изготовлении, ремонте и в эксплуатации.

Анализ зарегистрированных сигналов от различных источников при статических испытаниях реальных деталей позволяет разделить источники на три группы:

– источники, излучающие импульсы АЭ при низких нагрузках;

– источники, излучающие импульсы АЭ как при низких, так и при высоких нагрузках;

– источники, излучающие импульсы АЭ при высоких нагрузках, выше $0{,}8P_{раб}$.

Источники первой группы излучают импульсы АЭ, явно не связанные с приращением развивающихся дефектов, а вызваны либо трением берегов трещин, либо пластическими деформациями неровностей на участках воздействия нагружающим устройством, либо другими причинами, не связанными с локальной динамической перестройкой структуры материала.

Источники второй группы – это развитые трещины, источником сигналов АЭ которых служит и трение берегов трещин при низких нагрузках, и их развитие при высоких нагрузках.

Источники третьей группы излучают импульсы при нагрузках, приближенных к рабочим и выше, что может быть связано с ростом трещин, локальными пластическими деформациями, а кроме того, с поверхностными явлениями отслаивания продуктов металлургического производства на поверхности объемных дефектов при достижении нагрузок, превышающих рабочие.

По площади, занимаемой источником, они были разделены на три типа:

– компактные, к которым относятся развивающиеся трещины, участки пластической деформации;

– распределенные в виде дефектной структуры наплавленного слоя или отремонтированного сваркой участка, зоны упругой деформации;

– компактные на фоне распределенных, когда возможны сочетания источников обоих типов.

Корреляционная обработка сигналов позволила на таких участках в ряде случаев (около 8,8 % от общего числа деталей с активными источниками в области воздействия нагружающих устройств, таких как опорная поверхность буксового проема боковой рамы или верхняя часть наклонных плоскостей и подпятник надрессорных балок) выделить из потока ложных сигналов от воздействия нагружающего устройства «полезные» сигналы с относительно высоким коэффициентом корреляции k_{ij}. Анализ изломов показал наличие развивающихся усталостных трещин (рисунок 16) в области зарегистрированного активного источника АЭ, средний коэффициент взаимной корреляции между сигналами от которого превышает 0,7.

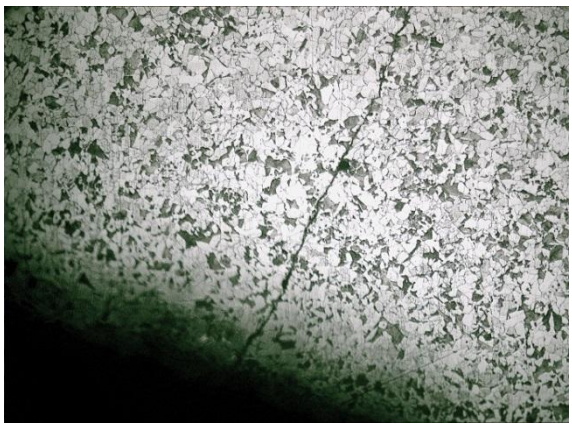

Рисунок 16 – Выявленная при АЭ трещина, ×15

Если на литейных несплошностях не развиваются усталостные дефекты и деформации происходят в упругой области, то их можно относить к классу пассивных. Кроме того, получены результаты исследований поведения параметров АЭ на развитых источниках, связанных с литейными дефектами. На рисунке 17 показаны результаты накопления суммарного счета N активных источников на литейных дефектах. Различие показателя степени

зависимости суммарного счета от нагрузки показывает различие степени развития дефектов. Так, на боковой раме № 18499, надрессорной балке № 7441 (с самыми низкими показателями степени) видимых развивающихся трещин на литейном дефекте не было обнаружено, в то время как на остальных деталях были обнаружены в сечении трещины различных размеров.

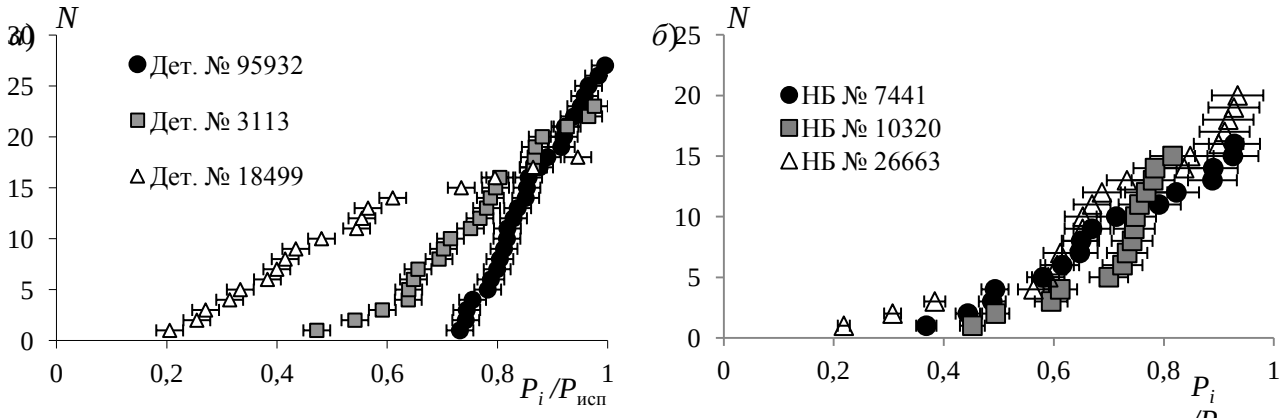

Рисунок 17 – Динамическое изменение суммарного счета *N* АЭ из областей развивающихся дефектов на литейных дефектах в боковых рамах (*а*) и надрессорных балках (*б*) при увеличении нагрузки

Исходя из расчетов формирования волнового пакета на участке, на котором находится приемник, описанный в третьей главе, было установлено, что развивающиеся трещины на разных стадиях роста имеют высокие значения коэффициента корреляции по максимальным амплитудам сигналов от актов АЭ, принятых двумя ближайшими к такому источнику преобразователями k_{UU} (рисунок 18, а). Это связанно с тем, что направленность поля такого источника и механизм формирования трещины, меняется слабо.

Стадия пластической деформации сопровождается снижением k_{UU} – коэффициента корреляции между амплитудами актов АЭ принятых ближайшими к источнику двумя приемниками (рисунок 18, б).

Стадии разрушения дефектной структуры (например, наплавленного слоя) и упругой деформации имеет еще более выраженный разброс k_{UU}, которые распределены по области такой структуры в зависимости от напряжений в ней (рисунок 18, в).

Таким образом, для разных развивающихся источников можно обобщить поведение трех введенных коэффициентов k_{ij}, k_U и k_{sc}. Эти результаты приведены в таблице 1. На основе приведенных в таблице значений коэффициентов k_{ij}, k_U и k_{sc} можно построить алгоритм идентификации каждого из приведенных типов источников.

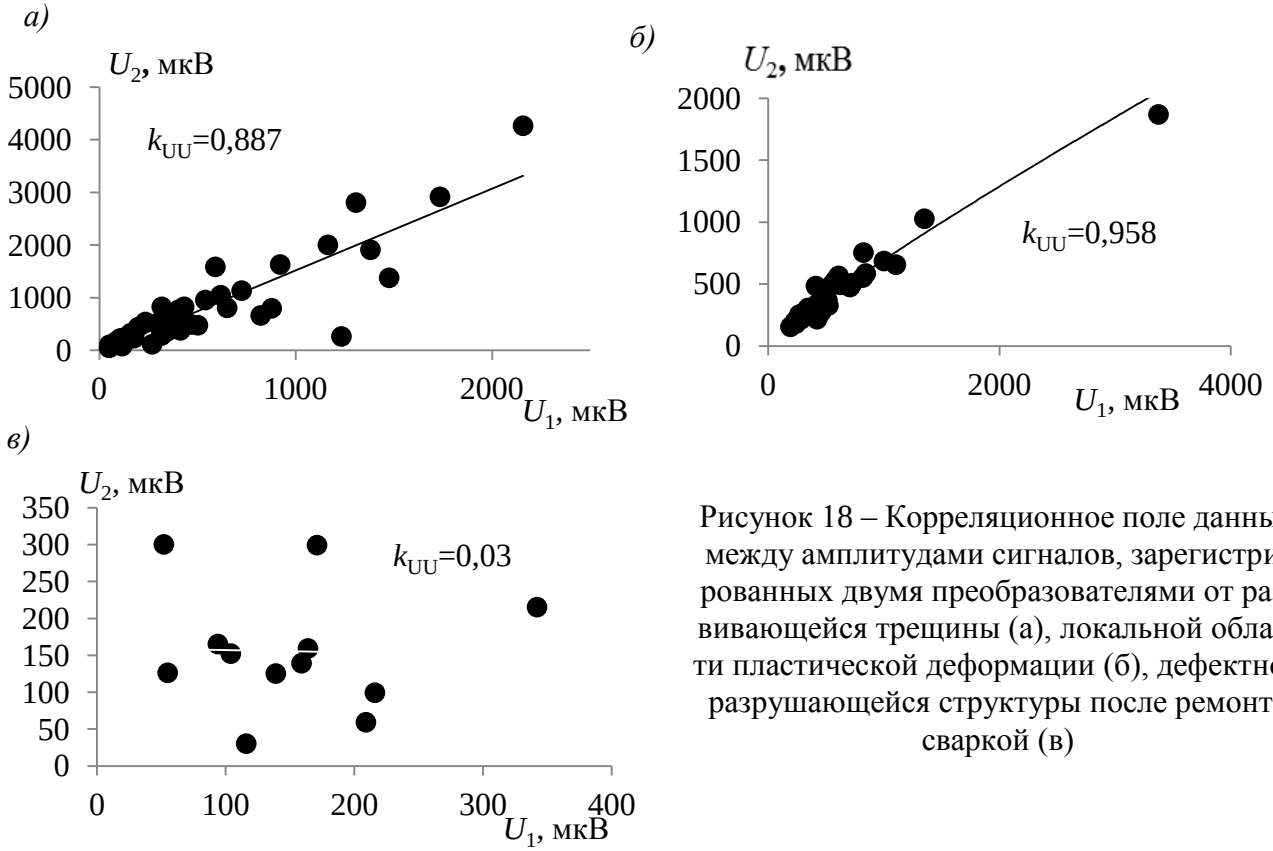

Рисунок 18 – Корреляционное поле данных между амплитудами сигналов, зарегистрированных двумя преобразователями от развивающейся трещины (а), локальной области пластической деформации (б), дефектной разрушающейся структуры после ремонта сваркой (в)

Таблица 1 – Критерии распознавания типа источника по коэффициентам k_{ij}, k_U и k_{sc}

Тип источника	Характерные значения параметров источника		
	K_{ij}	K_{UU}	K_{sc}
Упругая деформация (локальный источник)	<0,3	0,5-0,9	<0,3
Упругая деформация (распределенный источник)	<0,3	0,5-0,9	<0,3
Пластическая деформация (зуб и площадка текучести)	<0,3	0,5-0,9	<0,3
Пластическая деформация (перед разрушением)	<0,3	0,5-0,9	≥0,3
Усталостная трещина (зарождение)	>0,5	>0,9	<0,3
Усталостная трещина (стабильный рост)	0,3-0,5	>0,9	0,1-0,3
Усталостная трещина (ускоренный рост)	0,3-0,5	>0,9	0,3-1
Деградация дефектной структуры	<0,3	<0,5	0,2-0,8

В седьмой главе разработана методика периодического контроля литых деталей на основе модифицированного интегрального критерия оценки и методика продления ресурса с определением числа циклов до разрушения на основе вероятностной модели распределения Вейбулла.

При существующей системе обслуживания литых деталей подвижного состава, когда она проводится после нормированной наработки, предлагается использовать методику дифференциальной оценки состояния разных с применением двухпараметровой оценки состояния наиболее опасных источников АЭ. Как показали приведенные экспериментальные результаты, наиболее надежным параметром, определяющим величину дефекта после его идентификации, является E_{Σ} локального источника, а показателем развития усталостной трещины – k_{ij}. Комплексной величиной масштаба разрушений за время испытаний в источнике будет $E_{\Sigma k}$ – приведенная к относительной нагрузке суммарная энергия сигналов полученных от источника, которая определяется формулой:

$$E_{\Sigma k} = \sum_{i=1}^{n} E_i \cdot \frac{P_i}{P_{\max}}, \qquad (17)$$

где E_i – энергия i-го сигнала; P_i и $P_{\max}$ – соответственно нагрузка при приеме i-го сигнала и максимальная нагрузка испытаний; n – число сигналов АЭ.

Чем выше параметры степенной зависимости высвобождающейся энергии тем больше $E_{\Sigma k}$. Эмпирическая связь суммарной энергии $E_{\Sigma k}$ с K_i на стадии ускоренного роста трещины определена экспериментально:

$$E_{\Sigma k} = A \cdot K_i^{\,n}, \qquad (18)$$

где A – энергетический параметр, зависимый от чувствительности аппаратуры.

Весь объем детали делится на участки, в зависимости от диапазона напряжений, испытываемых при эксплуатации и скорости роста трещин. Для каждого участка определяются пороговые значения $E_{\min}$ и $E_{\max}$ энергетического интегрального критерия.

Корреляционный параметр Q позволяет с учетом весовых коэффициентов нагрузки и энергии сигналов определять наличие быстро развивающихся источников. Корреляционный параметр находится по формуле:

$$Q_{xy} = \sum_{\substack{i=1 \\ j=2 \\ i \neq j}} \left\{ \left(\frac{E_i + E_j}{2} \right) \cdot \frac{P_j}{P_{\max}} \cdot k_{ij} \right\}, \qquad (19)$$

где Q_{xy} – интегральная характеристика корреляции x-го источника сигнала АЭ в y-й зоне детали для двух соседних по времени прихода сигналов; P_j – нагрузка во время регистрации сигнала с большей нагрузкой.

В процессе ресурсных испытаний интегральные критерии определяются для всех зафиксированных источников АЭ, а о степени поврежденности объекта и, следовательно, о возможности и времени его дальнейшей эксплуатации

судят по дефекту, имеющему наибольшие интегральные характеристики в соответствии с таблицей 2.

По результатам испытаний образцов и деталей установлены пороговые значения критериев оценки $E_{\min}$, $E_{\max}$, $Q_{\min}$, $Q_{\max}$.

Способ был опробован на нескольких десятках боковых рам и надрессорных балок грузовых вагонов при их эксплуатации в замкнутых маршрутах. После испытаний детали, допущенные к дальнейшей эксплуатации, были использованы в течение назначенного по результатам прогнозирования срока в замкнутом маршруте. После опытной эксплуатации был проведен дополнительный контроль состояния АЭ методом, который показал, что незначительные и малозначительные источники в дальнейшем не были проявлены в результатах АЭ, и детали были вновь отданы в эксплуатацию.

Таблица 2 – Категории опасности источников АЭ в зависимости от полученных значений интегральных характеристик

Q_{xy}, мВ	$E_{\Sigma k}$, мВ		
	$E_{\Sigma k} < E_{\min}$	$E_{\min} < E_{\Sigma k} < E_{\max}$	$E_{\Sigma k} > E_{\max}$
$Q_{xy} < Q_{\min}$	Незначительный	Незначительный	Малозначительный
$Q_{\min} < Q_{xy} < Q_{\max}$	Малозначительный	Значительный	Значительный
$Q_{xy} > Q_{\max}$	Значительный	Критический	Критический

На следующей стадии исследований проанализировали возможность использования вероятностной концепции оценки остаточного ресурса литых деталей. За базу для разработки методики оценки использовали модель распределения Вейбулла, которая зависит от двух независимых параметров. Тогда измеряемый параметр, характеризующий ресурс n, определяется по формуле:

$$n = \sqrt[\alpha]{-\theta \cdot \ln(P_0)}\,, \qquad (20)$$

где P_0 – вероятность безотказной работы в течение заданного рабочего промежутка n; α и θ – параметры состояния объекта, которые можно описать с определенным приближением в виде зависимостей от параметров АЭ объекта.

Анализ формулы (20) показывает, что параметр α на стадии докритического роста трещины может быть связан с коэффициентом взаимной корреляции. Поэтому зависимость суммарного, приведенного к площади трещины коэффициента α от максимальной нагрузки испытаний наиболее точно можно описать в виде экспоненциальной зависимости, полученной экспериментально:

$$\alpha = 0{,}0025 \cdot e^{8{,}3\left(\frac{\sigma_{max}}{\sigma_B}\right)}. \quad (21)$$

где σ_B – предел прочности материала исследованного образца.

Данная зависимость, представленная непрерывной кривой на рисунке 19, и имеет коэффициент корреляции с экспериментальными результатами – 0,972.

Приведенная формула (22) приближенно описывает поведение параметра α в интервале докритического напряжения в окрестности развивающегося дефекта, критическое значение соответствует пределу текучести. Кроме того, параметр α изменяется в докритической области в пределах 0…1 и по его значению можно определить соответствующее значение относительного напряжения.

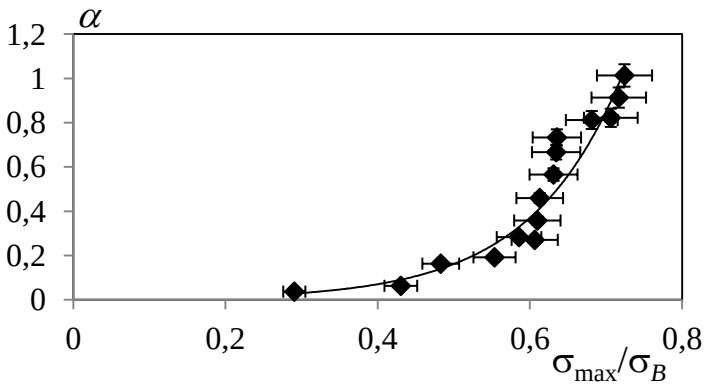

Рисунок 19 – Зависимость суммарного приведенного коэффициента взаимной корреляции сигналов k_α, излучаемых источником, от относительного максимального напряжения в области концентратора при растяжении

На втором этапе провели исследования для деталей испытывающих изгибные напряжения на участке с концентратором. Кроме того, в эксперименте были задействованы образцы с разной толщиной, что позволяет при одной и той же нагрузке получить разное напряженное состояние в вершине концентратора. Проведенные исследования показывают, что по сравнению с простым растяжением параметр α достигает более высоких значений по мере развития трещины, приводящего к окончательному разрушению. Кроме того, видно, что увеличение толщины образцов, а значит и участвующего в активном деградационном процессе объема металла сопровождается увеличением параметра α.

Однако практически все образцы показывают периодические существенные отклонения связи этих параметров от плавной кривой, что подтверждает неоднородность структурного состояния металла, вследствие наличия литейных дефектов структуры или в виде несплошностей. Именно поэтому оценка состояния материала должна носить вероятностный характер.

С практической точки зрения параметр θ можно вынести из-под корня формулы (20) таким образом, что вместо него будет фигурировать энергетический параметр:

$$\lambda = \sqrt[\alpha]{\theta}\,. \tag{22}$$

После этого производится оценка числа циклов до разрушения с использованием корреляционных зависимостей сигналов АЭ по формуле:

$$N = \lambda \cdot \sqrt[\alpha]{-\ln(1-P)}\,, \tag{23}$$

где λ – энергетический коэффициент, учитывающий суммарную энергию сигналов АЭ и определяемый по формуле

$$\lambda = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{\text{р}}} \cdot E_{\Sigma}, \tag{24}$$

где $\sigma_{\text{р}}$ – напряжение в области источника, различное для каждой зоны диагностирования, в которой регистрируются потенциально опасные источники, а E_{Σ} – экспоненциальная функция зависимости энергии от напряжений в области источника, полученная экспериментально для контролируемого материала и вида нагружения (рисунок 20).

Полученные результаты применили при оценке технического состояния литых деталей с дефектами и без них.

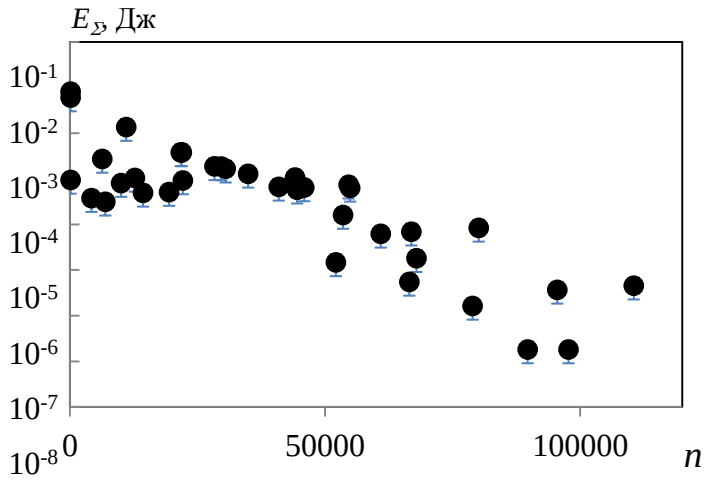

Рисунок 20 – Эмпирическая связь E_{Σ} сигналов АЭ от развивающейся трещины с числом циклов до разрушения

Для проверки результатов контроля детали, признанные годными, включая детали с незначительными и малозначительными источниками АЭ, были использованы в грузовых вагонах, курсирующих по замкнутым маршрутам с целью мониторинга их состояния через 6 месяцев и 1 год. Результаты повторных АЭ исследований показали, что на бездефектных деталях развития и возникновения новых источников не произошло. У части малозначительных источников обнаружили повышение уровня параметров АЭ.

Основные выводы:

1. В диссертационной работе были рассмотрены и решены общие подходы к методологии АЭ контроля изделий с низкой контролепригодностью – литых стальных деталей сложной формы, имеющих различные дефекты, производст-

венного и эксплуатационного происхождения и большое число шумов на примере литых деталей тележек грузовых вагонов.

2. Предложена и использована методика анализа статистических данных дефектности изделий и оценки достоверности системы контроля изделий, позволяющая оценить долю перебраковки и недобраковки в выборке диагностируемых изделий.

3. Разработана методика трехуровневой оценки источника с установкой основных приемников в центр участков с максимально напряженным состоянием и высокой вероятностью образования усталостных трещин. Использование этой методики позволили регистрировать АЭ с низкой амплитудой и энергией и повысить чувствительность к развивающимися на ранней стадии источникам.

4. Теоретические и экспериментальные исследования позволили выделить критерии идентификации различных типов источников АЭ в литых изделиях в зависимости от величины этих параметров: коэффициент взаимной корреляции сигналов от одного источника в процессе испытаний, принятых одним приемником; коэффициент взаимной корреляции максимальной амплитуды сигналов, принятых ближайшими к источнику приемниками; отношение высокоамплитудных локализованных сигналов от источника к общему числу сигналов от источника за время испытаний.

5. В работе рассмотрено влияние наличия и типа концентратора на потоковые характеристики АЭ. Установлены эмпирические зависимости суммарного числа сигналов и их энергии от величины напряженного состояния или коэффициента интенсивности напряжений для развивающихся трещин. Кроме того, установлено, что при увеличении напряженного состояния в вершине концентратора возрастает дисперсия по значениям максимальной амплитуды и энергии сигналов АЭ, коэффициент концентрации источника сначала уменьшается на стадии стабильного роста трещины, а затем увеличивается на стадии ускоренного роста трещины.

6. Разработан способ оценки достоверности определения координат источников АЭ в зависимости от параметров принятых регистрирующей аппаратурой сигналов АЭ на основе формулы Байеса. В качестве примера проведена статистическая оценка погрешности определения координат источников АЭ с первичными параметрами сигналов, такими как максимальная амплитуда, время нарастания сигналов. Установлено, что в зависимости от величины максимальной амплитуды и времени нарастания сигнала следует использовать для

расчета координат источника время прихода сигнала, определенное разными способами.

7. Экспериментально подтверждено, что АЭ испытания с использованием нескольких циклов испытательной нагрузки (для литых деталей тележки оптимальное значение – от семи до десяти циклов) приводит к снижению дисперсии получаемых значений активности и энергии развивающихся трещин, что существенно повышает достоверность оценки параметров развивающихся трещин.

8. Предложен способ дифференциальной оценки состояния литых деталей по результатам совместного использования АЭ и других методов при их периодическом контроле в процессе эксплуатации. При применении АЭ метода используется модифицированный интегральный критерий оценки состояния объектов диагностики по энергетическому и корреляционному параметрам с учетом напряженного состояния в области обнаруженного источника.

9. Разработана вероятностная методика оценки ресурса с использованием данных АЭ диагностики, применимая и опробованная для литых деталей тележки. Экспериментально определены параметры вероятностной оценки для определения параметров долговечности эксплуатации деталей, учитывающие особенности материала и напряженное состояние в области потенциально опасного источника.

Основное содержание и результаты исследования отражены в следующих публикациях.

В изданиях, рекомендованных ВАК для диссертаций:

1. *Бобров А.Л.* Экспериментальное установление связи спектра сигнала АЭ с длиной усталостной трещины в стальных образцах / . Н. Серьезнов, В.В. Муравьев, Л. Н. Степанова, С.И. Кабанов, В.Н. Чаплыгин, С.А. Катарушкин, Е.Ю. Лебедев, В.Л. Кожемякин, А. Л. Бобров и др. // Дефектоскопия. – 1999. – № 2. – С. 73–78.

2. *Бобров А.Л.* Связь спектра сигналов АЭ с процессом усталостного развития трещин в металлических объектах / А. Н. Серьезнов, В.В. Муравьев, Л. Н. Степанова, С.И. Кабанов, В.Н. Чаплыгин, С.А. Катарушкин, Е.Ю. Лебедев, В.Л. Кожемякин, А. Л. Бобров // Контроль. Диагностика. – 1999. – № 2. – С. 5–8.

3. *Бобров А.Л.* Исследование наплавленных поверхностей литых деталей тележек грузовых вагонов с использованием метода акустической эмиссии / В. В. Муравьев, А. Л. Бобров, С. А. Бехер, Е. В. Бояркин // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2008. – № 3. –

С. 42–47.

4. *Бобров, А. Л.* Анализ изменений динамических характеристик источников акустической эмиссии при статическом нагружении металлических образцов / А. Л. Бобров // Дефектоскопия. – 2009. – № 5. – С. 18–24.

5. *Бобров А.Л.* Расширение возможностей использования метода акустической эмиссии для диагностики литых деталей подвижного состава / Л. Н. Степанова, А. Л. Бобров, С. И. Кабанов, Е. Ю. Лебедев // Дефектоскопия. – 2010. – № 1. – С. 64–72.

6. *Бобров, А. Л.* Применение интегральных критериев для оценки ресурса литых деталей тележек грузовых вагонов / А. Л. Бобров // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2010. – № 1. – С. 48–53.

7. *Бобров, А Л.* Идентификация источников акустической эмиссии на литейных дефектах в литых деталях / А. Л. Бобров // Дефектоскопия. – 2010. – № 11. – С. 14–20.

8. *Бобров А.Л.* Анализ результатов неразрушающего контроля при деповском ремонте деталей тележек грузовых вагонов / С. А. Бехер, А. Л. Бобров, А. А. Больчанов // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 2. – С. 20–26.

9. *Бобров А.Л.* Акустико-эмиссионный контроль боковых рам коробчатого сечения / Л. Н. Степанова, С. А. Грассман, А. Л. Бобров и др. // Дефектоскопия. – 2011. – № 3. – С. 10–16.

10. *Бобров, А. Л.* Изменение некоторых параметров акустической эмиссии при испытании образцов из малоуглеродистой стали / А. Л. Бобров, С. А. Бехер // Дефектоскопия. – 2011. – № 6. – С. 50–56.

11. *Бобров А.Л.* Акустико-эмиссионный контроль боковой рамы тележки грузового вагона / С. А. Грассман, Л. Н. Степанова, А.А. Больчанов, С.А. Бехер, А. Л. Бобров и др. // Железнодорожный транспорт. – 2011. – № 12. – С. 45–47.

12. *Бобров, А. Л.* О возможности повышения надежности АЭ контроля литых деталей с литейными дефектами / А. Л. Бобров, С. А. Бехер // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2012. – № 3. – С. 25–30.

13. *Бобров, А. Л.* Статистическая оценка неразрушающего контроля деталей автосцепного устройства на вагоноремонтных предприятиях / А. Л. Бобров, А. А. Данилина // Вестник ВНИИЖТа. – 2012. – № 6. – С. 57–61.

14. *Бобров А.Л.* Акустико-эмиссионный контроль боковых рам тележки грузового вагона при деповском ремонте / В. Д. Верескун, Л. Н. Степанова, С.

А. Бехер, А. Л. Бобров и др. // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 1. – С. 67–71.

15. *Бобров, А. Л.* Исследование параметров сигналов акустической эмиссии при контроле литых деталей тележки грузового вагона / А. Л. Бобров, Л.Н. Степанова // Дефектоскопия – 2013. – № 12. – С. 61–68.

16. *Бобров А.Л.* Исследования основных параметров сигналов акустической эмиссии при статических и циклических испытаниях образцов из стали 20ГЛ / Л. Н. Степанова, А. Л. Бобров, К. В. Канифадин, В. В. Чернова // Деформация и разрушение материалов. – 2014. – № 6. – С. 41–47.

17. *Бобров, А. Л.* Вероятностная методика выбора значимых параметров фильтрации сигналов при акустико-эмиссионной диагностике технических объектов / А. Л. Бобров, А. А. Данилина // Дефектоскопия – 2014. – № 12. – С. 36–43.

18. *Бобров А.Л.* Использование вероятностной модели для оценки достоверности локации источников акустической эмиссии / А. Л. Бобров // Дефектоскопия. – 2017. – № 5. – С. 30–36.

Патенты на изобретения:

1. Пат. РФ 2361199, МПК G01N 29/14. Способ прогнозирования остаточного ресурса металлических изделий / А. Л. Бобров – Бюл. № 28, 10.07.2009.

2. Пат. 2431139 РФ. Способ акустико-эмиссионного контроля сосудов, работающих под давлением, и устройство для его осуществления / С. А. Бехер, А. Л. Бобров. – Бюл. № 28, 10.10.2011.

3. Пат. РФ № 2448343. Способ прогнозирования остаточного ресурса металлических изделий и устройство для его осуществления / А. Л. Бобров, Л. Н. Степанова, С. И. Кабанов, Е. Ю. Лебедев. – Бюл. № 11, 20.04.2012.

4. Пат. РФ № 2537747. Акустико-эмиссионный способ диагностирования металлических конструкций / Л. Н. Степанова, С. А. Бехер, А. Л. Бобров.– Бюл. № 1, 10.01.2015.

Монографии:

1. *Бобров А.Л.* Диагностика объектов транспорта методом акустической эмиссии / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, В.В. Муравьев, К.Л. Комаров, А.Е. Кареев, С.И. Кабанов, Е.Ю. Лебедев, В.Л. Кожемякин, А. Л. Бобров и др. ; под ред. Л. Н. Степановой, В. В. Муравьева. – М. : Машиностроение, 2004. – 368 с.

2. *Бобров А.Л.* Акустико-эмиссионный контроль железнодорожных конструкций / А. Н. Серьезнов, Л. Н. Степанова, В.В. Ивлиев, С.И. Кабанов, С.А. Бехер, А. Л. Бобров и др. – Новосибирск : Наука, 2011. – 272 с.

В других изданиях:

1. *Бобров А.Л.* Акустико-эмиссионный контроль литых деталей тележек грузовых вагонов / А. Н. Серьезнов, В. В. Муравьев, Л. Н. Степанова, А. Л. Бобров // В мире неразрушающего контроля. – 2000.– № 2. – С. 44–45.

2. *Бобров А.Л.* Анализ параметров акустико-эмиссионного контроля литых деталей / В. В. Муравьев, А. Л. Бобров / Актуальные проблемы Транссиба на современном этапе : тез. науч.-практ. конф. – Новосибирск : Изд-во СГУПСа, 2001.– С. 399–401.

3. *Бобров А.Л.* Сравнение эффективности неразрушающего контроля литых деталей вагонов различными методами / В. В. Муравьев, А. Л. Бобров, Е. В. Бояркин // Вузы Сибири и Дальнего Востока – Транссибу : тез. региональной. науч.-практ. конф. – Новосибирск, 2002. – С. 235.

4. *Бобров, А. Л.* Влияние стадий развития трещин на параметры сигналов акустической эмиссии / А. Л. Бобров // Ультразвуковая дефектоскопия металлопродукции УЗДМ–2007 : тез. докл. XIX петерб. конф., 29–31 мая 2007 г. СПб., 2007. – С. 77–78.

5. *Бобров, А. Л.* Анализ аппаратурных и методических параметров акустико-эмиссионного контроля литых деталей подвижного состава, определяющих достоверность результатов / А. Л. Бобров, М. А. Колмакова // Ультразвуковая дефектоскопия металлопродукции УЗДМ–2007 : тез. докл. XIX петерб. конф., 29–31 мая 2007 г. СПб., 2007. – С. 75–76.

6. *Бобров, А. Л.* К оценке дефектности литых деталей подвижного состава / А. Л. Бобров // Актуальные проблемы Транссиба на современном этапе. Кадровое и научно-техническое обеспечение процессов интеграции в мировую транспортную систему : тез. докладов. Междунар. науч.-практ. конф. Ч. 1. – Новосибирск : Изд-во СГУПСа, 2007. – С. 154–155.

7. *Бобров, А. Л.* Оценка дефектности литых деталей подвижного состава для совместного применения с АЭ методом / А. Л. Бобров // Вестник СГУПСа. – Вып. 17 – Новосибирск : Изд-во СГУПСа, 2007. – С. 138–142.

8. *Бобров, А. Л.* Экспериментальная методика оценки ресурса литых деталей железнодорожного подвижного состава с использованием метода акустической эмиссии / А. Л. Бобров // Контроль. Диагностика. Ресурс : сб. науч. тр. под. ред. В. Ю. Блюменштейна, А. А. Кречетова. – Кемерово, 2007. – С. 240–247.

9. *Бобров, А. Л.* Изменение параметров акустической эмиссии на разных стадиях процесса разрушения низкоуглеродистой стали / А. Л. Бобров // Механика микронеоднородных материалов и разрушение : тез. докл. V Всерос. конф. Екатеринбург, 24–28 марта 2008 г. Екатеринбург, 2008. – С. 8.

10. *Бобров, А. Л.* Применение комплексного метода определения координат источников сигналов дискретной акустической эмиссии / А. Л. Бобров // Фундаментальные проблемы формирования техногенной геосреды : тр. конф. с участием иностр. ученых. Новосибирск, 7–11 июля 2008 г. – Новосибирск, 2009. – Т. 2: Машиноведение. – С. 248–252.

11. *Бобров, А. Л.* Проблемы реформирования системы неразрушающего контроля и технической диагностики деталей и узлов подвижного состава / А. Л. Бобров // Политранспортные систем : мат-лы VI Всерос. науч.-техн. конф. Новосибирск, СГУПС, 21–22 апр. 2009 г. Новосибирск : Изд-во СГУПСа, 2009. – С. 99–102.

12. *Бобров, А. Л.* Совершенствование методики продления остаточного ресурса литых деталей тележек грузовых вагонов / А. Л. Бобров // Политранспортные системы : мат-лы VI Всерос. науч.-техн. конф., Новосибирск, СГУПС, 21–22 апр. 2009 г. Новосибирск : Изд-во СГУПСа 2009. – С. 94–99.

13. *Бобров, А. Л.* Анализ факторов, определяющих точность локализации источников дискретной акустической эмиссии / А. Л. Бобров, А. А. Сизова // Качество и инновации – основа современных технологий : сб. тр. Всерос. науч.-практ. конф. – Новосибирск : НГАСУ, 2010. – С. 90–93.

14. *Бобров, А. Л.* Специфика использования АЭ метода при определении ресурса стальных изделий / А. Л. Бобров, А. А. Данилина // Ресурс и диагностика материалов и конструкций : тез. V рос. науч.-техн. конф. Екатеринбург, 25–29 апр. 2011 г. – Екатеринбург, 2011.– С. 27.

15. *Бобров, А. Л.* Методы определения ресурса деталей подвижного состава на основе результатов неразрушающего контроля / А. Л. Бобров // Инновационные факторы развития Транссиба на современном этапе : мат-лы Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 80-летию СГУПСа, 28–29 нояб. 2012 г. – Ч. 2. – Новосибирск : Изд-во СГУПСа, 2012. – С. 40–46.

16. *Бобров А.Л.* Акустико-эмиссионный контроль боковых рам тележки грузового вагона / В. Д. Верескун, Л. Н. Степанова, С. А. Бехер, А. Л. Бобров // Фундаментальные исследования для долгосрочного развития железнодорожного транспорта : сб. тр. ; под ред. Б. М. Лапидуса. – М. : Интекст, 2013. – С. 78–84.

17. *Бобров, А. Л.* К вопросу о выборе критериев дефектности литых деталей тележек грузовых вагонов при использовании акустико-эмиссионного метода / А. Л. Бобров // Планово-предупредительный вид ремонта тягового подвижного состава с учетом его технического состояния : кол. монография по

мат-лам Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 25-летию образования ОАО "НИИТКД" "Эксплуатационная надежность подвижного состава" ; под общ. ред. А. Н. Головаша. – 2013. Омск.– С. 188–193.

18. *Бобров, А. Л.* К проблеме эффективности нагружения при акустико-эмиссионном контроле литых деталей грузовых вагонов / А. Л. Бобров // Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте : мат-лы Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Омск : ОмГУПС, 2013. – С. 158–164.

19. *Бобров А.Л.* Использование метода акустической эмиссии для повышения достоверности оценки технического состояния боковых рам / Л. Н. Степанова, Е. Ю. Лебедев, С. И. Кабанов, С. А. Бехер, А. Л. Бобров, Р. Г. Цвайгерт // Проблемы транспортной механики : тр. науч. школ факультета "Управление транспортно-технологическими комплексами" (СДМ) СГУПСа. Новосибирск : Изд-во СГУПСа, 2014. – С. 149–161.

20. *Бобров, А. Л.* Оценка чувствительности каналов АЭ диагностики литых деталей тележки вагона / А. Л. Бобров // Политранспортные системы : тез. докл. VIII Всерос. науч.-техн. конф. – Новосибирск : Изд-во СГУПСа, 2014. – С. 268–269.

21. *Бобров А.Л.* Повышение надежности критериев оценки источников акустической эмиссии в низколегированных и низкоуглеродистых сталях / А.Л. Бобров // Информационные технологии неразрушающего контроля: сб. науч. трудов Росс. школы-конф. «Информационные технологии неразрушающего контроля» с межд. участием − Томск: Изд-во ТПУ, 2015. – с. 12-17.

22. *Bobrov A. L.* Using the AE method to increase the lifetime of complex-shaped steel parts [Electronic resource] // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. - 2016. - Iss. 2. - P. 21-33.

23. *Бобров А.Л.* Повышение надежности контроля качества ремонта литых деталей / А. Л. Бобров // М-лы IX Межд. научно-техн. конф/ «Политранспортные системы» «Научные проблемы реализации транспортных проектов в Сибири и на Дальнем Востоке». – Новосибирск: Изд-во СГУПСа, 2016. – с. 188-189.

24. *Бобров А. Л.* Идентификация типов дефектов и стадии их развития при акустико-эмиссионной диагностике металических объектов / Бобров А.Л. XXI Всероссийская конференция по неразрушающему контролю и технической диагностике: сборник трудов. Москва, 28 февраля – 2 марта 2017 г. – М.: ИД «Спектр», 2017. – С. 21-23.

БОБРОВ АЛЕКСЕЙ ЛЕОНИДОВИЧ

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОГО КОНТРОЛЯ ЛИТЫХ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

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

Подписано в печать «07» ноября 2017 г.
Заказ № 3229 Тираж 120 экз. Объем 2,0 п. л.
Отпечатано в издательстве ФГБОУ ВО
«Сибирский государственный университет путей сообщения»
Адрес: 630049, Новосибирск, ул. Д. Ковальчук, 191.
Тел./факс: (383-2) 287-381. E-mail: press@stu.ru